

Centre Eau Terre Environnement

ÉVALUATION DES PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES DU SOUS-SOL ET DE L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN À PARTIR DES PROFILS DE TEMPÉRATURE NON PERTURBÉS ET OBSERVÉS DANS UN ÉCHANGEUR DE CHALEUR GÉOTHERMIQUE

Koubikana Pambou Claude Hugo

Thèse présentée pour l'obtention du grade de

Philosophiæ Doctor, Ph.D

Doctorat en sciences de la terre

Programme géré conjointement par l'INRS et l'Université Laval

Spécialité : Hydrogéologie et énergie géothermique

Jury d'évaluation

Président du jury et
Examineur interne

René Thérien
Université de Laval (Canada)

Examineur externe

Mikhail Sorin
Université de Sherbrooke (Canada)

Examineur externe

Maria Vladimirovna Klepikova
Université de Rennes (France)

Directeur de recherche

Jasmin Raymond
INRS (Canada)

REMERCIEMENTS

Au Professeur J. Raymond, j'exprime ma gratitude pour m'avoir confié ce projet doctoral et pour avoir pourvu au financement de cette formation spécialisée en hydrogéologie et énergie géothermique. Bien plus, merci pour votre disponibilité et vos encouragements qui m'ont permis de passer au travers des défis à certaines étapes critiques de ce projet.

Un grand merci spécialement au Professeur R. Thérien d'avoir honoré ce projet, en acceptant d'être le Président du Jury; à vous Professeur M.V. Klepikova d'avoir apporté une touche spéciale à cette étape jalon; et, à vous Professeur M. Sorin qui avait sacrifié vos vacances d'été afin d'attester l'intérêt de ce travail. Merci à tous pour la lecture critique et interactive ainsi que pour vos diverses contributions pour ce projet doctoral.

Au Professeur G. Assaf, à Mme L. Huss, aux corps enseignants du Congo, du Bénin et de France, je suis reconnaissant que vous m'ayez préparé et équipé afin de relever les défis sur la route de mon intégration scientifique, technologique et professionnelle.

À Mafalda, Nicolò, Jean-Marc, M. Kwemo, au groupe géothermie et toute l'équipe de l'INRS, je suis reconnaissant pour vos contributions.

À Maria Isabel Vélez (feue), l'éternité ne suffirait pas pour me souvenir de ta considération pour moi et ce projet, de ta présence et ton souhait que je termine ce projet. Promesse tenue.

À Mirah (LS), merci pour tout : «je sais désormais où la tête amène nos petits pieds».

À NISSI, GéoExperTech, la Génération Corsair, TECINA, aux familles Mutima, Moutsouka, Ngagnon, Nsikou, Nsimba, Akeyi, Doumi, Bioka, frères, sœurs et familles alliées, collègues, à tous ceux qui ont été privés de ma disponibilité, je vous prie de me pardonner de vous avoir fait supporter toute cette longue attente.

À toi Avec Amour, les Pambou et aux Koubs, les mots sont bien dérisoires pour vous dire merci du fond du cœur pour m'avoir soutenu et rappelé sagement que : « Le Premier des échoués est un Échoué; par contre, le Dernier des admis est un Admis.»

Bien plus, je dédie cette thèse à vous Mes Chères Mères, nées à l'époque coloniale où les femmes étaient interdites d'accès à l'école; à toi Mon Cher Père, qui a tout sacrifié et investi dans notre scolarisation; et, à toi l'Afrique, berceau de la science et des innovations.

Par-dessus tout, merci infiniment à toi Yahvé qui m'a toujours soutenu sans relâche.

" L'Innovation est l'assurance et l'espoir de l'Humanité."

FINANCEMENT

Cette recherche a été réalisée dans le cadre du programme de doctorat interuniversitaire entre l'Université de Laval et l'Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre et Environnement, dans la spécialité géo-ingénierie et environnement. Ce projet de recherche, portant sur l'hydrogéologie et l'énergie géothermique, a été financé par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) par le biais d'une subvention à la découverte octroyée au Professeur Jasmin Raymond, ainsi que par l'aide financière de l'INRS via les crédits de bourse octroyés au Professeur Jasmin Raymond.

RÉSUMÉ

Les méthodes d'évaluation distribuée des propriétés thermophysiques du sous-sol ont été introduites dans le secteur de l'énergie géothermique afin d'améliorer l'analyse du test de réponse thermique (TRT), car les méthodes couramment utilisées par l'industrie ne permettent pas de considérer avec suffisamment de détails l'hétérogénéité du sous-sol et l'écoulement souterrain. Ces méthodes sont basées sur des mesures de profils de température avec la fibre optique, dans des échangeurs de chaleur géothermique (ECG). Les résultats de ces approches ont montré que l'hétérogénéité et l'écoulement pourraient affecter la conductivité thermique avec un impact sur la performance et la rentabilité d'un champ d'ECG. Cependant, les mesures de température avec la fibre optique nécessitent de mobiliser une technologie complexe, une expertise spécialisée ainsi que des investissements dispendieux peu attractifs pour des projets résidentiels et commerciaux de taille modeste. Il est donc apparu nécessaire de se fixer comme objectif de développer des méthodes alternatives pouvant facilement être implémentées pour évaluer les propriétés thermiques du sous-sol et l'écoulement d'eau souterraine en utilisant uniquement des profils de température mesurés avec une sonde de température submersible dans un ECG et des profils recalculés par des approches analytiques et numériques. Les résultats de cette recherche ont permis de : (1) développer deux méthodes de correction des profils de température mesurés avec une sonde submersible dans l'ECG; (2) développer une méthode analytique pour évaluer de façon in situ le log thermostratigraphique du sous-sol avec caractérisation de l'écoulement d'eau souterraine, en analysant les profils de température mesurés durant la période de restitution d'un TRT conventionnel; (3) développer une méthode pour évaluer de façon in situ la capacité thermique et la diffusivité thermique effective du sol en recalculant analytiquement le profil de température mesuré dans l'ECG; (4) développer une méthode numérique pour évaluer un log thermostratigraphique du sous-sol en simulant numériquement un profil de température mesuré dans l'ECG. Les résultats obtenus avec un ECG pilote, au site expérimental de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) à Sainte-Foy (Québec), se sont avérés exacts et similaires à ceux des autres méthodes d'analyses de TRT et ont une résolution spatiale acceptable pour la conception des ECG. Ces résultats démontrent qu'il est possible d'aller chercher plus d'information sur le sous-sol à l'aide de profils de température mesurés avec une sonde submersible, et ce à un coût modeste afin de contribuer à l'essor des TRT et des systèmes de pompe à chaleur géothermique (PACG).

Mots clés : test de réponse thermique, pompe à chaleur, aquifère, conductivité thermique, diffusivité thermique, capacité thermique, modélisation numérique, solver.

ABSTRACT

The evaluation of subsurface thermophysical properties using a distributed analysis method has been introduced in the geothermal energy sector to improve the analysis of the thermal response test (TRT) because the commonly used methods do not sufficiently incorporate the effect of subsurface heterogeneity and groundwater flow. The recently enhanced method is based on measurements of temperature profiles in borehole heat exchangers (BHE) using fiber optics. The results of this approach showed that heterogeneity and groundwater flow could affect the thermal conductivity with an impact on the performance and profitability of a geothermal borehole field. However, temperature measurements with fiber optics require complex technology and expensive investments that are unattractive for small residential and commercial projects. Therefore, the objective of this project was to develop alternative methods, easy to implement, for subsurface characterization without using fiber-optic temperature measurements. These new integrated field methods use only temperature profiles measured with a submersible temperature probe in a BHE that are reproduced with analytical and numerical modeling. The results of this research have allowed us to: (1) develop two methods for correcting temperature profiles measured with a submersible probe in the BHE; (2) develop a method to evaluate in situ effective subsurface thermal conductivity and subsurface hydrothermostratigraphic log with characterization of subsurface flow by analyzing temperature profiles measured during the recovery period of a conventional TRT; (3) develop a semi-analytical method to evaluate in situ effective subsurface heat capacity using the undisturbed temperature profile measured in the BHE; (4) develop a method to evaluate a subsurface hydrothermostratigraphic log by numerically simulating an undisturbed temperature profile measured in the BHE. The results obtained using a pilot BHE located at the Institut national de la recherche scientifique (INRS) field facilities in Sainte-Foy (Quebec) were retrieved with accuracy, showing a similar acceptable resolution compared to other existing TRT analysis methods with high quality for BHE design. These results demonstrate that it is possible to obtain more information about the subsurface using temperature profiles measured with a submersible probe at a modest cost, contributing to the development of TRT and geothermal heat pump systems.

Keywords : thermal response test, heat pump, aquifer, thermal conductivity, thermal diffusivity, heat capacity, numerical modeling, solver.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
FINANCEMENT	IV
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES FIGURES	XI
LISTES DES TABLEAUX	XIII
LISTE DES ÉQUATIONS	XIV
ABRÉVIATION	XVI
1 INTRODUCTION	1
<i>Nomenclature</i>	1
1.1 ÉCHANGEUR DE CHALEUR GÉOTHERMIQUE : TECHNOLOGIE, MARCHÉ ET LIMITATIONS.....	2
1.2 REVUE DE LITTÉRATURE ET LIMITATIONS.....	6
1.2.1 <i>Aménagement des ECG</i>	7
1.2.2 <i>TRT conventionnel</i>	8
1.2.3 <i>Caractérisation de l'hétérogénéité et évaluation de l'écoulement souterrain</i>	13
1.2.4 <i>Température du sol non-perturbé</i>	17
1.2.5 <i>Capacité thermique et diffusivité thermique du sous-sol</i>	20
1.2.6 <i>Profil de conductivité du sous-sol</i>	21
1.3 PROBLÉMATIQUE, HYPOTHÈSE DE TRAVAIL ET OBJECTIFS.....	24
1.3.1 <i>Problématique</i>	24
1.3.2 <i>Hypothèse de travail</i>	26
1.3.3 <i>Objectifs</i>	27
1.3.3.1 <i>Objectif principal</i>	27
1.3.3.2 <i>Objectifs spécifiques</i>	28
1.4 MÉTHODOLOGIE.....	28
1.5 STRUCTURE DE LA THÈSE.....	21
2 CHAPTER 2 : FIRST ARTICLE	25
<i>Nomenclature</i>	26
2.1 INTRODUCTION.....	29
2.2 GEOLOGICAL SETTING.....	30
2.3 METHODOLOGY.....	32
2.4 FIELD METHOD DEVELOPMENT.....	32
2.4.1 <i>Depth Temperature Measurement</i>	32

2.4.2	<i>Depth Correction</i>	34
2.5	VALIDATION OF FIELD METHODS	35
2.5.1	<i>Temperature Profiling Applications</i>	35
2.5.2	<i>Assessing the Undisturbed Subsurface Temperature</i>	36
2.5.3	<i>Assessing Subsurface Thermal Conductivity</i>	36
2.5.4	<i>Calculation of the Heat Injection Rate</i>	40
2.5.5	<i>Thermostratigraphic Assessment and Evaluation of Groundwater Fluxes</i>	41
2.6	RESULTS	42
2.6.1	<i>Temperature Profile Correction Methods</i>	42
2.6.2	<i>Undisturbed Subsurface Temperature</i>	43
2.6.3	<i>Analysis of Conventional TRT</i>	45
2.6.4	<i>Analysis of Recovery Temperature Profiles</i>	48
2.6.5	<i>Hydrothermostratigraphic and groundwater fluxes Assessment</i>	53
2.7	DISCUSSION AND CONCLUSIONS	55
3	CHAPTER 3: SECOND ARTICLE	59
3.1	INTRODUCTION	63
3.2	METHODOLOGY	66
3.2.1	<i>Theoretical Background</i>	66
3.2.2	<i>Model Assumptions and Parameter Estimation Procedure</i>	69
3.2.2.1	<i>Calculated Undisturbed Ground Temperature profile</i>	70
3.2.2.2	<i>Calculated Damping Depth</i>	71
3.2.2.3	<i>Calculated Subsurface Thermal Diffusivity</i>	71
3.2.2.4	<i>Calculated Subsurface Volumetric Heat Capacity</i>	72
3.2.3	<i>Quality of Parameter Estimation</i>	72
3.2.4	<i>Stepwise Procedure for Parameter Estimation</i>	72
3.2.5	<i>Validation of the Proposed Method</i>	74
3.2.5.1	<i>Borehole Heat Exchanger and Site Description</i>	75
3.2.5.2	<i>Field Validation</i>	76
3.3	RESULTS	77
3.3.1	<i>Estimation of Empirical parameters</i>	78
3.3.1.1	<i>Observed Undisturbed Ground Temperature</i>	78
3.3.1.2	<i>Assessment of Empirical Coefficients</i>	79
3.3.2	<i>Subsurface Thermal Diffusivity and Volumetric Heat Capacity</i>	80
3.3.2.1	<i>Damping Depth (Z_{dd}) and TD Estimation Using the New Empirical Method</i>	80
1.1.1.1	<i>HC Estimation Using the New Empirical Method</i>	81
1.1.1.2	<i>Comparison of Calculated Subsurface Heat Capacity with the Dual Needle Concept</i>	81
1.1.1.3	<i>Comparison of Calculated Subsurface Heat Capacity with OTRT Method</i>	82

3.4	DISCUSSION AND CONCLUSIONS	83
4	CHAPITRE 4: TROISIÈME ARTICLE	86
4.1	INTRODUCTION	89
4.2	PRESENTATION DU SITE DE L'ECG	93
4.2.1	GEOLOGIE DU SITE ET SYNTHÈSE THERMOSTRATIGRAPHIQUE	94
4.2.2	PROFILS DE TEMPERATURE OBSERVES.....	95
4.2.3	PROFIL DE CONDUCTIVITE THERMIQUE ET FLUX DE CHALEUR	96
4.3	METHODOLOGIE	96
4.3.1	APPROCHE CONCEPTUELLE	96
4.3.2	MODELE NUMERIQUE 1D POUR L'ANALYSE THERMOSTRATIGRAPHIQUE	99
4.3.3	MODELE NUMERIQUE 2D POUR L'ANALYSE THERMOSTRATIGRAPHIQUE	103
4.3.4	RAFFINEMENT DU MAILLAGE ET INDEPENDANCE DES CONDITIONS FRONTIERES	107
4.3.5	CRITERES DE VALIDATION DES RESULTATS	108
4.4	RESULTATS	108
4.4.1	ANALYSE NUMERIQUE DU LOG THERMOSTRATIGRAPHIQUE EN MODELE 1D	108
4.4.2	PROFIL DE TEMPERATURE SIMULE DE L'ECG	109
4.4.3	PROFIL DE CONDUCTIVITE THERMIQUE SIMULE	111
4.4.4	ÉVALUATION DU FLUX DE CHALEUR TERRESTRE	112
4.4.5	ANALYSE NUMERIQUE DU LOG THERMOSTRATIGRAPHIQUE DU MODELE 2D	112
4.4.6	ÉVALUATION DES CRITERES DE VALIDATION DES RESULTATS	115
4.5	DISCUSSION ET CONCLUSIONS	116
5	DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSIONS.....	120
5.1	PROBLEMATIQUE, APPROCHE CONCEPTUELLE, HYPOTHESE DE TRAVAIL ET LIMITATIONS	120
5.2	LES LIVRABLES DE LA THESE ET LEURS CONTRIBUTIONS	123
5.2.1	ÉVALUATION DE LA TEMPERATURE DU SOUS-SOL NON PERTURBE.....	128
5.2.2	ÉVALUATION DE LA DIFFUSIVITE THERMIQUE ET DE LA CAPACITE THERMIQUE	129
5.2.3	ÉVALUATION DU PROFIL DE CONDUCTIVITE THERMIQUE, DE L'HETEROGENEITE ET DE L'ÉCOULEMENT D'EAU SOUTERRAINE.....	129
5.2.4	ÉVALUATION DU FLUX DE CHALEUR TERRESTRE	130
5.2.5	PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DU SOUS-SOL AU SITE DE L'INRS	130
5.3	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	131
	BIBLIOGRAPHIE	135
6	ANNEXE I.....	151
6.1	ÉVALUATION DE L'IMPACT DU MAILLAGE ET IDENTIFICATION DU MAILLAGE OPTIMAL	151
6.2	PROFONDEUR DE LA FRONTIERE BASALE	153

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1	TRT CONVENTIONNEL RÉALISÉ PAR CIRCULATION DE L'EAU RÉCHAUFFÉE DANS UN ECG VERTICAL.	4
FIGURE 1.2	ANALYSE D'UN TRT PAR LA MÉTHODE DE PENTE GRAPHIQUE.	11
FIGURE 1.3	PRINCIPALES ÉTAPES MÉTHODOLOGIQUES.	20
FIGURE 2.1	STRATIGRAPHIC LOG OF THE INRS EXPERIMENTAL SITE.	31
FIGURE 2.2	IMPLEMENTATION OF THE DEPTH CORRECTION METHODS IN BHE 1U-PIPE.	33
FIGURE 2.3	COMPARATIVE TEMPERATURE PROFILES FOR THE VALIDATION OF THE DEPTH CORRECTION METHODS.	43
FIGURE 2.4	TEMPERATURE PROFILES RECORDED AFTER DRILLING THE BOREHOLE FOR THE GHE.	44
FIGURE 2.5	HEAT INJECTION RATE AND TEMPERATURE MEASURED DURING THE TRT.	45
FIGURE 2.6	CONVENTIONAL TRT ANALYSIS WITH THE SLOPE METHOD (ILS).....	47
FIGURE 2.7	TRT ANALYSIS WITH THE CURVE FITTING METHOD.	48
FIGURE 2.8	RECOVERY TEMPERATURE PROFILES RECORDED AFTER HEAT INJECTION.	49
FIGURE 2.9	CONSTANT AND VARIABLE HEAT INJECTION RATE HYPOTHESES FOR TRT ANALYSIS.....	50
FIGURE 2.10	THERMAL CONDUCTIVITY ASSESSMENT WITH RECOVERY TEMPERATURE MEASURED AT DEPTHS OF 22 M AND 40 M USING THE SLOPE METHOD.	51
FIGURE 2.11	THERMAL CONDUCTIVITY PROFILES FROM THE ANALYSIS OF RECOVERY TEMPERATURE LOGS. ...	52
FIGURE 2.12	HYDROTHERMOSTRATIGRAPHIC LOG OF THE GHE AT INRS EXPERIMENTAL WELL SITE.	54
FIGURE 2.13	EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY PROFILE USED FOR THE PECKET NUMBER ANALYSIS.	55
FIGURE 3.1	THEORETICAL ANNUAL GROUND TEMPERATURE DISTRIBUTION.	67
FIGURE 3.2	ANNUAL GROUND TEMPERATURE DISTRIBUTION.....	68
FIGURE 5.3	PROCEDURE FOR ASSESSING THE IN SITU HC FROM A TEMPERATURE PROFILE UNDISTURBED BAY A TRT AND THE IN SITU TC INFERRED FROM THE TRT.	73
FIGURE 3.4	GEOTHERMAL EXPERIMENTAL SITE AT INRS (QUEBEC CITY).....	74
FIGURE 3.5	GROUND TEMPERATURE PROFILING AT INRS GEOTHERMAL EXPERIMENTAL SITE (QUEBEC).	75
FIGURE 3.6	HYDROTHERMOSTRATIGRAPHIC LOG OF THE 1UBHE AT THE INRS EXPERIMENTAL SITE.....	76
FIGURE 3.7	OBSERVED UNDISTURBED GROUND TEMPERATURES AT THE INRS EXPERIMENTAL SITE.	79
FIGURE 3.8	NORMALIZED ($T_{\text{NORMALIZED}}$) AND MEASURED (T_{OBSERVED}) TEMPERATURE PROFILES AT THE INRS EXPERIMENTAL SITE.	80
FIGURE 4.1	SITE EXPÉRIMENTAL DE L'INRS (QUÉBEC).	93
FIGURE 4.2	COUPE THERMOSTRATIGRAPHIQUE AU VOISINAGE DE L'ECG (1U) SUR LE SITE EXPÉRIMENTAL DE L'INRS (QUÉBEC).	95

FIGURE 4.3	ÉTAPES MÉTHODOLOGIQUES SUIVIES POUR L'ANALYSE NUMÉRIQUE.....	99
FIGURE 4.4	MODÈLE CONCEPTUEL EN COUPE VERTICALE 1D.....	100
FIGURE 4.5	GÉOMÉTRIE DU MODÈLE NUMÉRIQUE 1D POUR L'ECG SUR LE SITE DE L'INRS.....	101
FIGURE 4.6	MODÈLE CONCEPTUEL EN COUPE VERTICALE 2D.....	104
FIGURE 4.7	GÉOMÉTRIE ET MAILLAGE DU MODÈLE 2D AUTOUR DE L'ECG POUR LE SITE DE L'INRS.....	105
FIGURE 4.8	PROFILS DE TEMPÉRATURE OBSERVÉ ET SIMULÉ EN 1D AU SITE DE L'INRS.	109
FIGURE 4.9	COMPARAISON DE LA COUPE THERMOSTRATIGRAPHIQUE DE L'ECG (A) ET DES RÉSULTATS DE MODÉLISATION 2D.	113
FIGURE 5.1	PROCÉDURE POUR L'ÉVALUATION DES PARAMÈTRES THERMOPHYSIQUES ET HYDRAULIQUES EN UTILISANT LA NOUVELLE MÉTHODE PROPOSÉE.	121

LISTES DES TABELAUX

TABLEAU 2.1 : PARAMETERS FOR CONVENTIONAL TRT ANALYSIS	46
TABLEAU 2.2 : COMPARISON OF THE TC OBTAINED AVEC THE CONVENTIONAL TRT ANALYSIS AND THE NEW ANALYSIS METHOD USING THE RECOVERY TEMPERATURE PROFILES	53
TABLEAU 3.1 : EXPERIMENTAL COEFFICIENTS ESTIMATED FROM SOLVER OPTIMIZATION (EQUATIONS (2) TO (4) APPLIED ON THE TEMPERATURE PROFILE MEASURED (TOBS(Z) IN 2015 AT THE INRS EXPERIMENTAL BHE BEFORE A TRT	79
TABLEAU 3.2 : IN SITU TD AND HC ESTIMATED (EQUATIONS (2) TO (6) BY APPLYING THE NEW HEAT TRACING METHOD ON THE TEMPERATURE PROFILE MEASURED IN 2015 AT THE INRS SITE BEFORE A TRT	81
TABLEAU 3.3 : SUBSURFACE HC INFERRED WITH THE NEW HEAT TRACING METHOD COMPARED TO THE RESULTS OBTAINED BY (11) USING THE DUAL NEEDLE CONCEPT AT THE INRS EXPERIMENTAL SITE. MEAN VALUES OF EACH METHOD AND MEAN RELATIVE DIFFERENCE IN BOLD	81
TABLEAU 3.4 : SUBSURFACE HC INFERRED WITH THE NEW HEAT TRACING METHOD COMPARED TO THE RESULTS OBTAINED BY (11) USING THE OTRT METHOD AT THE INRS EXPERIMENTAL SITE...	82
TABLEAU 4.1 : INTRANTS UTILISES DANS LE MODELE NUMERIQUE 1D	102
TABLEAU 4.2 : PRINCIPALES DONNEES DANS LE MODELE NUMERIQUE 2D.....	106
TABLEAU 4.3 : SOMME DES RESIDUS AU CARRE ENTRE LES TEMPERATURES OBSERVEES ET SIMULEES.....	110
TABLEAU 4.4 : ÉVALUATION DES TEMPERATURES OBSERVEES ET SIMULEES	110
TABLEAU 4.5 : COMPARAISON DES RESULTATS ENTRE LES METHODES ANALYTIQUE VERSUS NUMERIQUE 1D.....	131
TABLEAU 1.1 : COMPARAISON ENTRE LES TEMPERATURES OBSERVEE VERSUS SIMULEE 2D.....	114
TABLEAU 5.1 : PROPRIETES HYDROTHERMOPHYSIQUES EVALUEES POUR LE L'ECG AU SITE DE L'INRS (QUEBEC).....	131
TABLEAU 6.1 : ÉVALUATION DE L'IMPACT DU TYPE MAILLAGE SUR LA VALEUR DE LA TEMPERATURE A 10M ET 100 M DE PROFONDEUR (MODELE 1D).	151
TABLEAU 6.2 : ÉVALUATION DE L'IMPACT DE LA TAILLE DES ELEMENTS SUR LA VALEUR DE LA TEMPERATURE A 10M ET 100 M DE PROFONDEUR (MODELE 1D).....	152
TABLEAU 6.3 : ÉVALUATION DE L'IMPACT DU TYPE DE MAILLAGE SUR LA VALEUR DE LA FONCTION OBJECTIVE ET LA TEMPERATURE QUI A ETE EVALUEE A 1000 M DE PROFONDEUR (MODELE 1D)	152

LISTE DES ÉQUATIONS

ÉQUATION (1.1).....	9
ÉQUATION (1.2).....	17
ÉQUATION (2.1).....	34
ÉQUATION (2.2).....	34
ÉQUATION (2.3).....	35
ÉQUATION (2.4).....	37
ÉQUATION (2.5).....	37
ÉQUATION (2.6).....	37
ÉQUATION (2.7).....	37
ÉQUATION (2.8).....	37
ÉQUATION (2.9).....	37
ÉQUATION (2.10).....	38
ÉQUATION (2.11).....	38
ÉQUATION (2.12).....	38
ÉQUATION (2.13).....	38
ÉQUATION (2.14).....	39
ÉQUATION (2.15).....	39
ÉQUATION (2.16).....	39
ÉQUATION (2.17).....	39
ÉQUATION (2.18).....	40
ÉQUATION (2.19).....	40
ÉQUATION (2.20).....	40
ÉQUATION (2.21).....	40
ÉQUATION (2.22).....	41
ÉQUATION (2.23).....	42
ÉQUATION (2.24).....	42
ÉQUATION (3.1).....	70
ÉQUATION (3.2).....	71
ÉQUATION (3.3).....	71
ÉQUATION (3.4).....	71
ÉQUATION (3.5).....	71
ÉQUATION (3.6).....	71

ÉQUATION (3.7)	71
ÉQUATION (3.8)	72
ÉQUATION (3.9)	72
ÉQUATION (3.10)	72
ÉQUATION (4.1)	99
ÉQUATION (4.2)	102
ÉQUATION (4.3)	103
ÉQUATION (4.4)	103
ÉQUATION (4.5)	104

ABRÉVIATION

SIGLE:	DESCRIPTION
ADEME:	Agence d'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ASHRAE:	American society of heating, refrigerating and air conditioning engineers
BE:	Bias Error
BHE:	Borehole Heat Exchanger ou Puits pour échangeur de chaleur
CCEG:	Coalition canadienne de l'énergie géothermique
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
CSGV:	Champ de sondes géothermiques verticales
CO ₂ :	Gaz carbonique
D:	Dimension de la modélisation (géométrie)
DTRT:	Distributed thermal response test ou Test de réponse thermique distribuée
DTS:	Distributed temperature sensing ou Mesurage distribué de la température
ECG:	Échangeur de chaleur géothermique
GCHP:	Ground-coupled heat pump ou Pompe à chaleur couplée au sol
GHE:	Ground heat exchanger ou Échangeur de chaleur au sol
GSHP:	Ground Source Heat Pump Association
HC:	Heat capacity ou Capacité thermique

INRS:	Institut national de la recherche scientifique
LSI:	Ligne source infinie
MAAT:	Mean annual air temperature ou Moyenne annuelle de la température de l'air au sol
OF:	Objective function ou Valeur du delta fournie par le solveur de l'optimisation inverse
OTRT:	Oscillatory thermal response test ou Test de réponse thermique oscillatoire
PACG:	Pompe à Chaleur géothermique
RE:	Relative error ou Erreur relative
RMSE:	Root mean square error ou Racine au carré de l'écart quadratique moyen
SC:	Simulation case ou Scénario de simulation
TC:	Thermal conductivity ou Conductivité thermique (TC)
TD:	Thermal diffusivity ou Diffusivité thermique (DT)
TRT ou ERT:	Test de réponse thermique ou Essai de réponse thermique
1U ou 2U:	Une boucle de tuyau pour un ECG ou double boucle de tuyaux de l'ECG
UGT:	Undisturbed ground température ou Température du sol non perturbé

1 INTRODUCTION

Nomenclature

<i>L</i> :	Longueur totale de la PACG (m)
<i>q</i> :	Charge thermique (W)
<i>R</i> :	Resistance thermique (m K W ⁻¹)
<i>T</i> :	Temperature (°C)

Indices

<i>a</i> :	Période annuelle de 10 ans
<i>b</i> :	Forage (ECG)
<i>f</i> :	Fluide
<i>h</i> :	Période horaire de 6 heures
<i>m</i> :	Période mensuelle de 6 mois
<i>p</i> :	Pénalité
UGT:	Undisturbed ground temperature ou temperature du sol non perturbé

1.1 Échangeur de chaleur géothermique : technologie, marché et limitations

L'épuisement des combustibles fossiles (charbon, houille, pétrole et gaz), l'abandon de l'énergie nucléaire à cause du risque environnemental, les crises énergétiques liés au prix du pétrole et du gaz, le défi de la décarbonation et les autres enjeux liés à la lutte contre les changements climatiques ont montré la nécessité de recourir aux énergies renouvelables durables et aux énergies de transition (Sanner et al., 2005; Rajaobelison, 2021; Javidan et al., 2022; Kutzner et al., 2022). En ce sens, l'énergie géothermique présente un potentiel inestimable comme alternatif durable à cause de sa large disponibilité spatiale et ses grandes réserves qui peuvent être exploitées soit directement sur la masse rocheuse ou en utilisant directement l'eau souterraine ou par une combinaison des deux (Comeau et Raymond, 2020). Pour ce projet, l'intérêt a été porté sur l'énergie géothermique de basse enthalpie, qui est exploitée au moyen de différents types de systèmes de pompe à chaleur géothermique (PACG) composés par des échangeurs de chaleur géothermique (ECG), généralement installés dans des forages verticaux creusés dans le sous-sol à des profondeurs pouvant atteindre 150 à 300 m (Gehlin et al., 2016; Raymond et al., 2017; Comeau et Raymond, 2020). Ces PACG bénéficient de l'inertie thermique du sous-sol et exploitent des températures moyenne en dessous de 30 degrés Celsius au moyen d'ECG connectés avec un bâtiment par le biais des tuyaux dans lesquels circule un fluide caloporteur. Ces PACG sont utilisés depuis plusieurs années pour le chauffage et la climatisation des bâtiments, la réduction de la consommation d'énergie et l'amélioration de l'efficacité énergétique pour plusieurs autres applications industrielles qui utilisent traditionnellement les combustibles fossiles ou l'hydro-électricité (Sanner et al., 2005; Zhang et al., 2014; Gehlin et al., 2016; Urchueguía et al., 2018; Javidan et al., 2022). C'est ainsi que trois principaux types de PACG ont été développés selon différentes configurations qui sont : les PAC d'aquifère opérées en boucle ouverte et incluant les puits à colonne permanente, les PAC d'eau de surface opérées en boucle ouverte ou fermée et les PAC couplées au sol opérées avec des échangeurs de chaleur fermés horizontaux et aménagés dans des tranchées, ainsi que les échangeurs à boucle fermée verticale qui sont aménagées dans des forages (Comeau et Raymond, 2020). Ce projet a été centré uniquement sur les PACG couplées au sol qui sont composées par des tuyaux en boucles fermées verticales aménagées dans des forages verticaux. Ce choix se justifie par le fait que 40% du budget de famille concerne la facture en chauffage et climatisation ; de plus, il existe un vaste marché mondial inexploité qui est en constante évolution pour des systèmes géothermiques car il y a la possibilité d'installer directement des PACG dans la fondation des constructions neuves ou des bâtiments en reconversion ou en rénovation majeure (CCEG, 2011; Comeau et Raymond, 2020; Hamm et al., 2021). Dans plusieurs pays, les PACG couplés au sol constituent

les systèmes les plus utilisés pour le chauffage et la climatisation dans le secteur commercial et pour une proportion de 25% dans le secteur résidentiel dont environ 40-60% ont servi pour le remplacement des systèmes utilisant traditionnellement les énergies fossiles (CCEG, 2011; Pishkariahmadabad et al., 2021; Javidan et al., 2022). De plus, cette technologie bénéficie fréquemment d'incitatifs gouvernementaux comme par exemples : les politiques stratégiques qui privilégient l'utilisation des énergies vertes, la mise en place des taxes de décarbonation, les mesures d'efficacité énergétique dans la construction des bâtiments et la réduction des îlots des chaleurs en milieu urbain, ainsi que les avantages fiscaux sur des projets des ECG. Ces incitatifs représentent un levier économique potentiel pour l'expansion de cette technologie, d'autant plus qu'il peut parfois avoir aussi des apports à partir des programmes municipaux (CCEG, 2011; ADEME, 2020). Malgré tous ces atouts ainsi qu'un intérêt croissant du consommateur, pour cette technologie, favorisé par l'accroissement des coûts des combustibles fossiles et de l'électricité, l'installation de chaque système de PACG nécessite encore des coûts élevés (Liu et al., 2013; Raymond et al., 2017; Franco et Conti, 2020). Ceux-ci ont été reconnus comme un facteur limitant la compétitivité de cette technologie sur le marché du chauffage et de la climatisation (Asl et al., 2015; Franco et Conti, 2020; Berg et al., 2019; Hamm et al., 2021). Ces coûts ont été directement reliés à la longueur adéquate des ECG nécessaires pour répondre aux besoins énergétiques du bâtiment en fonction des propriétés thermiques du sous-sol (Asl et al., 2015 ; Raymond, 2018; Berg et al., 2019; Kutzner et al., 2022). Pour évaluer cette longueur de la PACG, il faut réaliser des essais in situ afin d'évaluer les principales propriétés thermophysiques du sous-sol, qui sont: la conductivité thermique (CT), la diffusivité thermique (TD) et la capacité thermique (HC). L'état thermique du sous-sol doit aussi être déterminé par une évaluation de la température du sous-sol non perturbé (T_{UGT}) et des cycles thermiques liées au changement de température atmosphérique annuel en surface (Gehlin et Nordell, 2002 ; Liu et al., 2013 ; Gehlin et Spitler., 2015 ; Raymond, 2018 ; Berg et al., 2019 ; Giordano et al., 2021). L'évaluation de ces données est au centre de ce projet de recherche. Ce sont des données techniques inférées en réalisant des travaux dispendieux, à l'étape initial d'un projet de conception d'un système de PACG, qui comprennent entre autres (Gehlin et al., 2015 ; Ballard et al., 2019) :

- (1) l'aménagement d'un ECG pilote dans un forage (Figure 1.1), qui sert à évaluer les caractéristiques géologiques et mesurer le profil de température du sol non perturbé (Pahud, 2001 ; Gehlin et Nordell, 2002 ; Raymond et al., 2017 et Raymond et al., 2019);
- (2) le test de réponse thermique ou essai de réponse thermique (TRT ou ERT, Figure 1.1) qui permet d'évaluer la conductivité thermique du sous-sol et peut aussi être utilisé pour inférer la résistance thermique de l'ECG (Pahud, 2001; Kavanaugh, 2010 ; Ballard et al., 2019).

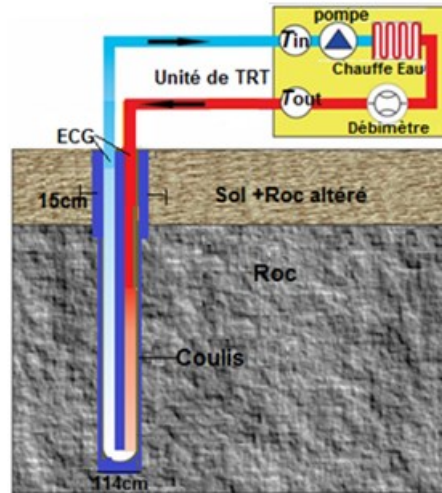


Figure 1.1 TRT conventionnel, par circulation de l'eau réchauffée dans un ECG Vertical.

Plusieurs travaux scientifiques et techniques ont donc été réalisés, à travers le Monde, afin de proposer différents types de TRT pour faciliter le dimensionnement efficient des ECG (Franco et Conti, 2013; Gehlin et Spitler., 2015; Berg et al., 2019; Wilke et al., 2020,). Cependant le TRT par circulation de l'eau réchauffée ou TRT conventionnel est l'essai le plus utilisé (Figure 1.1). L'analyse des résultats d'un TRT est couramment basée sur un transfert conductif, selon un modèle de sous-sol homogène et isotrope, sans considérer la présence ou l'absence de l'écoulement souterrain (Gehlin et Spitler., 2015 ; Raymond et al., 2017). Par conséquent, la variation verticale des propriétés thermophysiques (hétérogénéités) sur la longueur de l'ECG et le flux de l'écoulement souterrain dans un milieu poreux (couche ou fracture) ne sont pas considérés dans l'analyse (Gehlin et Spitler., 2015). Toutefois, de nombreux travaux récents ont permis d'observer qu'il existe une variation verticale de la CT liée directement à l'hétérogénéité des matériaux géologiques et la présence de l'écoulement souterrain (recoupés par les ECG dans des forages verticaux (Fujii, 2009; Fujii et al., 2009; Boban et al., 2018). Ces variations ont un impact significatif sur la longueur du forage et la performance à long terme des PACG (Bernier, 2001; Langlois, 2010; Zhang *et al.*, 2014; Luo et al., 2015 ; Jaziri et al., 2019; Robert et al., 2022). Par exemple, l'utilisation des profils de CT inférés par des TRT distribués (analyse selon un modèle de sous-sol hétérogène) avec des mesures de température par la fibre optique ou avec des chaines de sondes submersibles permet de réduire de plus de 20% la profondeur maximale des forages verticaux (Simon, 2016). Des résultats similaires ont été obtenus avec le TRT à câble chauffant qui utilise des mesures de température multi-niveaux (Simon, 2016 ; Márquez, 2019; Hakala et al., 2020 ; Giordano et la ., 2021). De même, il a pu être observé que la convection

naturelle (qui est liée à l'écoulement souterrain) ou forcée au voisinage de l'ECG engendrait un impact non négligeable sur l'évaluation de la CT et du coefficient de performance des PACG qui pouvait se traduire par une variation des valeurs de l'ordre de 9 à 30% (Liebel, 2012; Simon, 2016; Asl et al., 2018; Márquez et al., 2019).

Malgré des bons résultats, il a été observé que les TRT distribués avec des mesures de température par la fibre optique et les TRT multi-niveaux sont des opérations complexes et très peu de professionnels possèdent l'expertise nécessaire (Márquez, 2019; Giordano et al., 2021). Ces différentes limitations expliquent pourquoi ces types de TRT sont peu utilisés dans l'industrie (Gehlin et Spitler, 2015; Wilke et al., 2020).

Par conséquent, le but de cette thèse était de développer une nouvelle méthode d'analyse des données fournies par les profils de températures afin d'intégrer l'hétérogénéité verticale du sous-sol et l'écoulement souterrain dans les résultats de l'analyse du TRT conventionnel. En d'autres termes, l'idée dans ce projet était de développer des méthodes alternatives permettant d'inférer les profils de CT, d'évaluer propriétés thermophysiques des couches et le flux de l'écoulement souterrain sur la longueur totale de l'ECG (Fuji et al., 2009; Hakala et al., 2014). Pour parvenir à cette fin, les profils de température ont été mesurés dans l'ECG, en utilisant une sonde submersible de bonne résolution. Ceux-ci ont été considérés comme fournissant des données scientifiques fiables comparables à celles obtenues par des mesures avec la fibre optique. Ils ont été mesurés avant et après la réalisation du TRT conventionnel. Cette approche a été utilisée à cause du faible coût d'acquisition et de la facilité de réaliser les mesurer in situ dans le même processus courant du TRT conventionnel. Les profils de températures mesurés ont été combinés avec d'autres profils de température calculés analytiquement ou simulés numériquement afin de permettre le développement des différents outils qui constituent les composantes de la nouvelle méthode.

L'ensemble de l'œuvre de cette recherche doctorale a été conceptualisé et réalisé en mode projet d'ingénierie de construction d'une PACG composé d'échangeurs de chaleur (ECG) verticaux (respectant les directives de l'ASHRAE) dont le dimensionnement est réalisé à partir des résultats du TRT conventionnel basés sur la méthode d'analyse de la source linéique infinie (LSI). Dans ce cadre, le focus de ce projet a été de fournir un protocole simple et agile pour faciliter le transfert des résultats en termes d'outils technologiques et de compétence à l'industrie (géothermie de subsurface). Ce secteur, entre autres difficultés, fait face à une insuffisance en nombre d'experts géoscientifiques spécialisés (géologue, hydrogéologue, etc) qui peuvent aider à comprendre le sous-sol et la dynamique de ses composantes. Les résultats de ce projet sont destinés pour des

applications en géothermie, en géologie, en hydrogéologie et dans d'autres disciplines en géosciences. Ainsi, des références bibliographiques ont été mentionnées afin de pouvoir approfondir la recherche sur certains aspects qui n'ont pas été détaillés dans ce manuscrit.

Par souci de simplification, les processus de transport thermique qui entourent l'écoulement (advection, diffusion, convection) et son impact sur l'évaluation de la conductivité thermique ont été tous regroupés et évalués sous le paramètre flux effective de Darcy (Huber et al., 2015), qui a été utilisé à cet effet dans les chapitres 2 et 4. L'impact induit par le changement de phase de l'eau et de la direction de circulation de l'aquifère a été considéré comme négligeable, dans cette étude. Pour la structuration et les équations, les chapitres 2, 3 et 4 présentent chaque problématique spécifique telle que l'industrie l'aborde.

Il est donc espéré qu'une utilisation régulière de ces nouvelles approches permettra d'améliorer l'analyse du TRT conventionnel et facilitera la compétitivité des PACG et son positionnement dans le mixte énergétique et la transition énergétique (Gehlin et Spitler, 2015; Urchueguía et al., 2018; Comeau et Raymond, 2020).

1.2 Revue de littérature et limitations

L'évaluation in situ de l'état thermique et des propriétés thermophysiques du sous-sol occupe une place primordiale pour l'ingénieur chargé du dimensionnement des systèmes de PACG (Banks, 2008; Gehlin et Spitler, 2015; Urchueguía et al., 2018). En effet, il doit utiliser ce résultat essentiel pour évaluer la longueur de forage requise pour adéquatement dimensionner un système de PACG couplé au sous-sol et pour apporter des approches de solutions sur sa performance durant son cycle de vie (Bernier, 2001; Banks, 2008; Gehlin et Spitler, 2015; Raymond, 2018). Dans ce cadre, la construction d'un ECG pilote et la réalisation d'un TRT constituent le minimum requis pour valider les résultats de la caractérisation géothermique du sous-sol (ASHRAE, 2003; Kavanaugh, 2010; Zhang et al., 2014; Mielke et al., 2017; Raymond, 2018; Urchueguía et al., 2018; Wilke et al., 2020; ADEME, 2020; Giordano et al., 2021). Cependant, le résultat de l'analyse du TRT conventionnel (telle que réalisée à date par l'industrie) présente des insuffisances dans la prise en compte de la lithologie, la fracturation et l'absence ou la présence de l'écoulement souterrain, lorsque comparé à la coupe du forage et les données hydrogéologiques et de la fracturation sur le site du projet de construction d'un système de PACG (Fujii et al., 2009; Gehlin et Spitler, 2015). Rappelons qu'en géotechnique, le sous-sol est considéré comme un système souterrain ayant une géométrie, des conditions frontières, des conditions initiales et une

dynamique fonctionnelle dans laquelle* les ouvrages sont destinés à s'intégrer durant leur cycle de vie. Cependant, dans le dimensionnement des PACG en géothermie de surface, le sous-sol a été considéré comme un milieu homogène isotrope (Gehlin et Spitler, 2015). Ainsi, il est apparu souvent difficile d'apporter des éléments de réponse en cas d'anomalies relevées sur les régimes de température et sur la performance des PACG; lesquelles réponses ne pouvant être obtenues que par une caractérisation adéquate du sous-sol, à l'échelle du site.

Compte tenu de tous ces enjeux, une revue de littérature succincte a été restituée ci-dessous afin de présenter, les différents paramètres liés aux ECG verticaux à une boucle fermée (ECG-1U) et le TRT conventionnel analysé selon la méthode de la ligne source infinie (LSI), conformément au protocole usuel utilisé dans l'industrie des PACG. Cette courte revue a été complétée par une analyse documentaire adaptée à l'objectif spécifique de chaque étape de ce projet, en y ajoutant quelques travaux parallèles qui peuvent être utiles pour améliorer la compréhension du TRT conventionnel et de la nouvelle méthode proposée dans cette thèse.

1.2.1 Aménagement des ECG

Plusieurs travaux scientifiques sur la conception des ECG et leurs configurations ont révélé des résultats encourageants rapportés dans la littérature (Raymond, 2018 ; Comeau et Raymond, 2020). Un ECG vertical est un forage équipé d'un dispositif de tuyaux d'exhaure spécifiques pour faciliter l'exploitation de l'énergie géothermique (Liu et al., 2013; Gustaffson, 2013; Asl et al., 2018; Ballard et al., 2019). Dans les PACG composés d'ECG conventionnels (Figure 1.1), un puits vertical de 80 à 150mètres (en moyenne) est creusé dans le sous-sol composé soit de roche sédimentaire ou soit de roches cristallines (métamorphique ou magmatiques). Au niveau de la tuyauterie (ou boucles fermées ou semi-fermées), deux types sont rencontrés : des ECG équipés de tuyaux en U (simple ou multiples) et des ECG à tuyaux coaxiaux. Ces tuyaux peuvent être maintenus par des centreurs ou non. L'autre distinction est sur la nature de matériaux de remplissage de l'espace annulaire : soit par un coulis ou soit par de l'eau.

Pour mieux comprendre les enjeux liés à la construction des ECG verticaux, ce projet de doctorat a démarré avec la gestion de la première phase d'installation et de mise en opération du site expérimental de l'INRS. Dans ce cadre, six (06) forages verticaux ont été creusés, dans lesquels ont été aménagés 2 ECG de conception améliorée et 4 puits d'observations (Raymond et al., 2017; Raymond et al., 2018; Ballard et al., 2019; Giordano et al., 2021). En se démarquant de l'ECG conventionnel, Raymond et al. (2017) ont installé un ECG à 1 tuyau en U (ECG-1U) de 150m de profondeur, sans centreurs dans un forage de 110 mm (4 pouces) de diamètre dont

l'espace annulaire a été rempli avec un coulis conventionnel (bentonite, gravier de silice). Ce type de construction a pour objectif de réduire la résistance thermique du forage, en comparaison avec le diamètre de 150 mm (6 pouces) communément utilisé en Amérique du Nord (Ballard et al., 2016). Le deuxième ouvrage est un ECG à 2 tuyaux, de 164m de profondeur, sans centreurs. Il a été aménagé dans un forage de 150 mm (6 pouces) de diamètre dont l'espace annulaire a été rempli d'eau. Ce type de construction est préconisé pour favoriser la convection naturelle, une construction non conventionnelle en Amérique du Nord (Raymond, 2018 ; Ballard et al., 2019). Ces ECG ont servi pour la validation in situ des résultats de cette thèse. Toutefois, les résultats desdits travaux n'ont pas été présentés exhaustivement dans cette thèse, qui a été centré uniquement sur le développement d'une nouvelle méthode d'analyse du TRT. Les analyses des profils de température du sous-sol ont été utilisées afin d'améliorer le résultat du TRT conventionnel, réalisé selon la méthode de la SLI.

Dans d'autres Pays, l'amélioration de la configuration des ECG a connu également des avancées significatives. Par exemple, l'utilisation des tuyaux enroulés en spirales plutôt qu'un simple U ou multiples (Liu et al., 2013). D'autres projets ont porté sur l'amélioration des matériaux de remplissage de l'espace annulaire des forages soient par des solides à conductivité thermique améliorée ou simplement de l'eau dans laquelle la convection naturelle est favorisée (Aslet al., 2017; Raymond, 2018; Ballard et al., 2019). L'utilisation des tuyaux améliorés, qui ont été enrichis de nanoparticules de carbone ou de graphite, a été également introduite et testée comme une approche innovante (Raymond, 2018; Ballard et al., 2019).

1.2.2 TRT conventionnel

Le TRT est un essai d'injection thermique qui peut être réalisé en mode injection ou en mode extraction de chaleur (Raymond, 2018). Le principe et le protocole de base ont été proposés et validés in situ par Mogensen (1983) ainsi que par Gehlin (1998) et Austin III (1998). Ces deux experts ont également développé les premières unités de TRT utilisées par l'industrie.

Après plusieurs années de pratique, de nombreux projets ont montré que les coûts des TRT sont à la fois liés aux équipements, à la complexité des protocoles d'essai in situ et aux méthodes d'analyses dont certaines nécessitent des expertises spécifiques pour mieux caractériser la conductivité thermique du sous-sol (Gehlin et Spitler, 2015 ; Raymond, 2018). Celle-ci constitue le paramètre ayant le plus d'influence sur l'évaluation de la longueur du forage et la performance des ECG (Banks, 2008; Zhang et al., 2014). Depuis 1998, plusieurs méthodes de terrain, des équipements pour réaliser le TRT et des approches d'analyses de données ont été développés

(Fujii et al., 2009; Acuña, 2012; Gustaffson, 2013; Gehlin et Spitler, 2015; Raymond, 2018; Hakala et al., 2020; Giordano et al., 2021; Li et al., 2022).

Par exemple, l'injection du taux de chaleur peut être réalisée en faisant circuler de l'eau réchauffée (TRT conventionnel, Raymond et al., 2017) ou en utilisant des câbles chauffants immergés dans la boucle (TRT câble chauffant, Márquez, 2019). Le mode par injection est le plus utilisé dans le TRT conventionnel. Cependant, le second nécessite moins de puissance électrique et elle est plus facile à déployer sur le terrain (Raymond, 2018 ; Márquez, 2019).

Pour les méthodes d'analyse de TRT, la différence fondamentale repose sur l'approche utilisée pour évaluer les paramètres de la solution gouvernante de l'échange de chaleur. On distingue deux approches : par solution analytique et par simulation numérique. Dans ce projet, seule la solution analytique a été utilisée aux chapitre 2 à 4.

Les méthodes numériques utilisent une approximation numérique afin d'approcher la solution de l'équation gouvernante (selon différentes dimensions 1D, 2D et 3D) avec l'avantage de pouvoir inclure plusieurs paramètres, à tester dans la simulation des solutions potentielles.

Les méthodes analytiques sont basées sur l'équation (1.1), comme solution pour le transfert de chaleur entre l'ECG et le sous-sol :

$$T_f - T_{UGT} \cong \frac{q}{k_i} g(t) \quad (1.1)$$

Dans laquelle, T_f est la température moyenne du fluide (généralement l'eau) en circulation dans les tuyaux de l'ECG ; T_{UGT} est la température du sol non perturbé ; q est le flux de chaleur injecté ou extrait du sous-sol ; k_i est la conductivité thermique du sous-sol qui est le paramètre principal à évaluer et $g(t)$ qui est la réponse géothermique du système sous-sol + ECG dans le temps.

Initialement, le calcul de la température du fluide était effectué par la différence divisée par 2 entre la valeur mesurée à l'entrée (T_{in}) versus à la sortie (T_{out}) de la boucle (Figure 1.1). Les mesures sont réalisées in situ en utilisant des sondes de température submersibles de bonne résolution, selon les critères définis par l'ASHRAE (Ballard et al., 2016) ou en utilisant la fibre optique (Fujii et al., 2009). Cependant les travaux de Pasquier et Marcotte (2009) ont révélé un biais dans les résultats du TRT conventionnels. Pour cela, ils ont proposé une méthode de correction afin de lever l'incertitude. Cette méthode de correction a été utilisée dans le chapitre 2 de ce projet.

L'évaluation de la température du sol non perturbé est réalisée suivant deux approches, décrites dans la section 1.2.3. Les autres méthodes récentes d'évaluation et l'incertitude sur sa valeur ont été traitées dans les chapitres 2 à 4.

Pour le flux de chaleur injecté, son évaluation a été présentée dans le chapitre 2. La température du fluide calculée précédemment et le débit de circulation de l'eau (maintenu constant par une pompe hydraulique et qui est lue sur le débitmètre) sont les deux paramètres prépondérants. L'incertitude sur sa valeur est liée à l'oscillation du courant triphasé utilisé comme source énergétique (Jacques, 2015 ; Ballard et al., 2016).

Quant à l'évaluation de la réponse géothermique ($g(t)$), les méthodes analytiques sont basées sur un transfert de chaleur uniquement par conduction, dans un sous-sol supposé homogène et isotrope. Trois méthodes principales ont été développées et validées, selon la géométrie de la source d'injection de chaleur ainsi que la relation de celle-ci par rapport à la paroi du forage/sous-sol avoisinant : la ligne source finie (LSF), la source linéique infinie (SLI) et la source cylindrique (LCI). Leurs principes divergent sur plusieurs points : (1) sur la caractéristique du flux de chaleur constant (radial sur un axe de longueur finie ou infinie versus une source cylindrique), (2) la complexité ou la simplicité de l'approche mathématique considérée (la LSI utilisent une solution mathématique du premier ordre ayant des approximations linéaires graphiques; la LSF utilise un modèle 2D axisymétrique semi-infini.; tandis que la LSC utilise une solution qui inclue les fonctions de Bessel de premier et second ordre dans l'intégration) ; (3) sur la prise en compte des effets axiaux (LSF) ou négligés (LSI et LCI en surface et en profondeur) et (4) la prise en compte ou pas du rayon du puits (diamètre négligeable pour la LSF). La comparaison montre que la LSI utilise des approches agiles et faciles à mettre en œuvre. Pour toutes ces raisons, elle est la plus utilisée dans l'industrie et sera plus approfondie dans ce manuscrit. Pour les autres méthodes, les thèses de Gehlin (2001), de Raymond (2010), de Acuña (2011) sont des excellents documents de référence pour approfondir sur le sujet.

Depuis 1998, la méthode de la SLI est le principal protocole d'essai in situ utilisé ou TRT conventionnel afin de mesurer la température du fluide à l'entrée (T_{in}) et à la sortie (T_{out}) de l'ECG (Figure 1.1) et pour l'analyse des données recueillies durant l'essai (Figure 1.2). La puissance électrique utilisée pour réchauffer l'eau est en général comprise entre 3000 et 9000 Watts. Celle-ci est fournie par un générateur électrique relié à un dispositif de chauffage de l'eau pour lequel des dispositions techniques doivent être prises afin de valider les résultats avec une incertitude acceptable (Kavanaugh, 2010; Raymond et al., 2017; Raymond, 2018; Abesser et al., 2020 ; Giordano et al., 2021). Par exemple, les conditions suivantes sont requises durant l'exécution du TRT:

- (1) maintenir constante la valeur du taux d'injection de chaleur (50 à 80W m^{-1}) durant toute la période d'injection,

(2) garantir une différence de température de 3 à 7 degrés pour une durée moyenne de 40 à 70 heures d'injection de chaleur via l'eau réchauffée qui circule en continue dans la boucle.

Pour l'analyse des données du TRT avec cette méthode reposant sur la SLI, la valeur moyenne de la température de l'eau à la sortie du tuyau et celle de l'eau à l'entrée du tuyau est rapporté dans un graphique en fonction du logarithme du temps pour toute la durée de l'essai (Figure 1.2).

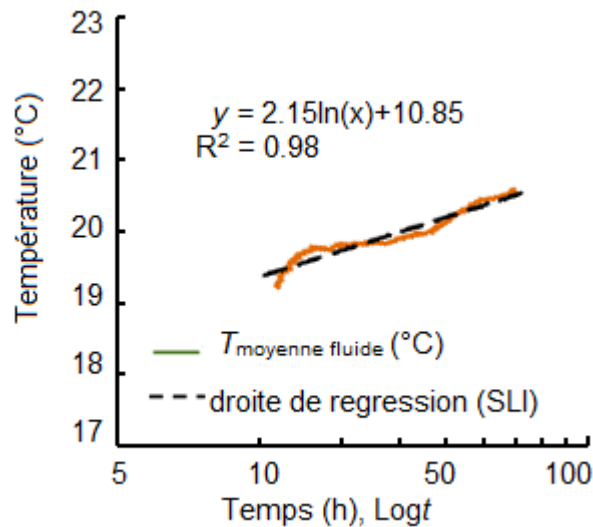


Figure 1.2 Analyse d'un TRT par la méthode de pente graphique.

Le graphique des points passant sur la portion de la courbe après 10 heures permet d'obtenir une droite de régression asymptotique de laquelle est déduite la pente graphique. Cette dernière est utilisée pour inférer la conductivité thermique effective de l'ECG à partir de l'équation de la SLI (Kavanaugh, 2010; Gehlin et Spitler, 2015; Raymond, 2018; Raymond et al., 2017). Cependant, cette valeur comporte une incertitude non négligeable liée au modèle conceptuel utilisé pour l'analyse du TRT en considérant un sous-sol homogène, sans écoulement souterrain; et, à la variation du taux d'injection de chaleur qui est calculé à partir du delta des températures de l'eau et de son débit de circulation dans l'ECG pilote (Gehlin et Spitler, 2015). Les travaux de Whitte (2008) et de Jacques (2015) ont présenté l'évaluation de l'impact de l'oscillation de l'intensité du courant électrique triphasé fourni par la génératrice sur l'analyse du TRT. Comme approche alternative, Gustaffson (2011) a proposé de coupler le TRT avec la foration du puits dans lequel sera installé l'ECG. Le taux d'injection de chaleur est directement déduit de l'énergie mécanique produite durant les opérations de forage. Bien qu'innovante comme approche, la mise en œuvre est complexe et nécessite une expertise de pointe, des équipements spécialisés et des dispositions techniques qui ne sont pas faciles à déployer.

L'auto-régulation du taux d'injection de chaleur, est une autre approche qui a également été testée in situ par Raymond et al. (2017), en utilisant le protocole développé par la société canadienne Energy Stat (Ballard et al., 2016). Le principe consiste à maintenir constant la valeur de la puissance thermique par le contrôle direct du delta de température et du débit de circulation de l'eau.

La prise en compte de la composante oscillatoire du courant électrique durant la phase d'injection du TRT (OTRT) a été également testée in situ par Giordano et al. (2021) ; mais l'analyse est réalisée selon un protocole mathématique complexe en comparaison avec la méthode de la LSI utilisée par l'industrie.

Plusieurs autres approches pour améliorer l'analyse du TRT conventionnel ont été également proposées afin de réduire l'incertitude sur les résultats obtenus. C'est ainsi que Pehme et al. (2007) ont proposé d'inférer la conductivité thermique du sol en appliquant le principe de superposition temporelle à l'équation de la SLI afin d'utiliser les données de température enregistrées durant la phase de restitution du TRT, étape au cours de laquelle l'injection de chaleur est arrêtée. Ces données de températures sont mesurées durant une période de circulation de fluide sans injection de chaleur. En considérant les similarités entre les équations gouvernantes de la transmission de chaleur et celle de l'hydraulique souterraine, Raymond et al. (2011a) et Raymond et al. (2011c) ont intégré dans l'analyse du TRT les mesures de température durant la période de restitution, comme cela est courant en hydrogéologie. L'analyse du TRT est réalisée par superposition des courbes considérant le principe de superposition temporelle. L'utilisation de cette approche permet de réduire significativement l'incertitude sur la valeur de la conductivité thermique effective car cette incertitude est principalement liée à la valeur moyenne du taux d'injection de chaleur durant le TRT (Witte, 2013; Sanner et al., 2013; Jacques, 2015 ; Zhang et al., 2014; Ballard et al., 2016). Ces deux approches améliorent les résultats d'analyse du TRT conventionnel; par contre le coût des opérations de terrain n'est pas réduit et la valeur de la conductivité thermique effective est toujours inférée en supposant un transfert thermique par conduction sans prendre en compte les hétérogénéités du sous-sol et l'écoulement souterrain. Par ailleurs, il faut au moins 72 heures de circulation d'eau supplémentaire afin de mesurer les températures du retour à l'équilibre thermique du sol. La continuité de cette étape sur le terrain nécessite la présence des équipements et du personnel, donc une durée double en comparaison avec le TRT conventionnel qui permet d'inférer la conductivité thermique uniquement en utilisant les données de température de la période de l'injection de chaleur dont la durée moyenne est de 40 à 72 heures (Gehlin et Spitler, 2015; Zhang, 2014; Ballard et al., 2016).

De son côté Piechowski (1996) a intégré dans la LSI le transfert de masse et de la chaleur dans le sous-sol qui est souvent lié à l'écoulement de l'eau souterraine. Cette approche a été le précurseur de la méthode de la source de chaleur linéaire qui se déplace dans l'espace (moving line source equation) qui est de plus en plus utilisée dans les essais d'injection de chaleur pour reproduire l'effet de l'écoulement de l'eau souterraine, permettant ainsi de considérer le transfert couplé conduction-advection (Klepikova et al., 2016; Pasquier et Lamarche, 2022).

Plus récemment, les travaux de Giordano et al.,(2021) ont permis de valider in situ la méthode du TRT oscillatoire (basée sur le principe proposé par Eskilson (1987) et les développements mathématiques de Oberdorfer (2014)) qui exploite les paramètres de l'onde thermique en diffusion dans le sous-sol, afin d'évaluer in-situ la résistance thermique.

Malgré tous ces développements, plusieurs défis et des limitations sont demeurés sans solutions faciles à déployer et à moindre coût pour l'industrie. La participation à la mise en œuvre des différents TRT réalisés sur le site de l'INRS a été l'occasion pour toucher du doigt à toutes ses limitations. Par conséquent ce projet de recherche a donc été mis en œuvre pour apporter une solution alternative sur les faiblesses des pratiques courantes de l'industrie.

1.2.3 Caractérisation de l'hétérogénéité et évaluation de l'écoulement souterrain

De nombreux résultats d'analyses du TRT conventionnel, ont révélé les limitations de l'hypothèse conceptuelle du sous-sol homogène à l'échelle du site, et le fait de considérer que l'impact de la présence de l'écoulement souterrain est négligeable sur l'évaluation de la conductivité thermique ou la CT (Gehlin et Spitler, 2015).

Pahud (2001) a observé une différence de valeur de CT entre deux ECG identiques construits dans le même site, à 30m l'un de l'autre. L'analyse des coupes de forage lui a permis de considérer que ces valeurs ne peuvent s'expliquer que par la présence d'une variation de la lithologie ou par la présence de l'écoulement souterrain autour de l'un de deux.

Gehlin (2002) dans sa thèse a montré également que la présence d'un réseau de fractures autour d'un ECG engendrait un effet thermosiphon qui se traduisait par un impact significatif sur la valeur de la CT et la performance d'un PACG à cause de l'advection et la convection liées au processus de transfert de chaleur entre l'ECG et le réseau de fractures dans le roc.

L'utilisation de la fibre optique pour mesurer la température lors des TRT par Fujii et al. (2006) et Fujii et al. (2009) a montré que l'impact de la variation de lithologie a été également observée sur

la distribution verticale des valeurs de conductivité thermique; conférant ainsi au sous-sol un modèle géothermique interprétatif de type hétérogène, en conformité avec la coupe de forage.

Par la simulation numérique basée sur un modèle de sous-sol composé de quatre (04) couches géologiques, ayant des propriétés thermophysiques différentes, Florides et al. (2013) ont montré une différence significative des températures de sortie et d'entrée de l'eau des tuyaux de l'ECG durant le TRT selon la variation de l'arrangement verticale des couches géologiques.

D'autres résultats ont montré que l'impact de l'hétérogénéité géologique peut être également liée à la présence des stratifications au sein d'une même lithologie qui se traduirait par une erreur minimale dans les valeurs de la conductivité thermique (2%), de la résistance thermique (plus de 10%) et de la diffusion du flux de chaleur durant le TRT (21% à 46% de réduction entre la première et la troisième couche) entre le modèle de sous-sol considéré homogène isotrope non stratifié versus le modèle homogène isotrope stratifié (Zhang et al., 2022).

Par ailleurs, ces différents milieux géologiques homogènes ou hétérogènes peuvent également contenir un écoulement souterrain dans une (ou plusieurs) couche (s) ou dans des fractures (drains hydrauliques) isolées ou interconnectées (Klepikova et al., 2016). Toutes ces variations verticales de distribution de contenu des couches et de stratification (ou hétérogénéité verticales du sous-sol) ou des fractures ou des milieux poreux sur le même site ont été retracées et caractérisées qualitativement et quantitativement en utilisant l'analyse des profils de températures mesurées dans des forages ou des puits (Klepikova, 2013; Hakala et al., 2014; Kang et al., 2014 ; Soldo et al., 2016; Sass et al., 2018 ; Hakala et al., 2021).

Tous ces résultats ont conforté l'utilisation des mesures distribuées, par la fibre optique ou par des mesures multi-niveaux, comme une approche fiable pour fournir un résultat d'analyse du TRT conventionnel avec des avantages suivants : (1) la disponibilité d'un profil conductivité représentatif de chaque couche/niveau traversé, en lieu et place d'une valeur de CT effective liée à un modèle de sous-sol homogène ; (2) une caractérisation détaillée du sous-sol marquée par l'identification des zones d'hétérogénéité du sous-sol (variation de lithologie, fracture drainante ou fermée, stratification ; (3) l'identification et l'évaluation de la présence de l'écoulement souterrain.

En effet, le principe de mesure d'un profil de température en utilisant la fibre optique est basé sur l'analyse spectroscopique de la distribution spatiale de l'effet Raman (rétrodiffusion de la lumière) induit par la propagation d'une impulsion laser de courte longueur d'onde (<10ns) le long de l'ensemble de la fibre optique. Cette impulsion est captée sur des thermomètres (résolution de

0.01°C) couplés à la fibre optique et qui sont disposés selon un pas de 0.2 à 0.30m sur toute la longueur considérée. La fibre optique est reliée à un équipement qui sert à la fois d'injecteur de pulses lasers et de décodeur pour analyser et inférer la température de chaque thermomètre à partir du rapport des intensités des lignes de Stokes et d'anti-Stokes. La distribution spatiale de la valeur mesurée est analysée selon la vitesse de propagation de la lumière enregistrée par chaque thermomètre de la fibre optique. Les mesures de température sont de ce fait réalisées en temps réel, permettant d'utiliser les résultats comme un marqueur du transfert thermique fiable pour visualiser la distribution des zones homogènes et hétérogènes dans le milieu étudié. Par exemple, cet avantage est très significatif pour évaluer l'impact de la variation du taux d'injection de chaleur dans l'ECG durant le TRT (Marcotte et Pasquier 2009 ; Pambou et al., 2019).

La bonne résolution des profils de température mesurés en utilisant la fibre optique a permis à plusieurs chercheurs d'utiliser cette technologie dans différents projets scientifiques notamment pour implémenter des essais d'injection de chaleur combinés au pompage de puits (thermal pull-push test, active heat method) en utilisant des câbles composites chauffant et des mesures de température avec la fibre optique (Pehme et al., 2013; Klepikova et al., 2016). Ces essais in situ ont permis d'évaluer les flux d'eau souterrains et la conductivité hydraulique puis d'imager les zones affectées par la convection et la distribution de l'hétérogénéité en termes de densité de fractures dans les roches cristallines, leur disposition et leur connectivité dans la masse rocheuse (Pehme et al. 2013 ; Read et al., 2013; Kang et al., 2014 ; Márquez, 2019; Klepikova et al., 2016). Ces types d'essais ont été analysés avec la méthode de la source linéaire qui se déplace dans l'espace (moving line source equation) afin de reproduire l'effet de l'écoulement souterrain. Bien que complexe, ces types d'essais qui se font dans un contexte différent du TRT conventionnel et surtout en mode pompage entre puits peut aider à comprendre l'impact de l'écoulement hydrauliques des principales zones de fracturation et leur possible connectivité (Pehme et al., 2007; Pehme et al. 2013; Klepikova, 2013; Kang et al., 2014; Bense et al., 2016).

Par contre, le coût des équipements, la complexité de la méthode dans le protocole de terrain et le manque d'expertise au plan local limitent la valeur ajoutée de ces innovations, surtout pour des projets d'ECG de taille modeste.

En guise d'alternatives, Raymond et al. (2010) ont proposé la méthode de TRT avec le câble chauffant continu associé à des mesures de température par des sondes de température submersibles positionnées à des profondeurs présélectionnées ou TRT multi-niveaux. Par la suite, Raymond et Lamarche (2014) ont proposé d'utiliser des sections de câbles chauffants qui réchauffent l'eau sur 1 m pour chaque pas de longueur de 10 m. Les mesures de température

sont réalisées en utilisant des sondes submersibles et plus récemment en utilisant la fibre optique (Márquez, 2018; Zhang, 2014; Hakala et al., 2022). L'avantage du TRT avec le câble chauffant est son implémentation facile sur le terrain et sa faible consommation de puissance énergétique, en moyenne de l'ordre de 800 à 1000 W, durant la phase d'injection de chaleur du TRT et sans apport de la puissance thermique de la pompe hydraulique. Elle est égale à zéro dès la mise en arrêt de l'équipement et durant toute la période de restitution. Cette approche réduit les coûts du TRT qui sont directement liée à l'utilisation de la génératrice électrique pour réchauffer l'eau dans les tuyaux de l'ECG. L'analyse des résultats se fait avec les données de température mesurées en utilisant les sondes submersibles durant les deux périodes du TRT. Ces sondes submersibles sont disposées sur la longueur de l'ECG à des profondeurs présélectionnées. Le résultat est présenté sous la forme d'un profil de conductivité thermique avec une distribution spatiale verticale dont la résolution est liée à l'espacement entre les sondes submersibles de mesure de température (Simon, 2016; Márquez, 2019, Hakala et al., 2020; Giordano et al., 2021). Toutefois, les sections de câble chauffant génèrent de la convection naturelle qui bonifient la température avec des écarts pouvant aller à 2°C par rapport à la valeur de la température moyenne, en comparaison avec les résultats du TRT conventionnel (Simon, 2016; Márquez, 2019). Cette convection a un impact direct sur la valeur de la conductivité thermique qui pourrait dans certain cas se traduire par des différences pouvant atteindre plus de 15% au-dessus de la valeur observée en comparant avec celle du protocole standard de TRT et il faut alors appliquer une correction a l'analyse effectuée (Márquez, 2019).

Plus récemment, Raymond et al. (2016) ont montré (en utilisant la modélisation numérique) que les profils de température mesurés en continu avec des sondes submersibles de température attachées à un câble gradué, présentaient une résolution acceptable pour l'évaluation de la conductivité thermique dans les autres ECG du même site lorsque le flux de chaleur terrestre est connu. Ces mesures de températures ont été réalisées à des coûts très bas comparativement à ceux mesurés avec la fibre optique (Rohner et al, 2005 ; Fujii et al., 2009; Ballard et al.,2016; Márquez et al., 2018). L'analyse des résultats a été réalisée en superposant les profils de température observés sur le terrain avec les profils de température simulés par la modélisation numérique, en considérant le flux de chaleur inféré à partir des résultats du TRT conventionnel sur l'ECG pilote, comme condition frontière basale. Tous ces résultats se traduisent par un impact sur la longueur de la PACG et sa performance à long terme. Toutefois, cette approche nécessite plus du temps pour mettre en place le modèle numérique adéquat pour chaque ECG. Par ailleurs, le déploiement de cette approche a été réalisé en considérant un modèle homogène qui ne

permet pas d'inclure les hétérogénéités et l'écoulement souterrain ; lesquels ont un impact sur la conductivité thermique mesurée par le TRT (Pahud, 2001, 2011a; Fujii et al., 2009).

Malgré ses avancées significatives, la réduction des coûts et la complexité des méthodes liées aux TRT sont demeurées des préoccupations importantes et d'actualité qui nécessitent d'être traités en priorité afin d'améliorer les coûts, la performance et la rentabilité des ECG (Liu et al., 2021). Par conséquent ce projet de recherche a été orienté uniquement sur le développement des méthodes d'analyses pour évaluer la distribution spatiale verticale de l'hétérogénéité du sous-sol et l'identification des zones affectées par l'écoulement de l'eau souterraine durant la réalisation du TRT conventionnel. Celles-ci seront basées sur l'utilisation des profils de température mesurés dans l'ECG.

1.2.4 Température du sol non-perturbé

Par hypothèse, la température du sol non-perturbé de la température qui reflète l'équilibre thermique du sous-sol et qui ne varie pas au cours de l'année malgré les fluctuations thermiques à la surface du sol (Cui et al., 2011). L'importance de la température du sous-sol non perturbée (T_{UGT}) comme donnée nécessaire pour la conception des ECG apparaît dans l'équation (1.2) recommandée par l'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE, 2003a) et qui est couramment utilisée pour l'évaluation de la longueur du système de la PACG. Elle est basée sur les travaux de Bernier (2000) et s'écrit :

$$L \cong \frac{q_h R_b + q_a R_a + q_m R_m + q_h R_h}{(T_{UGT} + T_p) - 0.5 T_f} \quad (1.2)$$

où L (m) est la longueur totale de l'ECG. Les paramètres $q_{(a,m,h)}$ représentent respectivement les charges thermiques transmises au sol pour une période moyenne annuelle, mensuelle du mois de conception de l'ECG et horaire de pointe. Les $R_{(a,m,h)}$ sont respectivement les résistances thermiques au sol pour une période annuelle (10 ans), mensuelle (6 mois) et horaire (6 h). La résistance équivalente de l'ECG, R_b est liée à la conductivité thermique du sous-sol. Les $T_{(UGT,p,f)}$ sont les températures du sol non-perturbé, la température de pénalité du système et la température du fluide.

L'analyse de cette équation révèle que L est inversement proportionnelle à la valeur de T_{UGT} :

- (1) Une surestimation de la température du sol non-perturbé se traduit par une petite longueur du système géothermique. Ce sous-dimensionnement induit une surconsommation électrique et une faible performance du système de PACG. Dans le sous-sol, il y a également un

épuisement rapide de la ressource avec pour conséquence le risque du gel au sous-sol autour des installations ainsi que des affaissements possibles du sous-sol.

(2) à l'inverse une sous-estimation de T_{UGT} se traduit par une L élevée, une PACG surdimensionnée et donc des coûts à l'investissement importants.

Dans les deux cas ci-dessus mentionnés, il a été observé que la valeur de T_{UGT} a une corrélation directe avec l'efficacité de l'ECG et sa rentabilité; d'où la nécessité d'un protocole adéquat pour évaluer quantitativement sa valeur avec exactitude.

Initialement, Hellström (1991) avait proposé de considérer T_{UGT} égale à la moyenne annuelle de la température ambiante (T_{amb}). Considérant cette approche, Signorelli et Kohl (2004) ont proposé d'ajouter 1,5 °C à la moyenne annuelle de la température atmosphérique. Ces deux approches n'ont pas été soutenues par les observations de terrain ; et, ne sont pas en adéquation avec à la définition de ce paramètre (Cui et al., 2011).

Récemment, en se basant sur le principe de la conservation de la masse et de l'énergie, Badache et al. (2016) ont proposé une nouvelle corrélation empirique entre la température moyenne annuelle ambiante et T_{UGT} . Cette approche est facile d'utilisation lorsque comparée aux deux méthodes conventionnelles basées sur les mesures in situ. Cependant, cet avantage apparaît marginal lorsqu'on considère que le résultat est plus élevé dans plusieurs sites avec un ordre de grandeur de 2 °C de différence comparée aux mesures in situ. Étant donné que ces approches sont basées sur la valeur moyenne de la température ambiante, qui est soit régionale ou locale, cette approche ne permet pas d'évaluer la variation de T_{UGT} entre différents ECG du même site. Par ailleurs, l'analyse de la Figure 1.1 montre que l'approche empirique pourrait également conduire à une estimation avec une incertitude élevée puisque les perturbations thermiques de surface peuvent affecter le sous-sol jusqu'à 15-20 mètres de profondeur.

Avec l'introduction du TRT dans l'industrie, la valeur du T_{UGT} est fréquemment évaluée selon deux approches de mesures in situ (Gehlin, 2002; Gehlin et Nordell, 2003):

- (1) soit par la circulation de l'eau dans l'ECG sans injection de la chaleur au début du TRT,
- (2) ou à partir d'un profil de température mesuré directement dans le tuyau de l'ECG en utilisant une sonde de température submersible, descendue selon un pas régulier sur la profondeur totale de l'ECG pilote (Figure 1.1).

La deuxième approche a été jugée plus fiable parce que durant les mesures de température par la méthode de circulation de l'eau dans les tuyaux de l'ECG, la friction de la pompe (qui propulse

l'eau dans les tuyaux) génère un taux d'injection de chaleur de 200 à 500 Watts (Ballard et al., 2016; Ballard et al., 2018). Cette énergie non négligeable produit un delta de température qui se superpose à la valeur de la température du sol à l'équilibre et génère une incertitude dans les résultats de la température du sol non-perturbé et sur la longueur de l'ECG (Bernier, 2001; Langlois, 2010).

Pour minimiser l'incertitude sur la valeur évaluée avec le profil de température, quelques conditions doivent être respectées :

- (1) la température du sous-sol non perturbé (T_{UTG}) est évaluée en utilisant uniquement la moyenne arithmétique des valeurs de températures de la portion du profil de température non affectée par les variations saisonnières de la température à la surface du sol (Gehlin et Nordell, 2003; Cui et al., 2011, Ballard et al., 2016). L'identification de l'intervalle à considérer se fait graphiquement en considérant la tangente à la droite de projection du gradient géothermique sur la surface du sol (Raymond et al., 2016).
- (2) la T_{UTG} est évaluée en utilisant uniquement les valeurs de température mesurées durant la phase de descente de la sonde submersible car durant la remontée de la sonde submersible la colonne d'eau dans le tuyau est affectée par le mouvement de la masse d'eau déplacée pour ramener la sonde vers la surface.
- (3) la résolution de la sonde de température doit satisfaire aux critères de l'ASHRAE qui encadrent la sélection de la sonde de température lors des TRT qui est minimalement de 0.01°C (Ballard et al., 2016).

D'autres approches récentes sont apparues, par exemple l'utilisation de la fibre optique pour la mesure de la température dans les ECG lors des TRT, avec une résolution spatiale des mesures de 0.25 m (Fujii et al., 2006). Celle-ci a permis d'obtenir une bonne résolution spatiale tout en minimisant le temps de mesurage (Fujii et al., 2006; Beier et al., 2012). Toutefois, le coût et l'expertise à mobiliser ne sont toutefois pas favorables pour les projets de taille modeste. Une alternative a été proposée qui consiste à utiliser des sondes submersibles de mesure de température avec une fréquence de mesure de 0.50 à 5m (Rohner et al., 2005; Martos et al., 2011; Gehlin et Splitler, 2015). Cette fréquence de mesure permet également d'identifier facilement les variations de température causées par la présence de l'écoulement d'eau souterraine (Ballard et al., 2016; Martos et al., 2011; Saar et al., 2016; Raymond et al., 2017). Toutefois, les travaux de Raymond et al. (2016) ont montré que l'introduction d'une sonde submersible dans le tuyau de l'ECG engendrait une remontée du niveau d'eau à cause du

changement de volume introduit par la présence du câble et de la sonde submersible. Ce changement de volume affecte la valeur du gradient thermique, notamment la corrélation adéquate de la température observée par rapport à sa profondeur de mesure. Une équation empirique de correction a été proposée mais celle-ci n'avait pas fait l'objet de vérification et de validation par des mesures in situ dans un ECG vertical à boucle fermée. La première étape des travaux réalisés in situ, dans le cadre de cette thèse, a été de s'assurer que la sonde submersible RBR sélectionnée puisse permettre de collecter des données présentant une incertitude acceptable, selon le pas de mesure sélectionnée adéquatement afin de permettre une gestion efficace et facile des données collectées in situ et leur traitement à partir d'un ordinateur ordinaire. Tous les différents protocoles de collecte de données, de validation de la méthode de correction et d'analyses des profils de température ont été pris en compte dans le premier objectif spécifique de ce projet de recherche. Les solutions proposées, ont été présentées dans l'article 1, qui constitue le chapitre 2 de cette thèse.

1.2.5 Capacité thermique et diffusivité thermique du sous-sol

Ces deux paramètres représentent, respectivement l'emmagasinement ou la capacité de stockage ainsi que l'habilité à diffuser la chaleur dans les matériaux géologiques. Le dernier est le ratio de la conductivité thermique divisée par la capacité thermique volumique. La valeur de la diffusivité thermique est utilisée dans la méthode de la source linéique infinie comme paramètre principal dans l'évaluation du nombre de Fourier qui permet de valider l'analyse du TRT (Gehlin et Spitler, 2015; Ballard et al., 2016). La capacité thermique est quant à elle utilisée dans les projets de stockage de l'énergie dans le sous-sol, considéré comme un réservoir souterrain important. Lors de l'analyse des TRT, une pratique courante consiste à déduire arbitrairement les valeurs de la capacité thermique à partir des tables de référence sur la base de la lithologie recoupée par l'ECG afin de minimiser le coût des analyses en laboratoire (Raymond et al., 2017; Waples and Wapples, 2004; Oberdorfer, 2014; Raymond, 2018). Pour évaluer la diffusivité thermique, la pratique courante est d'utiliser profils de température mesurés in situ dans des forages peu profonds et des puits superficiels, en général de moins de 10 m de profondeur, pour minimiser les coûts (Kusuda et Achenbach, 1965; Adams et al., 1976; Horton et al., 1983; Gwadera et al., 2017). Cependant, ces résultats sont affectés par des variations thermiques de surface qui affectent la qualité des données. Une des solutions consiste à réaliser des séries pluriannuelles de mesures de profils de température afin de quantifier et déduire les effets des variations thermiques journalières et saisonnières (Horton et al., 1983; Costello, 1986; Naranjo-

Mendoza et al., 2018). Cette disposition engendre des coûts à cause des délais associées aux séries répétitives des mesures sur le terrain. Récemment, Giordano et al. (2021) ont proposé une nouvelle approche de mesure in situ de la capacité thermique du sous-sol qui est basée sur les concepts du TRT oscillatoire (Oberdorfer, 2014). Toutefois, sa mise en œuvre reste complexe, dispendieuse et sa contribution est moindre pour la réduction des coûts des ECG.

A cet effet, le troisième objectif spécifique de cette thèse a permis de proposer une nouvelle méthode pour évaluer in situ la capacité thermique du sous-sol et la diffusivité thermique du sous-sol durant la réalisation d'un TRT. Le principe est basé sur la superposition graphique intégrée entre deux profils de températures mesuré versus simulé, comme solution de l'équation du transfert de chaleur (Raymond et al., 2011; Raymond et al. 2016). La superposition est réalisée itérativement en minimisant la somme des résidus au carré. Dans Raymond et al. (2011a), le graphique de la température du fluide circulant dans l'ECG durant le TRT est superposé avec celui qui est calculé avec l'équation de loi de Theiss, basée sur le principe des essais de pompage. Tandis que Raymond et al. (2016), réalise la superposition graphique entre les profils de température mesuré dans l'ECG à l'état d'équilibre (avant un TRT) versus simulé numériquement en combinant un solveur de modélisation inverse afin d'évaluer la conductivité thermique. Dans la nouvelle méthode, le même principe est appliqué afin de calculer la profondeur d'amortissement de l'onde thermique (ou damping) car ce paramètre est relié à la diffusivité thermique du sous-sol considéré comme homogène, selon les résultats de : Stallman (1965), Kusuda et Achenbach (1965), Adams et al. (1976), Hillel (1980), Costello (1986), Cui et al. (2011), Xing (2014), Tong et al. (2017). La valeur de la diffusivité thermique permet d'évaluer la capacité thermique en y associant la conductivité thermique inféré à partir du TRT. La théorie et le concept ainsi que les résultats de la validation in situ ont été présentés dans l'article 2, qui constitue le 3^e chapitre de cette thèse.

1.2.6 Profil de conductivité du sous-sol

Dans l'équation (1.2), la valeur de la conductivité thermique (CT) effective du sous-sol est prise en compte à travers la valeur de la résistance thermique du sol, qui a une corrélation directement proportionnelle à la longueur totale L de l'ECG. Celle-ci est exprimée sous la forme d'une valeur moyenne de la CT représentative de toutes les couches. Ainsi une incertitude dans son évaluation aura un impact significatif sur le dimensionnement, la performance et le retour à l'investissement d'un système de PACG (Langlois, 2010; Berg et al., 2019; Kutzner et al., 2022). Conséquemment,

plusieurs approches ont été mises en œuvre pour évaluer avec plus de précision la valeur de CT du sous-sol.

En première approche, lorsque l'incertitude sur la longueur de l'ECG ne constitue pas un enjeu important (système résidentiel de taille modeste), la CT a été fréquemment extrapolée à partir d'une carte contenant l'information géothermique (Perozzi et al., 2016). Cette première valeur déduite des informations documentaires peut également être extrapolée, à partir de la corrélation empirique entre les valeurs des lithologies similaires publiées dans les tables de référence disponible dans certains logiciels, en se basant sur la lithologie des roches décrite sur le log lithostratigraphique du forage ayant servi à l'aménagement de l'ECG pilote (Gehlin, 2002; Waples et Waples, 2004; Sanner, 2008). Cependant, la coupe de forage présente fréquemment une lithologie variable avec ou sans présence de la fracturation qui peut servir pour un écoulement d'eau ou avoir été rempli par un matériau différent (carbonate, silice, fer, etc) de son encaissant. La solution de la lithologie prépondérante devient alors arbitraire. Une autre approche peu dispendieuse est de mesurer la CT de chaque lithologie en utilisant une sonde à aiguille soit sur un échantillon prélevé sur un affleurement ayant un lien avec le site ou sur un échantillon provenant de l'ECG (Raymond, 2018). Toutefois, ces deux approches fournissent des résultats avec une grande incertitude liée à la représentativité des valeurs sur la longueur totale de l'ECG.

Les analyses en laboratoire des échantillons constituent également une alternative qui est fréquemment utilisée pour évaluer la CT avec une incertitude acceptable, dans les travaux scientifiques (Gehlin, 2002; Nicholson, 2014; Popov et al., 2016; Popov et al., 2017; Raymond et al., 2017; Jaziri et al., 2019; Rajaobelison et al., 2022). Cependant, cette approche ne permet pas de résoudre la problématique de la représentativité qualitative et quantitative des données. Il a été observé, par exemple, que des mesures sur un échantillon analysé au laboratoire pouvaient être affectées par des biais lorsque comparées aux mesures in situ réalisées dans le contexte naturel impliquant différentes interactions entre les processus physiques dans le sous-sol au voisinage de l'ECG (Simon, 2016). Par exemple, Gehlin (2002) a rapporté des écarts entre la valeur mesurée en laboratoire et celle évaluée en utilisant un TRT. Le TRT conventionnel est donc vite apparue comme la seule approche fiable pour l'évaluation de la CT du sous-sol puisque les mesures sont directement réalisées sur le site du projet (Gehlin, 2002; Fujii et al., 2009; Gehlin et Spitler, 2015; Raymond et al., 2017). Le principe consiste à perturber l'équilibre thermique du sous-sol en y injectant ou en y soutirant de la chaleur de façon à générer une variation de température qui permettra d'inférer la conductivité thermique en utilisant les données de température mesurées lors de l'essai. Cependant, cette opération nécessite une consommation

énergétique importante pour l'injection ou l'extraction de chaleur et un déploiement d'équipement qui engendrent un coût supplémentaire. Pour cela, un seul TRT est généralement réalisé par site à cause des coûts pour effectuer plusieurs TRT dont l'analyse qui faciliterait l'évaluation de l'impact de l'hétérogénéité verticale (présence de variation de lithologie, fracturation) et de l'écoulement souterrain dans les couches géologiques traversées par le forage. La problématique de l'impact de la distribution spatiale verticale de la lithologie et de l'impact de la fracturation (qui sert de drain de l'écoulement) dans le transfert hydraulique, thermique et de masse, a toujours été au cœur du débat dans les travaux de recherche en hydrogéologie (Klepikova et al., 2011; Pehme et al., 2013). Plus récemment, en utilisant le traçage thermique (suite à des essais d'injection dans les puits) avec des mesures au moyen de la fibre optique, il a été confirmé que les fractures sont des zones marquées par la variation de la perméabilité et de la conductivité hydraulique. Elles jouent un rôle important dans l'advection, la convection, la diffusion lors du transport de la chaleur (Read et al., 2013; Klepikova et al., 2016). La fibre optique malgré son coût et sa complexité est demeuré une technologie de premier choix pour évaluer la distribution spatiale verticale des paramètres clés du sous-sol. Néanmoins, des alternatives à l'utilisation de la fibre optique, réaliser un profil de conductivité thermique sur la longueur de l'ECG, Rohner et al. (2005) ont proposé d'utiliser le flux de chaleur terrestre pour évaluer la CT et le gradient géothermique, obtenu à partir du profil de température observé dans l'ECG. Cette approche a été vérifiée par Harrison et al., (2012). Cependant les données du flux de chaleur thermique disponibles ne couvrent qu'une infime portion des zones urbaines qui sont les sites potentiels où sont fréquemment réalisés des PACG. Cette limitation réduit ainsi le potentiel d'application de cette approche. Cette même limitation du flux de chaleur terrestre constitue une contrainte dans l'approche proposée par Raymond et al. (2016) pour inférer la CT du sous-sol par modélisation numérique inverse, en l'absence d'un TRT sur l'ECG pilote. En revanche, l'originalité de l'approche de Raymond et al. (2016) est dans sa contribution à réduire le nombre de TRT qu'il aurait fallu réaliser sur chaque ECG du futur système géothermique. La valeur de la conductivité thermique effective inférée par l'analyse d'un TRT de l'ECG et le profil de température mesuré par une sonde submersible sont utilisés pour calculer analytiquement le flux de chaleur terrestre (Márquez et al., 2019). Par la suite, connaissant le flux de chaleur terrestre (valeur qui varie très peu à l'échelle du site), le profil de température mesuré à l'équilibre dans chaque ECG est reproduit numériquement afin d'inférer implicitement la conductivité thermique du sous-sol. Cependant, toutes les solutions ci-dessus citées ont été développées avec l'hypothèse de modèle de sous-sol homogène. La présence de l'écoulement souterrain et l'hétérogénéité dans la distribution verticale des matériaux géologiques recoupés par l'ECG ne sont pas prises en compte

(Banks, 2008; Zhang, 2014). Des nouvelles approches de TRT innovants ont donc été développés pour cartographier la distribution spatiale verticale des propriétés thermiques du sous-sol et l'écoulement souterrain sur la toute la profondeur de l'ECG (Soldo et al., 2016; Sass et al., 2018) ou dans des puits d'observations (Klepikova, 2013). Pour l'analyse des TRT, le résultat est souvent présenté sous forme d'un profil de conductivité thermique ou de conductivité hydraulique, soit en continu lorsque les mesures de températures sont réalisées avec la fibre optique ou des sondes submersibles munies d'enregistreur automatisés (Fujii et al., 2009; Matos et al., 2011; Klepikova, 2013; Hakala et al., 2014; Márquez et al., 2018) ou soit sous forme de profil multiniveaux composés des valeurs ponctuelles de la CT lorsque les températures sont mesurées avec des sondes submersibles positionnées à certaines profondeurs spécifiées selon le pas de mesure (Simon, 2016; Márquez, 2019). Les résultats obtenus peuvent être utilisés dans plusieurs applications. Par exemple : optimiser le dimensionnement de la longueur de la PACG, en considérant des unités thermostratigraphiques ayant les CT plus élevées et de fournir le meilleur ratio de la longueur de PACG sur la surface totale d'emprise du système géothermique (Simon, 2016); identifier et caractériser les zones de fracturation dans le roc et des zones servant de drain hydraulique dans le roc ou dans les milieux poreux sédimentaires (Liebel, 2011; Zhang et al., 2011; Klepikova et al., 2011; Pehme et al., 2013 ; Read et al., 2013 ; Klepikova et al., 2016); identifier les niveaux affectés par le transfert de chaleur convectif (Klepikova et al., 2016; Márquez, 2019); fournir plus d'informations lithostratigraphiques autour de l'ECG (Hakala et al., 2014) et les analyses paléogéographiques (Beltrami et Mareschal, 1995; Chouinard, 2008; Cho et lahm, 2018).

En considérant les avantages apportés par l'analyse des profils de température de bonne résolution, le 1^e et le 3^e objectifs spécifiques ont été consacrés au développement des méthodes analytique et numérique. Celles-ci ont été utilisées pour évaluer un log thermostratigraphique distribué verticalement et 'inférer le profil de conductivité thermique du sous-sol en utilisant le profil de température observé dans l'ECG.

1.3 Problématique, hypothèse de travail et objectifs

1.3.1 Problématique

L'un des défis majeurs dans l'évaluation in situ de la longueur et du potentiel géothermique des PACG, est sa dépendance à la nature géologique du sous-sol et la prise en compte de

l'écoulement souterrain dans leur voisinage immédiat (Liebel, 2011 ; Klepikova et al., 2011; Huber et Arslan, 2012; Read et al., 2013; Gehlin et Spitler, 2015; Klepikova et al., 2016; Franco et Conti, 2020). En d'autres termes, il faut évaluer la distribution verticale de la température et les propriétés thermophysiques du sous-sol en fonction de la profondeur, suite à une étude technique préliminaire afin d'évaluer la longueur de la PACG, en garantissant une incertitude raisonnable (Kavanaugh, 2010). Pour cela, un forage est communément réalisé afin d'aménager un ECG pilote. Un essai in situ (TRT) est par la suite effectué dans cet ECG pilote afin d'évaluer les propriétés thermophysiques du sous-sol recoupé par l'ECG (Raymond et al., 2017). En d'autres termes, un client doit payer les coûts d'un ECG pilote et d'un TRT sans même savoir si le sous-sol est propice à l'aménagement d'un système de PACG. Cette phase d'étude technique préliminaire engendre un coût supplémentaire pour l'investissement initial. Ce dernier affecte le ratio de l'analyse coûts-avantages et le nombre d'années pour le retour sur investissement (Berg et al., 2019; Kutzner et al., 2022). Au plan technique et scientifique, une hypothèse simplificatrice a été unanimement établie pour faciliter l'analyse du TRT conventionnel (Gehlin et Spitler, 2015; Kavanaugh, 2016; Raymond et al., 2017; Raymond, 2018). Celle-ci considère le sous-sol comme un milieu homogène, représenté par une valeur unique de la conductivité thermique du sous-sol (Gehlin et Spitler, 2015; Giordano et al., 2021). Cependant, l'analyse des coupes de forages identiques (de même profondeur, de même diamètre) réalisés dans le même site (à une distance de 30m de l'autre) a permis d'observer des variations verticales dans la composition géologique et hydrogéologique des couches de terrain traversées (Pahud, 2001; Gehlin, 2002; Hakala et al., 2014; Ballard et al., 2016; Hakala et al., 2022). Suite à l'installation des ECG identiques, les résultats d'analyses des TRT et des échantillons des déblais de forage en laboratoire dans ces mêmes sites ont confirmé des différences significatives de la conductivité thermique effective observée à l'échelle du site (Pahud, 2001; Gehlin, 2002; Jaziri et al., 2019; Robert et al., 2022). Ces différences de valeur de conductivité thermique effective ont été corrélées, soit à la présence des hétérogénéités dans la distribution verticale de la lithologie, ou soit à la présence de fractures dans le roc, ou à la présence de l'écoulement souterrain. En d'autres termes, l'évaluation de la longueur du système de PACG en considérant l'un ou l'autre ECG pilote, comme référence pour l'étude technique préliminaire, conduirait à une surestimation ou une sous-estimation. Plusieurs autres travaux ont confirmé l'impact des variations du milieu géologique et de l'écoulement d'eau souterraine sur la conception des PACG et de leur performance. Par exemple les travaux de Fujii et al.(2006 et 2009), Liebel et al. (2011), Sakata et al. (2017) et Jaziri et al. (2019) ont révélé une corrélation entre la présence de l'écoulement de l'eau souterraine et son impact sur la valeur de la conductivité thermique effective inférée lors d'un TRT. Ces résultats de terrain sont similaires

à ceux obtenus par Signorelli et al. (2007) à partir de la modélisation numérique 3D. De plus, Lee et Lam (2012) et Choi et al. (2013) ont montré, en utilisant la modélisation numérique 3D, que la présence d'hétérogénéités et de l'écoulement souterrain engendrait des variations dans la distribution spatiale verticale de la conductivité thermique du sous-sol. De leur côté, Robert et al. (2022) ont montré que la valeur de la conductivité thermique du roc (affectée par l'advection dans un puits à colonne permanent pouvait être plus de 200 fois plus élevée que celle inférée en considérant uniquement le transfert par conduction. Tout cela corrobore avec les résultats des TRT avec lecture de température par fibre optique ou des sondes submersibles qui ont permis d'observer l'existence d'hétérogénéité géologique et la présence de l'écoulement souterrain dans certaines couches traversées par des ECG (Fujii et al., 2006 et 2009; Soldo et al., 2016; Hakala et al., 2014; Ballard et al., 2016; Sakata et al., 2021). Ces hétérogénéités verticales ainsi que les variations de la CT effective observées dans les unités thermostratigraphiques d'un même ECG ou entre deux forages sont en corrélation soit avec ces hétérogénéités ou soit avec la présence de l'écoulement souterrain. Ces résultats ont révélé que le traçage thermique distribué durant le TRT (dans l'ECG pilote) constitue une approche alternative à la réalisation d'un TRT dans chaque ECG du système géothermique (Fujii et al., 2009; Gehlin et Spitler, 2015; Raymond, 2018; Sakata et al., 2021). Cependant, les mesures in situ avec la fibre optique et l'analyse mathématique associée sont complexes et nécessitent l'utilisation d'une expertise de haut niveau qui sont en bout de ligne des approches dispendieuses et qui ne rencontrent pas nécessairement l'objectif de réduire les coûts afin de favoriser le positionnement stratégique de cette énergie dans un marché compétitif (Lee et Lam, 2012; Huber et Arslan, 2012; Gehlin et Spitler, 2015; Raymond et al., 2017; Raymond, 2018; Abesser et al., 2021; Robert et al., 2022; Thibaut et al., 2022). Il est donc apparu nécessaire de proposer une nouvelle méthode basée sur un protocole unique simplifié et interactive. Celle-ci doit être capable d'intégrer les pratiques courantes de l'industrie utilisées pour l'acquisition et l'analyse des données du TRT conventionnel. En plus, les résultats obtenus doivent servir pour établir des données complémentaires pour des corrélations avec la lithologie, l'absence ou la présence de l'écoulement, l'absence ou la présence de la fracturation, tel que décrit dans le log du forage. Le tout devra être validé à la fois par les résultats du TRT conventionnel et par diverses autres mesures in situ.

1.3.2 Hypothèse de travail

Les résultats des travaux de Kusuda et Achenbach (1965), de Stallman (1965), de Taniguchi (1993), Klepikova et al. (2011), Read et al.(2013), Pehme et al(2013) et plus récemment ceux rapporté par Kurylyk et al. (2018) ont montré qu'il était possible d'évaluer des paramètres comme

la diffusivité thermique, la conductivité hydraulique et le flux de Darcy en utilisant les profils de température mesurés dans le sous-sol ou dans des puits lors des essais in situ d'injection de chaleur, de pompage d'essai ou de caractérisation de la propagation de l'onde thermique en diffusion dans le sol (Klépikova et al., 2016). Ces propriétés thermophysiques et hydrauliques ont un lien avec les valeurs de la conductivité thermique du sous-sol qui est inférée couramment à partir des profils mesurés dans un ECG en condition perturbé par un TRT. Bien plus, d'autres expertises ont montré que les profils de température mesurés dans l'ECG, avec une sonde submersible de haute résolution spatiale de l'ordre de 1m, sont des données fiables, relativement faciles et rapides à recueillir avant et après la réalisation d'un TRT dans un ECG pour évaluer la température du sous-sol non perturbé (Gehlin et Spitler, 2015; Ballard et al., 2016). Ces résultats ont renforcé notre hypothèse qu'il serait possible d'utiliser des profils de température, en condition non perturbée ou durant le processus de restitution thermique afin d'implémenter des nouvelles méthodes pouvant être intégrées à la pratique du TRT conventionnel en y intégrant l'analyse selon un modèle hétérogène du sous-sol avec ou sans écoulement souterrain, lors de la conception des systèmes de PACG (Raymond et al., 2016; Ballard et al., 2016; Raymond, 2018; Thibaut et al., 2022). Préalablement à leur utilisation, les profils de température observés doivent être corrigés de l'effet de variation du niveau de l'eau dans la colonne (tuyau) de l'ECG, conformément aux résultats des travaux menés par Raymond et al. (2016).

1.3.3 Objectifs

L'analyse de la problématique a révélé la nécessité de développer et de valider des nouvelles méthodes pour caractériser le sous-sol selon un modèle conceptuel hétérogène, en considérant ou pas la présence de l'écoulement souterrain. Cette approche de solution fixée comme objectif principal a été déclinée en trois objectifs spécifiques basés sur une méthodologie de terrain tirant profit des innovations qui intègrent les étapes de réalisation du TRT conventionnel, le contexte de la conception des systèmes de PACG, tout en valorisant les expertises existantes.

1.3.3.1 Objectif principal

L'objectif principal de ce projet était de développer et valider des méthodes de caractérisation de l'hétérogénéité du sous-sol et l'écoulement souterrain, en utilisant des profils de température mesurée de façon in situ dans un ECG à l'aide d'une sonde submersible de haute résolution. Dans deux autres applications, ceux-ci ont été combinés avec des profils de température calculés analytiquement et reproduits numériquement. Ce choix se justifie par le fait que les mesures de

température avec une sonde submersible font déjà partie des pratiques courantes dans le secteur (Gehlin et Nordell, 2003; Gehlin et Spitler, 2015; Raymond, 2018). Pour mettre en œuvre cet objectif principal, les profils de température mesurés en conditions non perturbées par un TRT ou après une perturbation thermique suite à un TRT (chapitre 2) ont été également combinés avec des profils de température calculés analytiquement (Chapitre 3) et simulés numériquement (Chapitre 4). L'analyse de ces profils de température a été utilisée, dans un premier temps, pour identifier et évaluer l'hétérogénéité verticale des matériaux géologiques traversés par un forage exploratoire. Dans une seconde application, ces données ont servi pour identifier les zones affectées par l'écoulement souterrain et à quantifier le flux de Darcy correspondant. Finalement, la troisième application a permis d'inférer les principaux paramètres thermophysiques du sous-sol qui sont nécessaires pour la conception des PACG.

1.3.3.2 Objectifs spécifiques

Trois objectifs spécifiques ont été définis afin de proposer des approches de solutions alternatives et opérationnelles, en adéquation avec l'objectif principal. Ceux-ci ont été définis comme suit :

- (1) développer des méthodes de terrain pour mesurer et corriger les profils de température dans un ECG à boucle fermée affectée par la remontée du niveau d'eau suite à l'immersion d'une sonde submersible attachée à un câble gradué. Les résultats de cet objectif ont été décrits dans le chapitre 2.
- (2) développer une approche in situ pour analyser les profils de température mesurés après la perturbation thermique induite par un TRT afin d'inférer un profil de conductivité thermique du sous-sol et caractériser l'écoulement souterrain. Une méthode analytique a été priorisée et les résultats ont été présentés dans le chapitre 2.
- (3) développer une approche pour analyser un profil de température non perturbé pour inférer plus d'informations sur le sous-sol à l'endroit d'un ECG, notamment: évaluer de de façon in situ la capacité thermique effective, la diffusivité thermique effective du sous-sol et inférer un log thermostratigraphique ou encore confirmer la présence de l'écoulement d'eau souterraine. A cet effet, des nouvelles approches empiriques (Chapitre 3) et numériques (Chapitre 4) ont été implémentées et validées suite à leur application in situ à un cas réel d'ECG.

1.4 Méthodologie

La démarche méthodologique pour réaliser ce projet a été basée sur une approche interactive qui combine l'analyse des données bibliographiques disponibles, l'acquisition des données in

situ, le développement des nouvelles méthodes en considérant les principaux points identifiés dans la problématique et les solutions proposées qui ont été déclinées dans les objectifs. La validation de cette démarche a été réalisée à partir de l'application à des cas réels. Les résultats de chaque étape ont été décrits dans les articles scientifiques et présentés dans les conférences (Figure 1.3).

Pour sa mise en œuvre in situ, ce projet a été réalisé dans les installations de l'institut national de la recherche scientifique (INRS). La collecte de données in situ et l'application à des cas réels ont été réalisées sur l'ECG à 1 tuyau, sans centreurs et avec un remplissage au coulis standard, construit sur le site expérimental de l'INRS à Sainte-Foy (Québec). Ces données ont été vérifiées et validées in situ par des résultats indépendants provenant du 2^e ECG et de ceux réalisés dans les puits d'observations. Les profils de température ont été mesurés méthodiquement, avec une résolution spatiale de 1 m, avec une sonde submersible de température de bonne exactitude attachée à un câble gradué. L'ordinateur portable a été équipé des logiciels adéquats pour la collecte des données, la saisie, le traitement et diverses autres tâches nécessaires pour ce projet de recherche. La modélisation numérique, avec le logiciel d'éléments finis COMSOL Multiphysics, a été effectuée en considérant la simulation des transferts de chaleur et de l'écoulement souterrain qui a été associé à un aquifère localisé dans des zones de fracture du roc, à l'échelle locale de l'ECG (chapitre 4).

Plus exhaustivement, la collecte des données, le développement des méthodes d'analyse, les résultats et leurs discussions pour chaque étape ont été décrits dans les chapitres 2,3 et 4 qui sont présentés sous la forme d'article scientifique. La publication des articles a été également précédée par des présentations à des conférences. Les chapitres 2 et 3 ont été publiés dans les journaux scientifiques, en version anglaise. Le chapitre 4 constitue l'article 3 qui a été soumis à une revue scientifique de langue française.

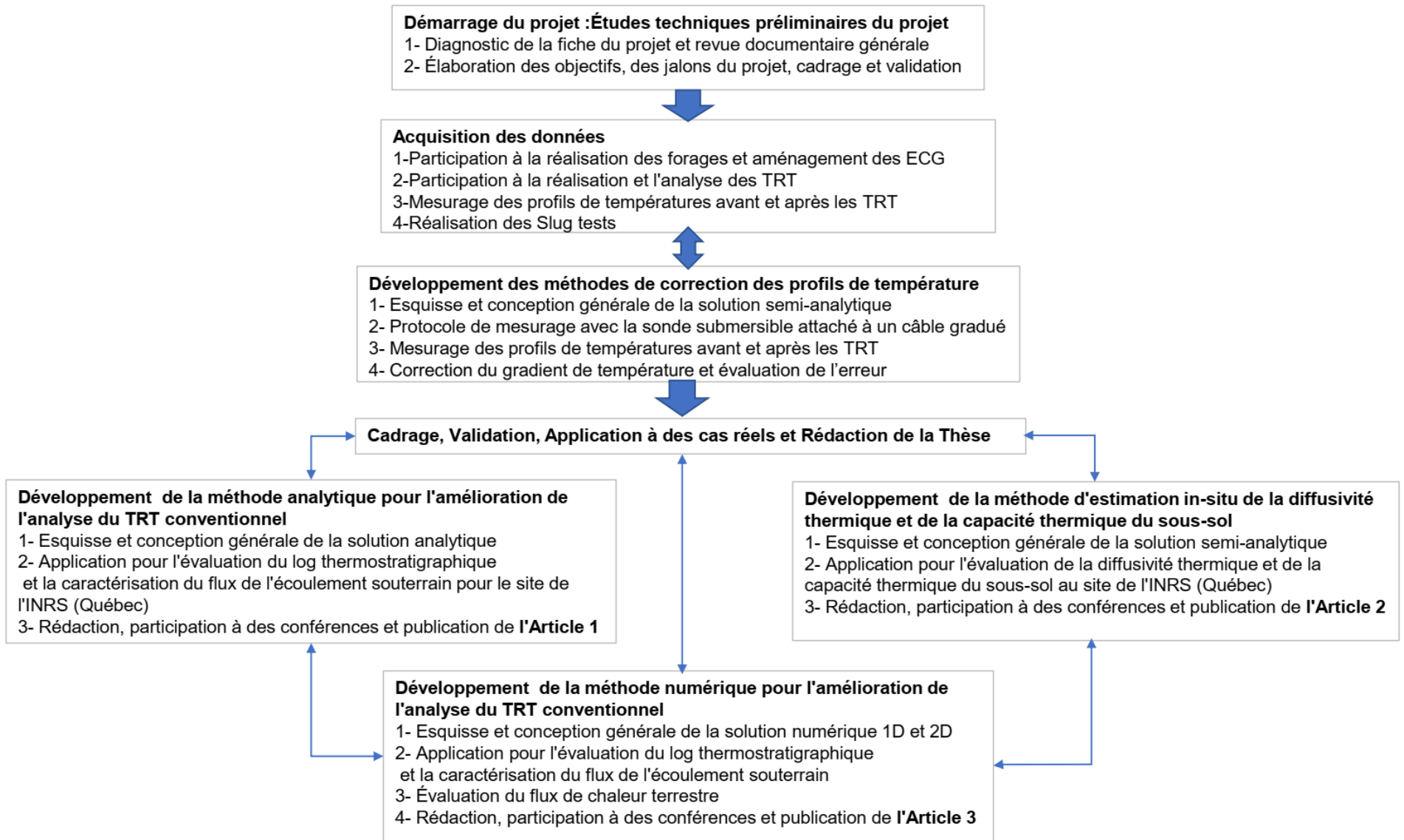


Figure 1.3 Principales étapes méthodologiques.

1.5 Structure de la thèse

Le manuscrit de cette thèse a été structuré en différentes parties, en considérant l'organisation générale d'une thèse par articles; qui sont :

✓ *Chapitre 1 : Introduction*

Dans ce chapitre il a été décrit le contexte du projet, suivi de la description des objectifs et de l'hypothèse de travail, la revue de littérature et la présentation des principales étapes de la méthodologie qui a été mise en œuvre.

✓ *Chapitre 2 : Amélioration des tests de réponse thermique avec mesure des profils de température avec une sonde sur câble pour évaluer un profil de conductivité thermique et les flux d'eau souterraine.*

La première partie de ce chapitre présente deux protocoles de terrain pour mesurer et corriger les profils de température mesurés (avec une sonde submersible attachée à un câble gradué) dans un ECG aménagé de façon verticale dans un forage. Ces méthodes ont été basées sur les travaux de Raymond et al. (2016). Elles ont été validées de façon in situ en utilisant des profils de température mesurés (à des profondeurs présélectionnées avec une sonde submersible) dans l'ECG pilote construit sur le site expérimental de l'INRS à Sainte-Foy (Ballard et al., 2016). La deuxième partie du chapitre 2 décrits deux cas pratiques d'utilisation des profils de température mesurés après l'aménagement de l'ECG et durant la phase de restitution du TRT conventionnel réalisé sur l'ECG. Le premier cas pratique a permis de : (1) évaluer la température du sous-sol à l'équilibre à partir des profils de température mesurées avant et après le TRT puis d'estimer le délai de retour à l'équilibre thermique du sous-sol après une perturbation mécanique (forage et installation de l'ECG) et thermique (à la suite TRT). Dans le deuxième cas, une méthode analytique innovante basée sur les concepts de Pehme et al. (2007), Hakala et al. (2014) et de Saas et al. (2013) a été développée et utilisée pour évaluer un profil de conductivité thermique du sous-sol, la distribution spatiale verticale du taux d'injection de chaleur injecté durant le TRT et les flux de Darcy dans les zones d'hétérogénéités identifiées. L'analyse comparative a montré que les résultats obtenus avec cette nouvelle approche sont similaires à ceux des autres travaux réalisés sur le même ECG, en utilisant d'autres méthodes comme le TRT avec câble chauffant associé à des mesures de la température avec la fibre optique (Márquez et al., 2018) ainsi que

le TRT conventionnel avec circulation de l'eau réchauffée (Raymond et al., 2017; Giordano et al., 2021) et le TRT oscillatoire (Giordano et al., 2021).

✓ *Chapitre 3 : Estimation in situ de la capacité thermique et de la diffusivité thermique effectives du sous-sol à partir du profil de température non perturbé mesuré dans un échangeur de chaleur géothermique.*

Cette section présente une nouvelle méthode semi-analytique qui a été développée pour inférer de façon in situ la diffusivité thermique (TD) et la capacité thermique (HC) effectives du sous-sol. Le principe consiste à recalculer, par des équations semi-analytiques, le profil de température mesuré à l'équilibre dans l'ECG pilote avant la réalisation du TRT. Les résultats obtenus à partir de cette méthode permettent de disposer d'une valeur de la TD et de la HT à l'échelle du site, au lieu d'utiliser une valeur choisie arbitrairement à partir de la littérature sur la base de la lithologie décrite dans le log lithostratigraphique du forage de l'ECG. Cette nouvelle méthode innovante a été validée par une analyse comparative avec les résultats de Giordano et al. (2021) sur l'ECG construit sur le site de l'INRS à Sainte-Foy (Québec).

En effet, Giordano et al. (2021) ont procédé à la réalisation de deux essais in situ pour évaluer la conductivité thermique et la capacité thermique volumique du sous-sol, sur le site expérimental de l'INRS (Québec). Durant le premier essai, la méthode de la double sonde verticale équidistante constante (proposé par Raymond, 2018) a été mise en œuvre pour évaluer la capacité thermique volumique de façon analogue aux essais réalisés en laboratoire. L'ECG -1U a servi pour injecter la chaleur et le puits d'observation (Obs4) construit à moins de 1.5 m. Ce dernier est utilisé pour enregistrer l'évolution de la température sous forme de profils mesurés avec des sondes submersibles disposées à des profondeurs présélectionnées (TRT câble chauffant). La comparaison des résultats avec la nouvelle méthode développée dans ce projet a montré une différence de 11% jusqu'à 22m. Dans le deuxième essai, la capacité thermique volumique a été évaluée de façon in situ par la méthode du TRT oscillatoire (OTRT) par circulation de l'eau réchauffée en utilisant le concept de Eskilson (1987) et Oberdorfer (2014). Le protocole consiste à reproduire une onde thermique en diffusion dans le sous-sol en procédant à une alternance répétitive de deux phases thermiques du TRT : la phase d'injection et la phase de restitution. La diffusivité thermique est alors évaluée par 2 approches : l'évaluation de la résistance et de la phase d'amortissement de la diffusion thermique. Les deux approches d'analyses ont fourni des résultats de diffusivité thermique avec une différence de plus de 20% de différence avec ceux du

premier essai et donc au moins 31% avec la nouvelle méthode. Tous ces résultats in situ ont été comparés sur le plan opérationnel (facilité de mise en œuvre, équipement, surcoût), sur la facilité de l'analyse des résultats (approche mathématique), la valeur inférée (et sur la possibilité du transfert technologique à l'industrie. La nouvelle approche proposée dans ce projet a montré plus de potentiel sur plusieurs de ces aspects qui ont été publiés dans l'article 2.

✓ *Chapitre 4 : Analyse numérique d'un log thermostratigraphique à partir d'un profil de température non perturbé mesuré dans un échangeur de chaleur géothermique.*

Dans ce chapitre, une nouvelle approche d'analyse numérique a été présentée. Le principe est basé sur les travaux de Raymond et al. (2016). Il consiste à recalculer numériquement le profil de température mesuré à l'équilibre dans l'ECG, avant le TRT. L'analyse avec la nouvelle approche a permis de mieux comprendre certains aspects importants du modèle conceptuel qui sont restés inexplorés ou explorés de manière succincte dans les études antérieures similaires. La modélisation numérique a été effectuée dans la première étape par des simulations 1D en mode transitoire, en considérant un transfert de chaleur par conduction; suivi d'une étape de simulation, 2D en régime permanent avec des transferts de chaleur par conduction et convection. Dans les deux étapes, le sous-sol a été considéré comme hétérogène. L'application de cette nouvelle méthode sur l'ECG aménagé sur le site de l'INRS (Sainte-Foy) a permis d'inférer le profil de CT, le flux de Darcy pour les zones fracturées et le flux de chaleur terrestre. Les résultats obtenus sont similaires à ceux des travaux de référence sur le même site et au niveau régional.

✓ *Le chapitre 5 : Discussion conclusions et perspectives.*

Cette section présente la synthèse des solutions proposées en considérant les différents points énoncés dans la problématique, l'hypothèse de travail et les objectifs. Les principales limitations liées aux résultats et des perspectives de développements futurs ont été aussi présentées et discutées.

Une section bibliographie a été présentée à la fin chapitre 5. Une section annexe a été placée à la fin du manuscrit afin de présenter quelques détails de l'approche méthodologique utilisée pour valider l'indépendance du maillage et les conditions frontières dans les modèles numériques développés.

Les aspects significatifs des différentes étapes qui ont mené à la réalisation de cette thèse, la portée technique et scientifique, la mise en œuvre, les résultats et la comparaisons avec des cas réels, les discussions et les limitations de chaque nouvelle solution ont été ci-dessous décrits aux chapitres suivants (2,3 et 4).

2 CHAPTER 2 : FIRST ARTICLE

Improving thermal response tests with wireline temperature logs to evaluate ground thermal conductivity profiles and groundwater fluxes.

Traduction française

Amélioration des tests de réponse thermique avec mesure des profils de température avec une sonde attaché à un câble pour évaluer un profil de conductivité thermique et les flux d'eau souterraine.

Auteurs :

ClaudeHugo **Koubikana Pambou**¹, Jasmin **Raymond**² and Louis **Lamarche**³

Affiliations professionnelles

^{1,2} INRS-Institut national de la recherche scientifique, 490 rue de la Couronne, Quebec City, QC, G1K 9A9, Canada.

³ ÉTS-École de Technologie Supérieure, 1120 rue Notre Dame Ouest, Montreal, QC, H3C 0J8, Canada.

Titre de la revue ou de l'ouvrage : Heat and Mass Transfer

14 Janvier 2019

DOI: 10.1007/s00231-018-2532-y

Contribution des auteurs

La première étape présente le processus de vérification et de validation in situ, du concept de correction du profil de température proposé par Raymond et al. (2016) mais qui n'avait pas encore été appliquée. Pour cela C.H.K Pambou a développé deux méthodes pour évaluer les principaux paramètres impliqués dans la correction du profil de température par rapport à la variation de la hauteur d'eau dans le tuyau de l'ECG suite à l'introduction de la sonde submersible. Dans la deuxième étape, C.H.K Pambou a développé et validé la méthode analytique pour évaluer le log thermostratigraphique en utilisant les profils de température observés durant la restitution du TRT. Toutes les méthodes ont été implémentées et validées en utilisant les données collectées in situ dans un ECG-1U et les puits d'observation. Tous ces travaux ont été réalisés sous la supervision

de J. Raymond et L. Lamarche, qui sont deux experts du domaine. La rédaction de l'article a été réalisée par les trois auteurs.

Nomenclature

<i>b</i> :	intercept of linear approximation (°C)
<i>c</i> :	specific heat capacity ($\text{J Kg}^{-3} \text{K}^{-1}$)
<i>C</i> :	volumetric heat capacity ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)
<i>D</i> :	depth (m)
<i>Fo</i> :	Fourier's number (-)
<i>g</i> :	gravitational acceleration constant (m s^{-2})
<i>L</i> :	length (m)
<i>m</i> :	slope of linear graphic approximation ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$)
<i>P</i> :	pressure ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$)
<i>Pe</i> :	Peclet Number (-)
<i>p</i> :	fitting parameter (-)
<i>Q</i> :	heat injection rate (W)
<i>q</i> :	heat injection rate per unit length of borehole (W m^{-1})
<i>Q'</i> :	fluid flow rate ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
<i>r</i> :	radius (m)
<i>R</i> :	thermal resistance (m K W^{-1})
<i>T</i> :	temperature (°C)
<i>t</i> :	time (s)
<i>u</i> :	integration variable (-)

V: *volume (m³)*
z: *depth (m)*

Greek symbol

α : thermal diffusivity ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
 λ : thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
 ρ : density (kg m^{-3})
 γ : Euler's constant (0. 5772)
 Δ : Increment
 ϑ : Darcy's flux (m s^{-1})

Subscript

adv: Advective
b: Borehole
c: Characteristic
cable: tagline used to lower the probe
conv: Convective
down: down-water circulation
i: current time step
i-1: previous time step
in: inlet pipe
0: initial or undisturbed ground temperature
off: end of heat injection
out: outlet pipe

p -average: fitting parameter to assume asymmetric
water temperature evolution in GHE

pipe: U-tube for water circulation into GHE

s: Subsurface

up: up-water circulation

w: Water

*: corrected

': Normalized

2.1 Introduction

Measuring the temperature inside ground heat exchangers (GHE) is an important task that can provide background information for the design of ground-coupled heat pump (GCHP) systems, as well as complex operational data that improves the understanding of subsurface heat transfer mechanisms (Duan et al., 2008). A temperature profile can initially be used to evaluate the undisturbed subsurface temperature when analyzing a thermal response test (TRT) in order to infer subsurface thermal conductivity and borehole thermal resistance (Loveridge et al., 2018; Gehlin et Spitler, 2015). These variables are needed to calculate the length of the GHEs in ground-coupled heat pump systems (Kavanaugh, 2010; Langlois, 2010). Two field methods are commonly used to measure undisturbed subsurface temperature (Gehlin et Nordell, 2003): (1) temperature logging along a borehole, and (2) measuring water temperature by fluid circulation without injecting heat into the GHE. The benefit of the first method is that it establishes a full temperature profile with an accurate estimate of subsurface temperature by manually lowering a temperature sensor in the water-filled U-pipe (Gehlin et Nordell, 2003; Gehlin, 2002). Recently, the use of distributed temperature sensing (DTS) with fiber optics made it possible to monitor downhole temperature during the TRT to evaluate subsurface thermal conductivity profiles and identify potential subsurface heterogeneities and groundwater flux effects (Fujii et al., 2006; Fujii et al., 2009; Sakata et al., 2017; Hakala et al., 2014). However, the instrument is complex and requires advance analysis, despite the fact that TRT studies with DTS have helped demonstrate why and when subsurface heterogeneity and groundwater flux should be considered in TRT analysis and GCHP design. As a consequence, alternative methods have emerged to measure and analyze temperature profiles in GHEs.

A submersible wireless temperature and pressure data logger was proposed by (Rohner et al., 2005) to improve the measurement of temperature profiles and geothermal gradients in a GHE. The probe sinks along the GHE pipe and is recovered by flushing water through the U-pipe. The temperature profile, undisturbed by a TRT and in equilibrium state with the subsurface, is analyzed to evaluate the depth variations in subsurface thermal conductivity. This method related on knowledges of the Earth's natural heat flow in the study area. (Martos et al., 2011) have developed a wireless sensor system that circulates in the GHE to measure the temperature of the fluid in the U-pipe during a TRT or GHE operation. This technology requires special valves to send and retrieve the temperature probe and data logger. Among others, (Raymond et al., 2015) developed an alternative approach using a heating cable with sufficient submersible temperature data loggers installed at depth to infer a subsurface thermal conductivity profile. All these alternatives are undoubtedly innovative but can be complicated to implement in the field when

compared to simple temperature profiling with a wired probe lowered in a GHE (Gehlin, 2002; Loveridge et al., 2011; Raymond et al., 2016; Kurevija et al., 2018). However, the immersion of a wired probe in the U-tube of a GHE triggers a rise in water level, which affects the corresponding depth calculation achieved using pressure measurements and introduces errors in the evaluation of the geothermal gradient and undisturbed ground temperature. Therefore, a method to correct for the water level rise was proposed by (Raymond et al., 2016) but never validated in the field. Measuring temperature profiles in GHEs after conducting a TRT to monitor the temperature recovery has also been shown to be useful in identifying fractured subsurface layers with significant groundwater flow (Pehme et al., 2007; Liebel, 2011; Pehme et al., 2013; Hakala et al., 2014; Sakata et al., 2017). Such analysis of wired temperature profiles recorded manually in GHEs has focused on qualitative approaches, yet a quantitative methodology still needs to be developed and validated to make full use of the additional data obtained with wired temperature logging in GHEs. The current study aims to fill this gap by evaluating the effect of water level rise when measuring temperature profiles in a GHE pipe and developing a quantitative methodology to analyze wired temperature profiles recorded after a TRT.

The objectives of our study were to: (1) evaluate the discrepancy in field methods to correct temperature profiles measured with a wired probe in a GHE, and (2) develop a comprehensive approach to TRT analysis using temperature profiles recorded with a wired probe manually lowered during the recovery period following the heat injection of a conventional TRT. Data analysis was based on a common analytical approach of linear heat source (Nusier et Abu-Hamdeh., 2003), making use of infinite line source (ILS) equations and the superposition principle (Rohner et al., 2005; Pehme et al., 2007; Pehme et al., 2007; Raymond et al., 2011b), but was adapted to the measurements achieved with submersible wired probe. Field measurements were carried out using a pilot GHE-1U pipe installed at the INRS field laboratory facilities in Québec City (Canada).

2.2 Geological Setting

The experimental site for field work enclosed three boreholes aligned north-south and spaced 10 m apart (Figure 1). A GHE was installed in the central borehole (154 m, deep) between the two observation wells (each 42 m deep). The pilot GHE consists of a single, vertical, high-density polyethylene U-pipe, without clips, having an external diameter of 42.2 mm. The borehole is backfilled with geothermal grout composed of water, bentonite and silica sand.

The geological description of the drill cuttings was used to establish the subsurface stratigraphy. From surface, up to 2 m of backfill material overlies 8 to 12 m of mixed till and pebbles, followed by clays over weathered bedrock composed of shale belonging to the Les Fonds Formation of the Sainte-Rosalie Group of the Saint-Lawrence Lowlands sedimentary basin (Globensky, 1987). Fracture zones were detected during borehole drilling with down-hole air hammer at depths of 20-25 m, 40-45 m, 95 m and 137 m (Figure 2.1).

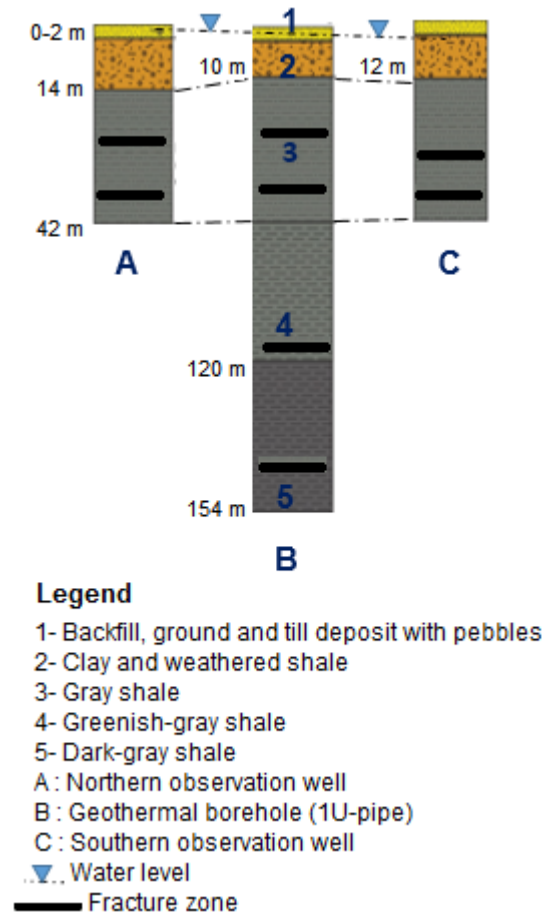


Figure 2.1 Stratigraphic log of the INRS experimental site.

The water level was measured at 2.40 m and 2.88 m below surface in the northern and southern observation wells, respectively, and slug tests revealed low hydraulic conductivity ranging from 1×10^{-5} to $1 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$. It took more than 7 days for groundwater to fill the northern observation well after drilling, demonstrating permeable fracture zones in shale with low flow conditions.

2.3 Methodology

The methodology involved three steps. First, field methods were developed to measure the temperature profile in a closed-loop GHE using a wired probe, including the validation of a depth correction method based on the concept of (Raymond et al., 2016). Second, field methods were applied to infer the time required for the subsurface to cool and return to the undisturbed subsurface temperature after borehole drilling, and to evaluate a thermal conductivity profile using repetitive temperature measurements taken during the recovery period after the heat injection period of the TRT. Third, the thermal conductivity profile was correlated to the geological log to complete the hydrothermostratigraphic assessment and locate intervals with groundwater flow for which Darcy's flux could be quantified.

2.4 Field Method Development

The depth correction methods were validated after collecting the data for two applications using temperature profiling method. Borehole drilling and the TRT experiment proceeded according to a fixed schedule due to field constraints, such that it took two months after the TRT to validate the temperature profiling methods. This timeframe was sufficient for the subsurface temperature to return to its initial pre-drilling/pre-TRT condition. Before discussing the two applications, this manuscript will examine how the temperature profiling methods were validated. It should be noted that only the first depth correction method was used for both applications because the second method was only developed and validated after conducting the TRT. However, both depth correction methods are presented below now, since they have been validated and shown to produce similar results. Moreover, there are several field advantages to the second method that should prove useful in further field work.

2.4.1 Depth Temperature Measurement

Temperature profiles presented in this manuscript were recorded with a RBR duet submersible data logger including a pressure transducer and temperature embedded thermistor. The accuracy and resolution provided by the manufacturer for the pressure and temperature sensors are $\pm 5 \times 10^{-4}$ and $< 1 \times 10^{-5}$ dbar and $\pm 2 \times 10^{-3}$ and $< 5 \times 10^{-5}$ °C, respectively. This probe was calibrated according to the International Temperature Scale of 1990 standard and the National Institute of Standards and Technology traceability standards during the manufacturer's annual maintenance service. The specified recording rate was one measurement per ten seconds. The probe was lowered in one side of the U-pipe at an approximate velocity of 7.5 to 12.5 cm s⁻¹, offering a

vertical resolution of approximately 1 m when measuring the temperature profile in a filled single U-pipe.

Two field procedures have been developed and validated for wired temperature measurement in a U-pipe, one with a cap that closes the U-pipe at one end and the other with no cap (Figure 2.2).

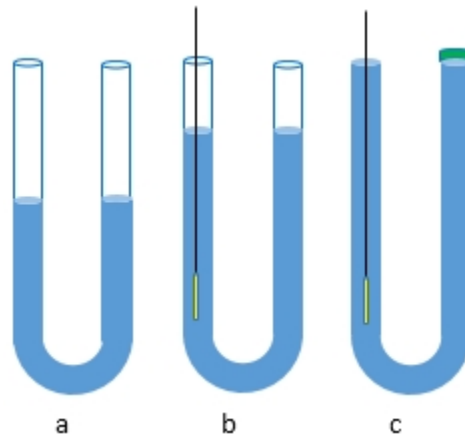


Figure 2.2 Implementation of the Depth correction methods in BHE 1U-pipe.

This Figure illustrates (a) the initial water level in a single U-pipe, which rises upon lowering a wired probe when the pipe is (b) uncapped and not full, or (c) capped and full.

The following steps apply to the first procedure in which the water level is below the uncapped pipe surface (Figure 2.2b).

- (1) The initial water level, which must be low enough that the water will not exit the U-pipe upon lowering the probe, is measured in the U-pipe with a water level meter;
- (2) The pressure-temperature probe is placed at the water interface for 10 to 20 min, which is considered enough time for the probe temperature to equilibrate with that of the water;
- (3) The pressure-temperature probe is then lowered at a constant rate until it reaches the bottom into the U-pipe;
- (4) The length of the cable inserted in the water column is measured with the probe at the bottom of the U-pipe using the graduations along the cable;
- (5) The rise in water level caused by the volume of the probe and cable is measured in the U-pipe with a water level meter.

The following steps apply to the second procedure in which one end of the U-pipe is capped (Figure 2.2c):

- (1) Water is added into the U-pipe the day before performing the measurements to ensure the pipe is filled and the temperature of the poured water equilibrates with that of the water inside the U-pipe;
- (2) The measurement procedure is the same as in the first case, except that there is no need to measure the initial and final water levels because the level remains the same during the measurement as excess water overflows at surface.

In both cases, the total time to perform the field measurements for a single temperature profile is on the order of 1 to 2 h, including approximately 25 min to lower the probe from the top to the bottom of the U-pipe.

2.4.2 Depth Correction

The rise in the water level of the U-pipe when lowering the probe has been described by (Raymond et al., 2016). This water level rise can affect the evaluation of temperature at the depth or the calculation of the temperature gradient. Therefore, the corrected depth can be calculated to obtain the appropriate temperature-depth relationship by subtracting the rise in the water column caused by the volume of the probe and cable according to the following equation based on the depth corrected concept from Raymond et al.(2016):

$$D^* = D - \left(\frac{V_{probe} + V_{cable}(D)}{2\pi r_{pipe}^2} \right) \quad (2.1)$$

where D^* (m) and D (m) are the corrected and measured depths, V (m^3) is the volume of the submersible probe, r_{pipe} (m) is the internal radius of the pipe, and $V_{cable}(D)$ is the volume corresponding to the depth D , which varies according to the cable length in the U-pipe at each depth measurement as the probe sinks inside the U-pipe.

Therefore, in this advanced field method implementation, the water pressure recorded with the submersible probe was used to evaluate the corrected depth D^* , by assuming that the observed depth D is given by:

$$D = \Delta P / \rho_w g \quad (2.2)$$

where ΔP ($kg\ m^{-1}\ s^{-2}$) is the relative pressure found by subtracting the reference pressure from the pressure at each measurement, ρ_{water} ($1000\ kg\ m^{-3}$) is the water density and g ($9.80665\ m\ s^{-2}$) is the gravitational acceleration constant.

Therefore, Equation 2.1 was rewritten as a function of pressure increments in the U-pipe:

$$D^*(\Delta P) = \frac{\Delta P}{\rho_w g} - \left(\frac{L_{probe} r_{probe}^2 + \frac{\Delta P}{\rho_w g} r_{cable}^2}{2r_{pipe}^2} \right) \quad (2.3)$$

Using relative pressure ΔP to calculate depth assumes that the atmospheric pressure remains constant during all measurements. In the event that atmospheric pressure changes during the measurement, a linear correction can be applied to the relative pressure corresponding to the depth measured manually at the end of the field procedure when the probe is at the bottom of the U-pipe. The reference pressure for the calculation of ΔP in the first procedure (uncapped U-pipe) is the pressure measured at the initial water interface before lowering the probe subtracted from the pressure causing the water level rise in the U-pipe (Figure 2.2b). In the second procedure (U-pipe capped at one end), the reference pressure is given directly by the pressure value recorded at the water interface because the water column keeps the same height and water above the probe is evacuated from the U-pipe as the probe sinks (Figure 2.2c).

2.5 Validation of Field Methods

The proposed depth correction methods were conceptually made to improve the field method proposed by Raymond et al. (2016). To verify accuracy, a quality control analysis was made using other procedures for temperature profiling. For example, the submersible probe was lowered at fixed position inside the U-pipe where it was kept for 6 to 24 h to record the temperature in U-pipe, which was assumed to have reached equilibrium state with the subsurface. The exact depth of the probe's position was measured using a graduated cable. Since these validation measurements started 20 days after the end of the heat injection of the TRT experiment, it was assumed that the subsurface temperature was no longer disturbed. Temperature data were collected at five constant depths (30, 60, 90, 120 and 150 m) and then compared to the corrected data from both temperature profiling methods to identify any discrepancies. This verification approach assumes that the temperature recorded for a long period of time at a fixed depth is the exact subsurface temperature, which was in fact confirmed by only subtle temperature oscillations of less than 0.01 °C over several hours. Other quality control analysis was made by comparing our data with these from fiber optic distributed temperature sensing measurements made by Márquez et al., (2018).

2.5.1 Temperature Profiling Applications

The first application of the temperature profiling method was to evaluate the time for the subsurface to cool down after U-pipe setup and to assess the undisturbed subsurface

temperature. Repetitive temperature profiles were recorded until the undisturbed subsurface temperature was reached. The second application was to infer a thermal conductivity profile using repetitive temperature profiles measured during the recovery period following the heat injection of a conventional TRT. After the power was turned off, the TRT unit was disconnected from the U-pipes before starting temperature measurements in the standing water column. No fluid was circulating in the U-pipe when monitoring the thermal recovery. The data was analyzed by plotting the cooling temperature as a function of logarithmic normalized time to infer thermal conductivity along the depth of the GHE (Fujii et al., 2006; Fujii et al., 2009; Pehme et al., 2013; Hakala et al., 2014; Kurevija et al., 2018).

2.5.2 Assessing the Undisturbed Subsurface Temperature

Drilling the borehole for the GHE took 26 h over three working days with no work at night. Friction caused by the drilling process increased the subsurface temperature and it is recommended to wait three to five days after drilling before performing a TRT to ensure the subsurface returns to its undisturbed temperature (ASHRAE, 2015; Kavanaugh, 2016). Repetitive temperature profiles were measured in one end of the U-pipe and processed using the first depth correction method to provide historical temperature profiles. The repetitive temperature measurements started 2 h after installing the GHE. The recorded temperature profiles were used to infer the time required to return to the undisturbed subsurface temperature.

Temperature profiles were recorded for 12 days after installing the GHE and it was assumed that the undisturbed temperature was reached once the average ground temperature deduced from the profile differed by less than 0.01°C from the average ground temperature of the preceding profile. The historical temperature profiles were also used to identify groundwater flow in layers around the GHE using the assumption that groundwater flux presence would cause more rapid cooling and therefore a faster return to the layer's initial temperature (Pehme et al., 2007; Liebel, 2011; Sakata et al., 2017; Hakala et al., 2017; Kavanaugh, 2016).

2.5.3 Assessing Subsurface Thermal Conductivity

The TRT performed for this study was a conventional water circulation test with additional recovery measurements using the wired probe. Water temperature was recorded every minute during the heat injection using two starmon-mini data loggers from Star Oddy having a sensor with an accuracy of ± 0.025 °C and a resolution of 0.001 °C. Three approaches based on the ILS equations were used to infer subsurface thermal conductivity. The inlet and outlet water

temperatures during the heat injection period were analyzed using the standard slope method for the first case (Gehlin, 2002; ASHRAE, 2015; Kavanaugh, 2016; Sakata et al., 2017). The curve fitting method with the temporal superposition principle was used for the second case (14). The third case related to the wired temperature profiles was performed using normalized slope method, which takes into account the temporal superposition principle applied to the thermal recovery period (Pehme et al., 2007; Pehme et al., 2013; Raymond et al., 2015).

The slope method used for the first case is a simplification of the ILS equations (ASHRAE, 2015; Kavanaugh, 2016) to calculate the temperature of the borehole wall and GHE water (Carslaw et Jaeger, 1959; Raymond et al., 2011a), as follows (Gehlin, 2002):

$$\Delta T_b = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2.4)$$

where

$$u = \frac{r_b^2}{4\alpha_s t} \quad (2.5)$$

and

$$\alpha_s = \frac{\lambda_s}{C_s} \quad (2.6)$$

such that

$$\overline{\Delta T_w} \cong \Delta T_b + qR_b \quad (2.7)$$

and

$$\overline{\Delta T_w} \cong \frac{q}{4\pi\lambda_s} (\ln(4Fo) - \gamma) + qR_b \quad (2.8)$$

when

$$Fo = \frac{\alpha_s t}{r_b^2} > 5 \quad (2.9)$$

In the above equations, ΔT_b ($^{\circ}\text{C}$) is the temperature increment at the borehole wall, $\overline{\Delta T_w}$ ($^{\circ}\text{C}$) is the mean water temperature increment in the GHE, q (W m^{-1}) is the heat injection rate per unit length of borehole, λ_s ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) is the thermal conductivity of the subsurface, C_s ($\text{J m}^{-3}\text{K}^{-1}$) is the volumetric heat capacity of the subsurface, r_b (m) is the borehole radius, α_s (m s^{-2}) is the thermal

diffusivity of the subsurface, u is an integration variable, Fo is Fourier's number used for the ILS criterion, γ (0.5772) is Euler's constant, and R_b (m K W^{-1}) is the borehole thermal resistance.

Equation 2.8 can be expressed in a linear form with respect to the natural logarithm of time to perform the slope method analysis:

$$\bar{T}_w \cong m \ln(t) + b \quad (2.10)$$

where

$$m = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \quad \text{and} \quad b = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \left(\ln \frac{4\alpha_s}{r_b^2} - \gamma \right) + qR_b + T_0 \quad (2.11)$$

such that

$$\lambda_s \cong \frac{q}{4\pi \times m} \quad (2.12)$$

and where T_0 (K) is the undisturbed ground temperature, m (K s^{-1}) is the slope of the regressive straight line, and b (K) is the intercept.

Bulk subsurface thermal conductivity was inferred with the slope method by plotting water temperature as function of logarithmic time and data recorded between 10 and 30 h after the start of the heat injection period. The data recorded before 10 h were not used in order to ensure that the Fourier number defined in Equation 2.9 exceeds the critical value of 5 (Raymond et al., 2011a; Kavanaugh, 2016). The data recorded after 30 h was discarded to satisfy the assumption of a constant heat injection rate for the slope analysis, since the heat injection rate per unit length changed by ~1% after 30 h of heat injection.

The temporal superposition principle was applied to Equation 8 for a second analysis with curve fitting methods, taking into account the 1% variation in the heat injection rate per unit length. Bulk subsurface thermal conductivity was inferred using the curve fitting method to reproduce the observed water temperature increments computed with equations 2.13 and 2.14 (ADEME, 2015; Gehlin et Spitler, 2015):

$$\Delta \bar{T}_w \cong \frac{1}{4\pi\lambda_s} \sum_{i=1}^n (q_i - q_{i-1}) (\ln(4Fo_i) - \gamma) + q_i R_b \quad (2.13)$$

where

$$Fo_1 = \frac{\alpha_s(t-t_i)}{r_b^2} \quad (2.14)$$

The match between observed and computed water temperature increments was achieved by minimizing the sum of least squares with a nonlinear solver (Raymond et al., 2011a,b).

The analysis performed with the slope and curve fitting methods for the conventional TRT all assumed radial heat transfer in a homogeneous and isotropic subsurface (Waples et Waples, 2004; Gehlin et Spitler, 2015; Hakala et al., 2014; Raymond et al., 2011a). The assumption of volumetric heat capacity of the subsurface to calculate the diffusivity was based on the rock types identified in drill cuttings using available literature (Waples et Waples, 2004a, 2004b; Marcotte et Pasquier, 2008; Raymond et al., 2011a).

The thermal conductivity assessment for the third case, with recovery temperature profiles, was performed by dividing the subsurface into horizontal layers each 1 m thick, assuming homogeneity and isotropy for each sublayer and negligible vertical heat transfer between the slices (Fujii et al., 2006; Pehme et al., 2007; Hakala et al., 2014). The analysis also assumed that the temperature inside the U-pipe within a given slice becomes uniform during the recovery period after stopping the heat injection (Raymond et al., 2011b). The resulting mathematical process is similar to the first two cases except that the heat injection rate is zero during the recovery period and this can be taken into account with the temporal superposition principle (Pehme et al., 2007; Raymond et al., 2011b; ADEME, 2015). Therefore, the water temperature at a given depth in the GHE can be described as:

$$\bar{T}_w \cong \frac{q}{4\pi\lambda_s} [(\ln(4Fo) - \gamma) - (\ln(4Fo_{\text{off}}) - \gamma)] + T_0 \quad (2.15)$$

when

$$Fo_{\text{off}} = \frac{\alpha_s(t-t_{\text{off}})}{r_b^2} > 5 \quad (2.16)$$

where t_{off} (s) is the time when the heat injection ended and t (s) is the total time since the beginning of the test. The above equations can be rearranged to express water temperature as a function of the natural logarithm of normalized time t' to be suitable for analysis with the slope method (Nusier et Abu-Hamdeh, 2003; Pehme et al., 2007; Pehme et al., 2013):

$$\bar{T}_w \cong m' \ln(t') + b' \quad (2.17)$$

where

$$m' = \frac{q}{4\pi\lambda_S}, b' = T_o - \frac{q}{4\pi\lambda_S} \ln\left(\frac{4\alpha_S}{r_b^2}\right) \text{ and } t' = \frac{t}{t-t_{off}} \quad (2.18)$$

such that

$$\lambda_S \cong \frac{q}{4\pi \times m'} \quad (2.19)$$

The normalized slope for the recovery period is denoted by m' in the above equations. Collected temperature profiles were consequently reorganized to plot the temperature as a function of natural logarithm normalized time for each slice of GHE and to infer the thermal conductivity of each sublayer along the entire depth of the GHE, and then to generate the thermal conductivity profile.

2.5.4 Calculation of the Heat Injection Rate

The heat injection rate during the TRT was calculated according to the flow rate measurement and water temperature evolution during the TRT:

$$q = \frac{Q}{L_b} = \frac{Q' \rho_w c_w (T_{w,in} - T_{w,out})}{L_b} \quad (2.20)$$

where Q (W) is the total heat injection rate, L_b (m) is the length of borehole, Q' ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) is the water flow rate in the U-pipe, ρ_w (1000 Kg m^{-3}) is the assumed water density, and c_w ($4180 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) is the assumed water heat capacity. The calculation was performed for the first and second TRT analyses using data recorded every minute during the heat injection period, and the resulting rates were averaged to evaluate the bulk subsurface thermal conductivity.

For the third TRT analysis, two hypotheses were formulated to estimate the heat injection rate at depth in the U-pipe using the recovery temperature profiles. In the first hypothesis, the heat injection rate was assumed to be constant with depth and calculated using Equation 2.20, according to the same procedure as conventional TRT analysis. The heat injection rate for the second hypothesis was calculated by assuming depth variations in the heat injection rate according to the p-average temperature distribution along the GHE (Beier, 2011):

$$|\Delta T(z)| = \left\{ |\Delta T_{w,in}|^p + \left(\frac{z}{2L_b}\right) \left(|\Delta T_{w,out}|^p - |\Delta T_{w,in}|^p \right) \right\}^{1/p} \quad (2.21)$$

where $\Delta T_{w,in} = T_{w,in} - T_0$ and $\Delta T_{w,out} = T_{w,out} - T_0$ are the water temperature increments at the GHE inlet and outlet, z (m) is the depth along the borehole, L_b (m) is the length of the U-pipe. The fitting parameter p is used to describe the asymmetric water temperature along the U-pipe and was assumed to $p \rightarrow -1$ for this study (Marcotte et Pasquier, 2008; Beier, 2011; Vidal et al., 2017). This asymmetric distribution of temperature and consequently the heat injection rate was assumed to be more representative of GHE conditions based on numerical simulations (Beier, 2011; Vidal et al., 2017) and field TRT experiments using distributed temperature sensing with fiber optic (Fujii et al., 2009; Hakala et al., 2014; Lehr et Sass, 2014). This assumption is theoretical for the analysis of a conventional TRT and the temperature recorded with a wired submersible probe during the recovery period of a TRT. It would have to be verified but this was not possible in our study since only inlet and outlet water temperatures were measured during the heat injection period. The heat injection rate per unit length for a given GHE depth was therefore determined for each subsurface slice by combining equations 2.21 and 2.22 based on the approach of (Hakala et al., 2014):

$$q = \frac{Q}{L_b} = \frac{Q' \rho_w c_w (T_{w,down1} - T_{w,down2} + T_{w,up2} - T_{w,up1})}{L_b} \quad (2.22)$$

where $T_{w,down1}$ and $T_{w,down2}$ are the calculated water temperature at the top and bottom of each down-flowing U-pipe section, and $T_{w,up2}$ and $T_{w,up1}$ are the water temperature at the bottom and top of each up-flowing U-pipe section. The length of U-pipe section considered was 1 m such that the heat injection rate calculated with Equation 22 is a unit rate.

Water temperature and the heat injection rate were calculated every minute with recorded TRT data to finally estimate an average heat injection rate at each GHE depth.

2.5.5 Thermostratigraphic Assessment and Evaluation of Groundwater Fluxes

Thermal conductivity with recovery temperature profiles was analyzed at a vertical resolution of 1 m to define the vertical distribution. The average thermal conductivity of the profile was compared to the bulk thermal conductivity inferred by conventional TRT using heat injection data to validate the thermal conductivity profile and the discrepancy with hydrothermostratigraphic units. The thermal conductivity distribution obtained from recovery temperature profiles was further compared to the geological well log, and temperature logs and groundwater fluxes measured after drilling were additionally used to identify heterogeneous layers to establish a complete hydrothermostratigraphic log (Pehme et al., 2007; Fujii et al., 2009; Pehme et al., 2013; Kavanaugh, 2016; Hakala et al., 2014). The analysis of the thermal conductivity profile revealed

fracture zones characterized by faster cooling, indicating groundwater flow perturbations for which Darcy's flux was inferred using the Peclet number approach to quantify the impact on apparent thermal conductivity (Raymond et al., 2011a). The Peclet number Pe (-) is defined as the ratio of advective heat transfer (q_{adv}) to conductive heat transfer (q_{cond}), which is related to the effective thermal conductivity evaluated along the depth of the GHE (Pahud, 2001; Raymond et al., 2011a; Lehr et Sass, 2014; Lehr, 2015):

$$P_e = \frac{q_{adv}}{q_{cond}} = \frac{\lambda_{eff} - \lambda_{cond}}{\lambda_{cond}} = \frac{\lambda_{adv}}{\lambda_{cond}} \cong \frac{\vartheta L_c \rho_w c_w}{\lambda_{cond}} \quad (2.23)$$

where L_c (m) is the characteristic length, ϑ ($m\ s^{-1}$) is Darcy's flux, and λ_{adv} , λ_{cond} and λ_{eff} are the advective, conductive and effective terms of the thermal conductivity, respectively. Effective thermal conductivity, assumed to be affected by both advection and conduction, was evaluated at the depth of the fracture zones, whereas the conductive term is assumed to be the thermal conductivity at depths with no evidence of groundwater flow. Darcy's flux was isolated from the above equations:

$$\vartheta \cong \frac{\lambda_{adv}}{L_c \rho_w c_w} \quad (2.24)$$

2.6 Results

2.6.1 Temperature Profile Correction Methods

For validation purposes, the temperature profiles corrected with the first method using the uncapped U-pipe and the second method using the capped U-pipe were plotted and compared to the temperature recorded at a fixed depth (Figure 2.3).

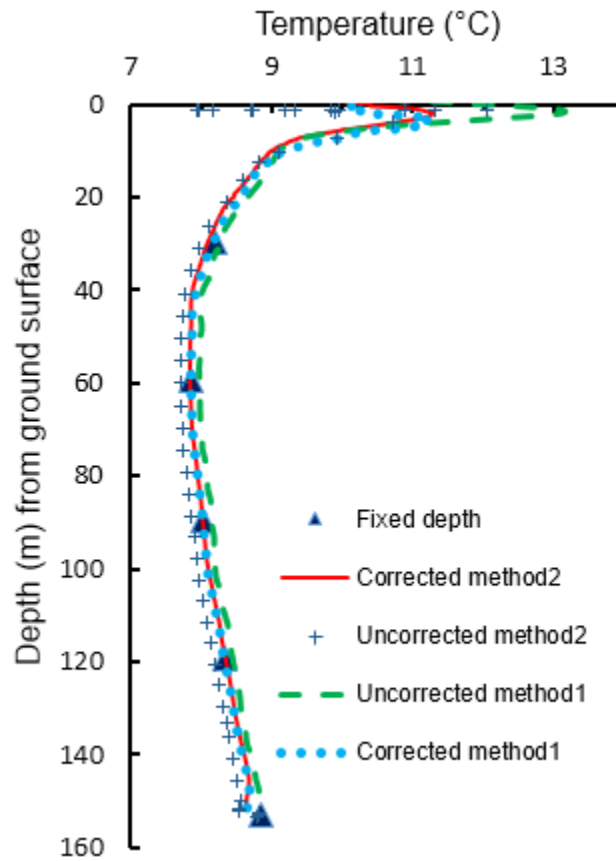


Figure 2.3 Comparative temperature profiles for the validation of the depth correction methods.

The comparative plot revealed that using either of the first or second depth correction methods yields similar results and a close evaluation of the subsurface temperature, whereas the uncorrected profile with the first method (uncapped U-pipe) overestimated the subsurface temperature and the uncorrected profile with the second method (capped U-pipe) underestimated it. The discrepancy between profiles and the fixed-depth temperatures can be summarized as follows:

- (1) overestimated by up to 1.6% when using the first method without depth correction,
- (2) less than 1% when using the first method or the second method with depth correction,
- (3) underestimated by up to 1.2% when using the second method without depth correction.

2.6.2 Undisturbed Subsurface Temperature

Temperature profiles recorded after drilling the borehole and installing the GHE were evaluated with the first depth correction method (Equation 2.3) using the uncapped U-pipe procedure (Figure

2.2b). These profiles were plotted on the same graph to visualize the temperature evolution after the GHE has been installed (Figure 2.4).

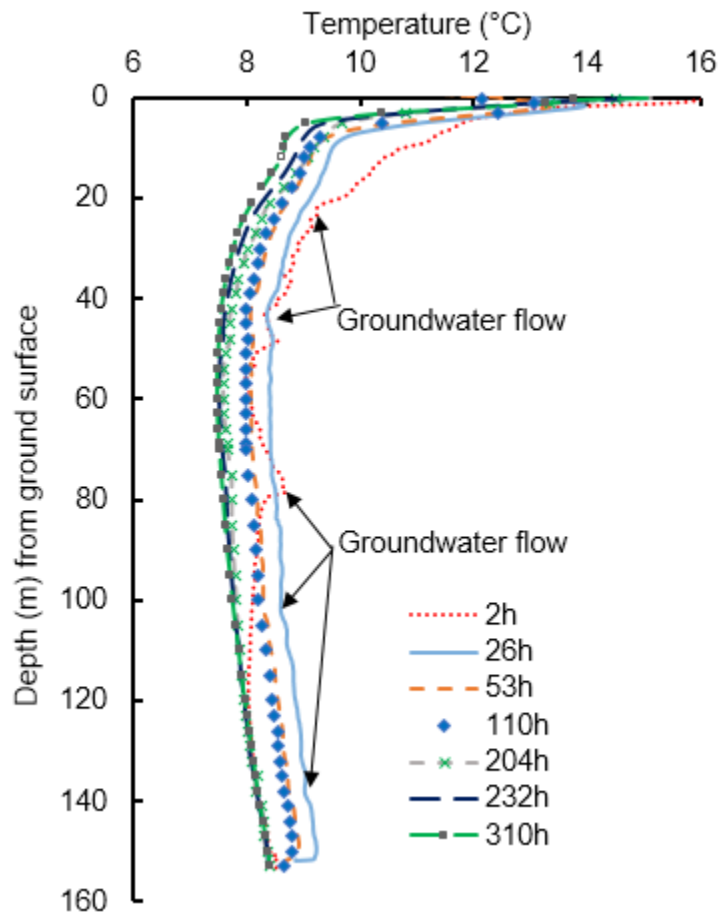


Figure 2.4 Temperature profiles recorded after drilling the borehole for the GHE.

The time given in the legend of Figure 2.4 is calculated from the end of the GHE installation. An average undisturbed ground temperature of 7.95 °C was found, assuming that the temperature profile at 310 h (12.91 days) after the end of GHE installation had nearly reached equilibrium with the subsurface temperature (Raymond et al., 2011a; Kavanaugh, 2016). The discrepancy with the average ground temperature established from the previous profile measured at 232 h (9.67 days) was less than 0.01 °C.

The discrepancy between the average ground temperature determined from the profile measured at 310 h and that measured at 110 h (4.58 days) was more than 0.5 °C and at least 10% higher before that time. Layers with significant faster cooling time were identified in the temperature

profiles at depths of 20 to 25 m, 40 to 45 m and 75 to 80 m, and for thinner horizons at depths of 95 and 135 m. These temperature anomalies were assumed to be affected by groundwater flow (Pehme et al., 2013; Hakala et al., 2014) and correlate with fracture zones detected while drilling for the GHE and observation wells (Figure 2.1). The disturbance at a depth of 75 to 80 m was deduced from the historical temperature profile at 2 h only.

2.6.3 Analysis of Conventional TRT

The heat injection period for the TRT analysis was divided into two steps since there was a change in the heat injection rate (Figure 2.5; Table 2.1). This was necessary to collect data for the curve fitting method using the superposition principle and the variable heat injection rates (Gehlin et Spitler, 2015; ADEME, 2015).

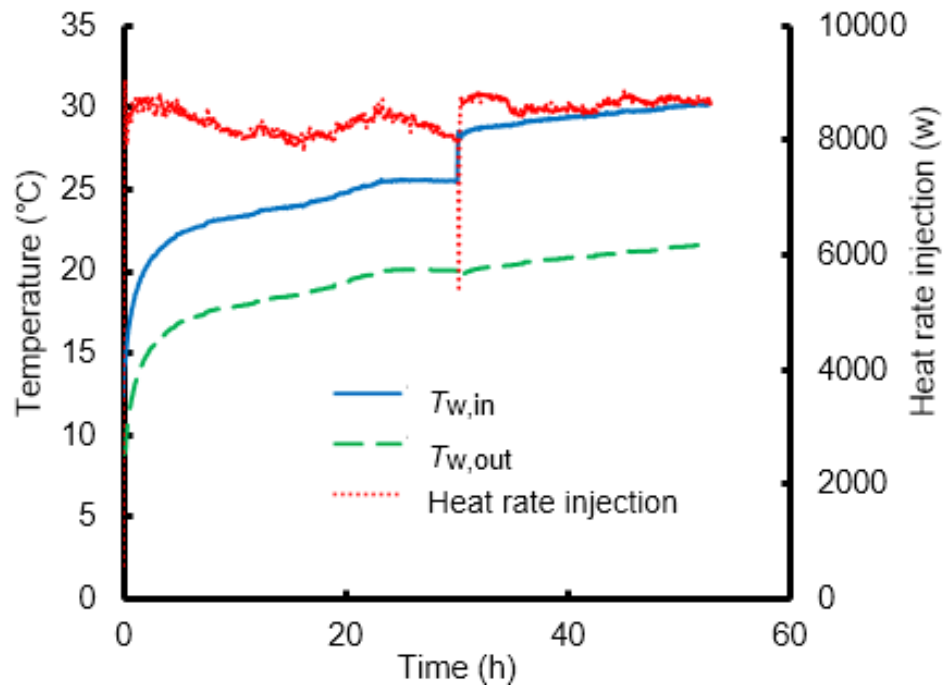


Figure 2.5 Heat injection rate and temperature measured during the TRT.

The duration of the first TRT step was 30 h with an average heat injection rate of 8 278 W (53.82 W m⁻¹) and the duration of the second TRT step was 22.8 h with an average heat injection rate of 8 625 W (56.13 W m⁻¹).

Table 2.1 : Parameters for conventional TRT analysis

Description	Value
r_b (m)	0.057
L_b (m)	153.8
C_s ($J\ m^{-3}\ K^{-1}$)	2.3×10^6
Heat injection duration (h)	52.8
Step 1 duration (h)	30
Flow rate (m^3s^{-1})	3.97×10^{-4}
Heat injection rate (W)	8 278
Heat injection rate per unit length of borehole ($W\ m^{-1}$)	53.82
Step 2 duration (h)	22.8
Flow rate (m^3s^{-1})	2.52×10^{-4}
Heat injection rate (W)	8 633
Heat injection rate per unit length of borehole ($W\ m^{-1}$)	56.13
ILS validity	
Minimal time (s)	3.6×10^4
Fo for $\lambda_s = 1.5$ to $2.0\ W\ m^{-1}K^{-1}$	6.24 to 8.34

A bulk subsurface thermal conductivity of $1.71 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ was inferred over the borehole length with the slope method considering the first 30 h of heat injection (equations 2.12 and 2.20) and estimating the inlet and outlet water temperature using p -average (Figure 2.6).

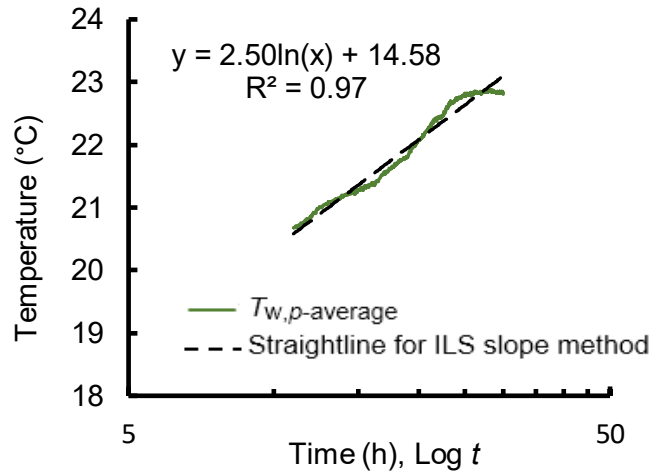


Figure 2.6 Conventional TRT analysis with the slope method (ILS).

The curve fitting analysis using equations 13, 14 and 20, taking into account variable heat injection rates with two steps combined to the least squares fit and a nonlinear solver, indicated a bulk subsurface thermal conductivity of $1.75 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Figure 2.7). This result from the second analysis is believed to be more representative than the result from the slope method because of the longer test time respecting the ILS validity criteria (Gehlin et Spitler, 2015; Kavanaugh, 2016; Kurevija et al., 2018) and the consideration of variable heat injection rates¹ (Raymond et al., 2011a).

¹ Project GEOPLASMA, 2017

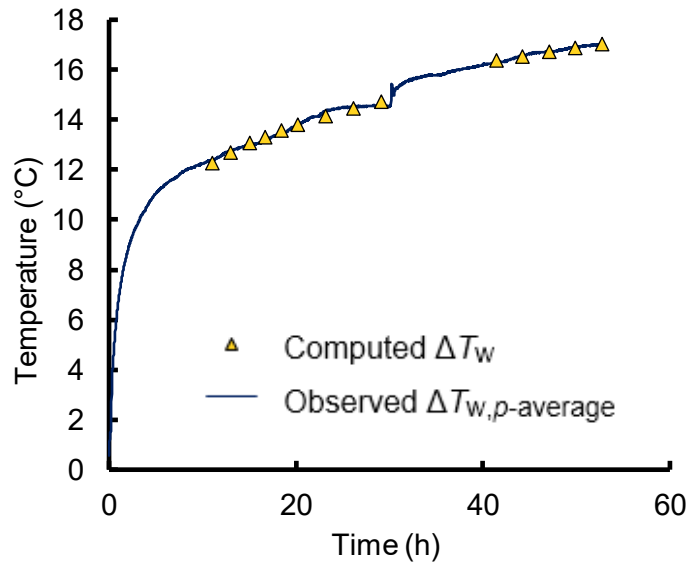


Figure 2.7 TRT analysis with the curve fitting method.

2.6.4 Analysis of Recovery Temperature Profiles

A total time of 207 h was necessary for the subsurface temperature to return to the initial condition after the TRT (Figure 2.8). The temperature profile of the undisturbed subsurface is labeled T_0 and corresponds to the temperature profile measured at 310 h after the installation of the GHE (Figure 2.4). A discrepancy of 0.01°C in the average ground temperature was again used to infer a return of subsurface temperature to initial conditions. The time given in the legend of Figure 2.8 is calculated from the end of the heat injection. Temperature profiles measured at 44, 83 and 109 h after the end of the TRT showed depth intervals with faster cooling times, assumed to be due to groundwater flow, and these were similar to the previous observations reported in Figure 2.4 for the temperature profile measured after GHE installation.

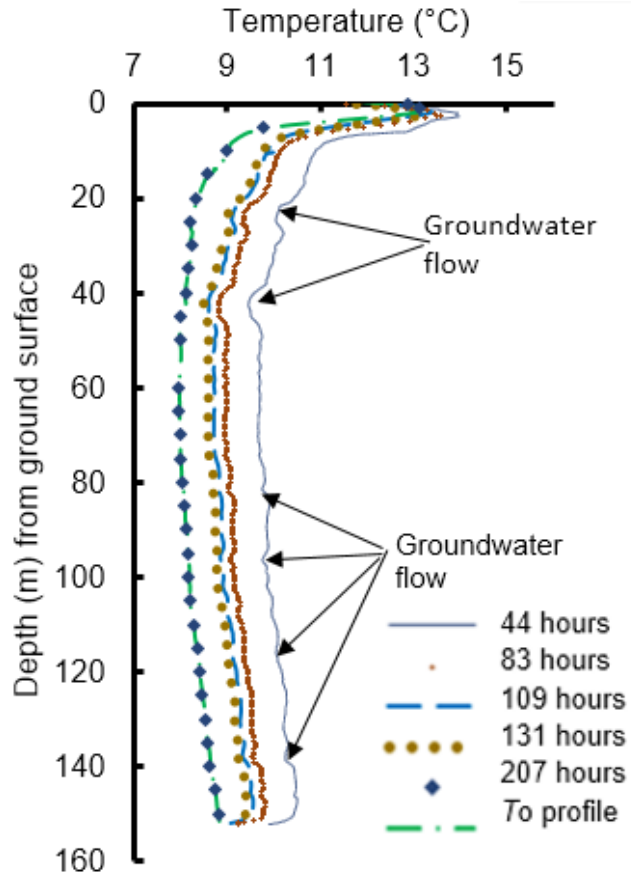


Figure 2.8 Recovery temperature profiles recorded after heat injection.

The temperatures at depths of 22 and 40 m were extracted from the recovery temperature profiles and plotted as a function of the normalized time t' to show examples illustrating the thermal conductivity assessment for slices of the GHE. The temperature profile measured at 44 h after the end of heat injection was removed from the data used to calculate the normalized slope since this temperature profile was measured early when considering the duration of 207 h for the thermal recovery period. Kurevija et al. (2018) have reported that the validity of the recovery data used for thermal conductivity assessment is determined similar to pumping test assumption based on the selected time interval to identify when the logarithmic temperature curve of the recovery period becomes linear. A comparison with the cooling period after the GHE installation revealed that the TRT recovery was faster (Figures 2.4 and 2.8).

The normalized slope calculation at each depth was simplified by assigning the average measurement time reported in the legend to each temperature-depth profile, although the

measurements took about 25 min to perform from top to bottom. Therefore, the slope with the exact measurement time near the surface and bottom of the GHE was calculated to verify if using the average profile time can induce error, and this verification resulted in a slope variation of less than 1%. The calculation of the slope at each depth using the average profile time was therefore assumed to be representative. The normalized slope for recovery measurements was calculated every meter along the borehole to obtain a full thermal conductivity profile with a vertical resolution of 1 m along the GHE by using the two different heat injection rate hypotheses (equations 20 to 22). The calculated heat injection rates were plotted according to the depth of the GHE to illustrate the difference between the uniform and variable rate hypotheses (Figure 2.9). The heat injection rate $q_{w,down}$ in Figure 2.9 is for the down-flowing water in the U-pipe and $q_{w,up}$ is for the up-flowing water.

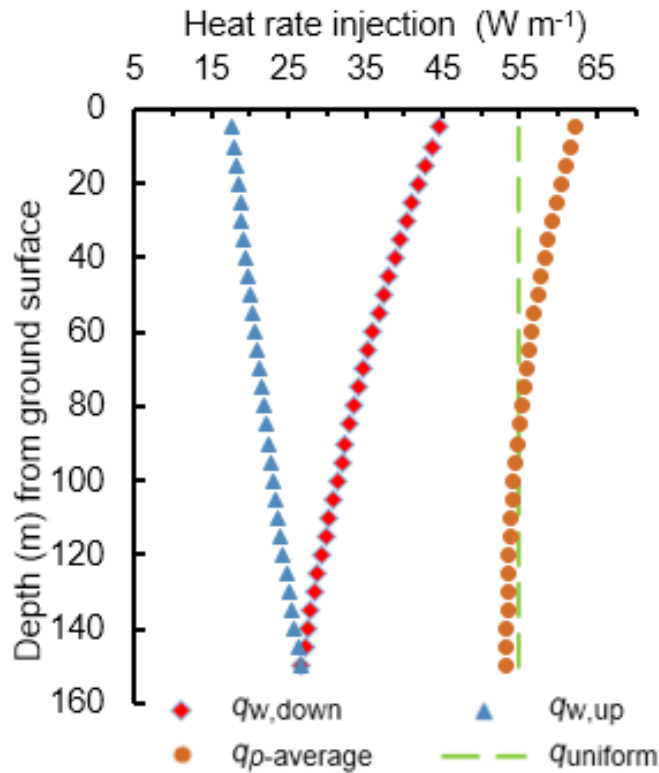


Figure 2.9 Constant and variable heat injection rate hypotheses for TRT analysis.

The heat injection rate assuming a uniform value showed an average rate of 54.94 W m⁻¹, which is 1.8 to 18% less than the heat injection rate calculated over the first 80 m along the GHE under

the second hypothesis (55.9 W m^{-1} to 64.9 W m^{-1}). Both heat injection rate hypotheses were similar from ~ 80 to 100 m , with a discrepancy of less than 1% , whereas the heat injection rate with the uniform hypothesis was 1.2 to 4% more from 100 to 153 m (54.3 W m^{-1} to 52.9 W m^{-1} ; Figure 9). Both heat injection rate hypotheses were subsequently used to infer the thermal conductivity of subsurface slices (Figure 2.10) and the thermal conductivity profile along the depth (Figure 2.11).

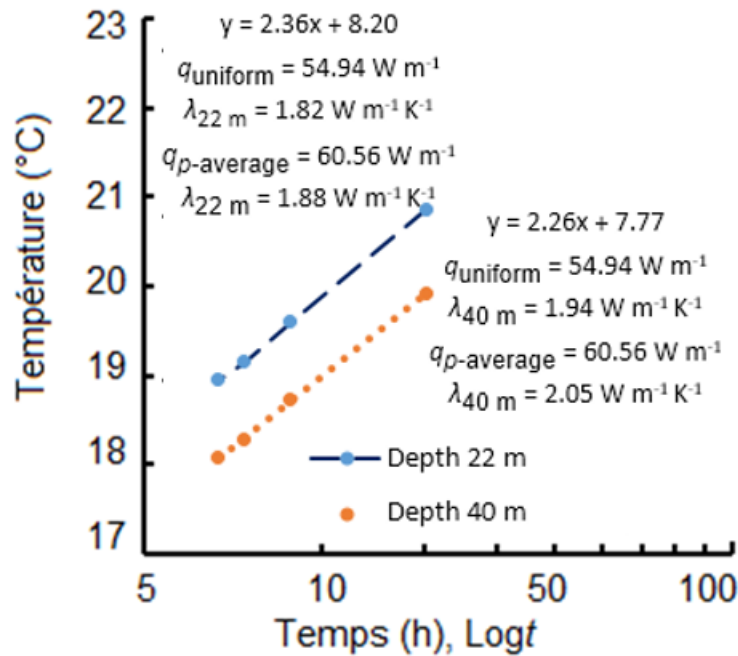


Figure 2.10 Thermal conductivity assessment with recovery temperature measured at depths of 22 m and 40 m using the slope method.

The average thermal conductivity inferred from each profile with the two heat injection rate hypotheses is 1.79 and $1.82 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, respectively. These results are similar to the bulk thermal conductivity assessment obtained with the slope ($1.71 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; Figure 2.6) and curve fitting methods ($1.75 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; Figure 2.7), indicating an average discrepancy of 4 to 6% . Higher thermal conductivity zones (Figure 2.11) are found at depths previously identified to be affected by groundwater flow (Figures 2.2 and 2.8) and these correlate with the presence of the main fracture zones in the stratigraphic log (Figure 2.1).

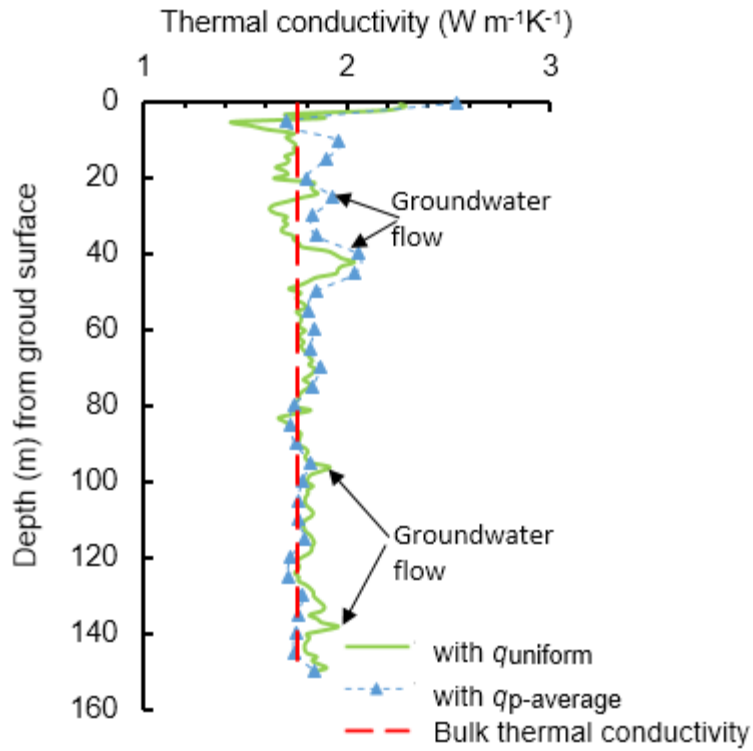


Figure 2.11 Thermal conductivity profiles from the analysis of recovery temperature logs.

The average thermal conductivity at different depth intervals defined according to the stratigraphic log were calculated using results from the first hypothesis with a constant heat injection rate at depth and compared to the bulk thermal conductivity obtained with the conventional TRT analysis using the curve fitting method (Table 2.2). Discrepancy was shown to vary between 1 to 22% for each stratigraphic layer, demonstrating the impact of local heterogeneities and groundwater fluxes on the assessment of subsurface thermal conductivity. At depth of fractures with potential groundwater flow, discrepancy in effective thermal conductivity varies from 6 to 17%.

Table 2.2 : Comparison of the TC obtained with the conventional TRT analysis and the new analysis method using the recovery temperature profiles

Depth (m)	λ_s from recovery temperature logs ($W m^{-1} K^{-1}$)	λ_s from conventional TRT ($W m^{-1} K^{-1}$)	Discrepancy (%)
0 - 2	2.14	1.75	22
2 - 10	1.73		1
10 - 42	1.90		8
42 - 120	1.86		6
120 - 154	1.84		5

2.6.5 Hydrothermostratigraphic and groundwater fluxes Assessment

Thermal conductivity for each 1-m layer was grouped into stratigraphic units and correlated to the geological log produced from drill cuttings (Figure 2.1) and the fracture zones identified to be affected by groundwater flux (Figures 2.4, 2.8) in order to define hydrothermostratigraphic units (Figure 2.12). The thermograstratigraphic log demonstrates the contribution of groundwater fluxes to the increase in apparent subsurface thermal conductivity along the main fractures previously identified in the host rock.

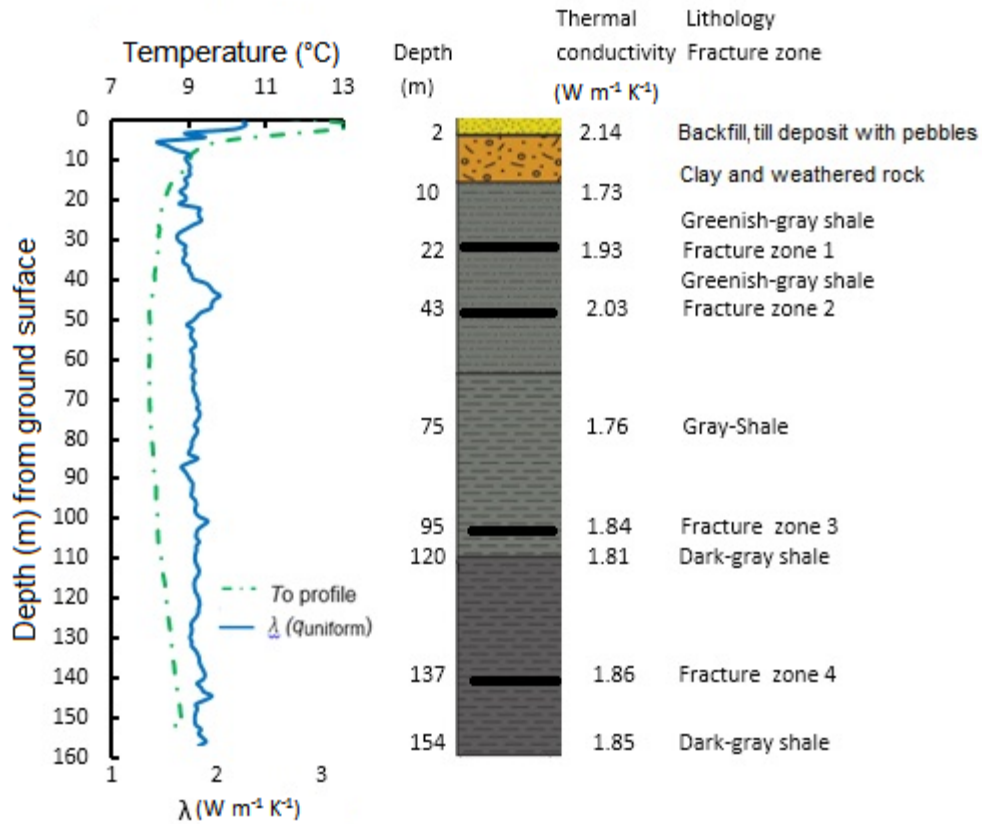


Figure 2.12 Hydrothermostratigraphic log of the GHE at INRS experimental well site.

The average thermal conductivity defined for the stratigraphic units was used to perform Peclet number analysis along the thermal conductivity profile using both heat injection rate hypotheses, as shown in Figure 2.13.

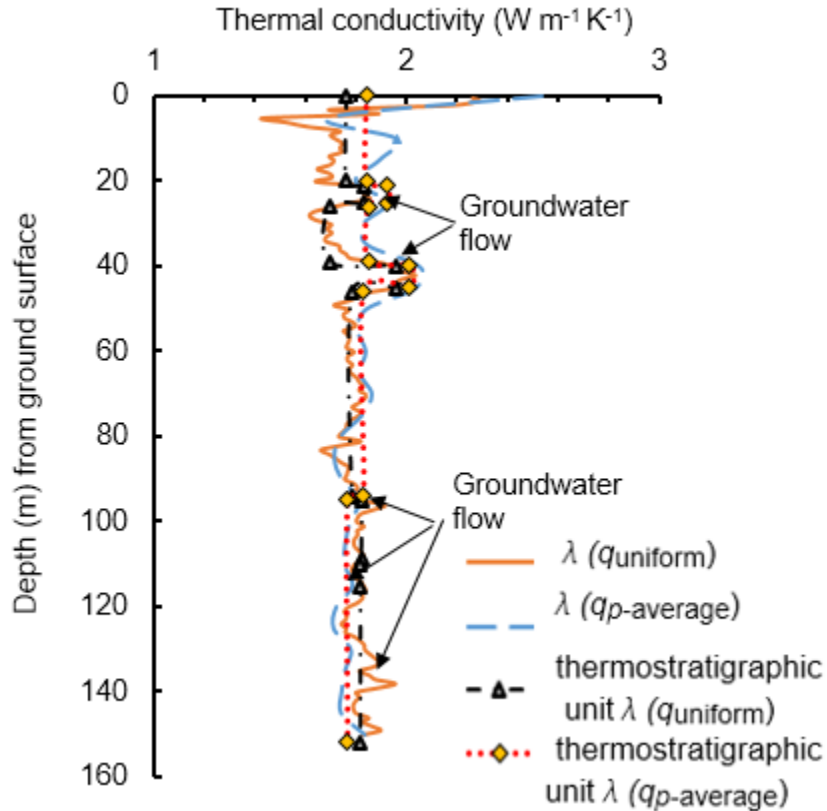


Figure 2.13 Effective thermal conductivity profile used for the Peclet number analysis.

Peclet analysis results revealed low Darcy fluxes with magnitudes on the order of 4.2×10^{-9} , 1.0×10^{-8} , 3.5×10^{-9} and $3.4 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ associated with the main fracture zones at depths of 20-25 m, 40-45 m, 80 m, 95 m and 137 m, respectively (Figure 2.13). These results are in agreement with the stratigraphic log (Figure 1) and the slug tests performed in the observation wells where low hydraulic conductivity of 1×10^{-5} to $1 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ was inferred.

2.7 Discussion and Conclusions

The main results of this research reveal that corrected temperature profiles measured with a submersible wired probe can be used for the accurate estimation of: (1) downhole temperature gradients and (2) the undisturbed subsurface temperature, and (3) a subsurface thermal conductivity profile with a spatial resolution of approximately 1 m from temperature logs measured during the recovery period of a TRT. This additional information can be used to define a hydrothermostratigraphic log and to confirm the presence of permeable fracture zones with groundwater flow in the host rocks (Lehr et Sass, 2014).

Two methods to correct depth in wired temperature profiles affected by the impact of water level rise in U-pipes were validated at GHE scale with measurements at fixed depths. The undisturbed subsurface temperature profile was evaluated with less than 1% discrepancy using the wired probe and correction for the water level rise. These results were consistent when compared with (Raymond et al., 2016) which used an undisturbed temperature profile to spatially extend a conventional TRT assessment. This proposed approach using wired probe provides a simple alternative to optical fibers (Pehme et al., 2007; Fujii et al., 2009; Pehme et al., 2013; Sakata et al., 2017; Verdoya et al., 2015) or wireless temperature sensors (Martos et al., 2011, Raymond et al., 2015) to measure temperature in GHEs. The capped U-pipe method to measure the temperature profile, while not used in the final application because it was only validated after the experiment, showed several advantages as there is no need to measure the water level at the start and end of the profile measurement.

Detailed monitoring of the time needed for the borehole to cool down after drilling indicated that the undisturbed subsurface temperature could have been overestimated by more than 10% if the temperature had been measured less than 110 h (4.5 days) after drilling. This field evaluation of the time for the ground temperature to return to its initial condition suggests that the recommendation of Kavanaugh (Kavanaugh, 2016) to wait two to five days after drilling before starting a TRT may be too short. A wait time of about thirteen days was necessary for this low thermal conductivity subsurface ($\sim 1.8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) to return to a state that was close to being undisturbed by the action of drilling.

Assessing the subsurface thermal conductivity by combining a conventional TRT with temperature profiles measured during the recovery period was shown to be a valuable alternative, allowing the bulk thermal conductivity assessment obtained with a conventional TRT under water circulation to be extended into a full thermal conductivity profile, similar to the analysis performed for a TRT with distributed temperature sensing (Fujii et al., 2006; Fujii et al., 2009; Pehme et al., 2013; Hakala et al., 2014; Sakata et al., 2017), heating cable (Raymond et al., 2015) or wireless temperature profiling (Martos et al., 2011). The discrepancy in the average subsurface thermal conductivity obtained by comparing the conventional TRT and the wired probe methods was about 4 to 6%. These results are consistent when considering experimental errors and the accuracy of thermal conductivity assessment, which is typically between 2.5 to 10% for a TRT duration of 1 to 4 days (Raymond et al., 2011a). However, there is an important limitation associated with this wired probe method. The heat injection rate inside the borehole cannot be calculated directly at depth since the wired probe can obviously not be inserted in the U-pipe during the heat injection of the TRT done by water circulation. A TRT with distributed temperature

sensing during the heat injection period allows the heat injection rate to be calculated in different slices of a borehole (Fujii et al., 2009; Hakala et al., 2014; Sakata et al., 2017), offering more information than can be obtained with a wired probe. Different assumptions of constant or variable heat injection rate along the GHE must be chosen to proceed with a similar analysis. This is not different from the conventional TRT, with inlet and outlet water temperature measurements during heat injection only, where an arbitrary hypothesis about the temperature distribution along the U-pipe is used to properly assess both the subsurface thermal conductivity and the borehole thermal resistance (Marcotte et Pasquier, 2008; Raymond et al., 2011a; Gehlin et Spitler, 2015). One possibility to solve this problem would be to measure temperature at the bottom of the U-pipe during the heat injection period with a submersible data logger. Future work could combine temperature measurements at the bottom of the GHE during the recovery period of the heat injection and wired probe temperature profiling to improve the current method and better constrain the analysis.

The data collected for the undisturbed subsurface temperature and the thermostratigraphic assessment helped to identify the presence of groundwater flow, as has been done in previous studies (Fujii et al., 2009; Klepikova et al., 2011; Pehme et al., 2013; Lehr et Sass, 2014; Lehr, 2015; Sakata et al., 2017). The Darcy flux inferred by the Peclet number analysis was used to quantify groundwater flux conditions around the pilot GHE with the available methodology (Pahud, 2001; Lehr, 2015; Verdoya et al., 2015). Low groundwater fluxes below 10^{-8} m s^{-1} were shown in this and other studies to increase the apparent thermal conductivity (Pahud, 2001; Acuña, 2010; Raymond et al., 2011a; Lehr et Sass, 2014; Lehr, 2015; Sakata et al., 2017). Overall, the thermal conductivity profile was correlated to the stratigraphic log and used in this study to evaluate subsurface heterogeneity and groundwater fluxes in fracture zones, similar to the analysis involving distributed TRT (Nusier et Abu-Hamdeh, 2003; Rohner, 2005; Pehme et al., 2018; Lehr et Sass, 2014; Lehr, 2015; Raymond et al., 2015). Results showed that temperature anomalies and high thermal conductivity zones correlate with fractured horizons affected by flowing groundwater with low Darcy flux. This information can be useful to improve ground-coupled heat pump design and better constrained GHE length (Zervantonakis et Reuss, 2006; Kavanaugh, 2010; Langlois, 2010; Huber et Arslan, 2012; Ballard et al., 2016). The analysis of wired recovery temperature profiles was explored with the assumption of heat conduction only, as commonly done for TRT analysis (Lanini et Nguyen, 2009; GSHP, 2011; Acuña et Palm, 2011; Raymond et al., 2011a; Raymond et al., 2011c; Soldo et al., 2015; Boban et al., 2018). The results obtained using this new approach reveal potential solution to assess the impact of groundwater flow along fracture zones when analyzing conventional TRT without using DTS.

Further investigations could be done with numerical models simulating coupled groundwater flow (Sundberg et al., 2009; Wagner et al., 2012; Raymond et Lamarche, 2013; Choi et al., 2013; Yoshioka et al., 2017) and heat transfer to reproduce TRT and improve the Peclet number analysis.

3 CHAPTER 3: SECOND ARTICLE

Estimation of In situ Heat Capacity and Thermal Diffusivity from Undisturbed Ground Temperature Profile Measured in Ground Heat Exchangers.

Traduction française

Estimation in situ de la capacité thermique et de la diffusivité thermique à partir du profil de température non perturbé mesuré dans un échangeur de chaleur géothermique.

Auteurs :

Claude Hugo K. Pambou ¹, Jasmin Raymond ¹, Mafalda M. Miranda ¹ et Nicolò Giordano ²

¹ INRS- Institut national de la recherche scientifique, 490 rue de la Couronne, Quebec City, QC , G1K 9A9, Canada.

² Géotherma Solutions Inc., 13-2528 Avenue de Monceaux, Quebec City, QC, G1T 2N7, Canada.

Titre de la revue ou de l'ouvrage : Geosciences

13 Avril 2022

DOI.ORG/10.3390/geosciences120500180

Contribution des auteurs:

Le concept et la méthodologie utilisés ont été proposés et développés par C.H.K. Pambou. Ils ont été discutés avec N. Giordano et validés par J. Raymond. La collecte des données et l'application sur le terrain ont été réalisées par C.H.K. Pambou avec la contribution de M.M. Mafalda et la supervision de J. Raymond. Tous les auteurs ont participé à la rédaction de l'article.

Lien avec l'article précédent

Ce chapitre porte principalement sur l'évaluation in situ de la capacité thermique (HC) et de la diffusivité thermique (TD) du sous-sol recoupé par l'ECG ainsi que la validation de la température du sous-sol non perturbé. Ce sont des propriétés thermophysiques importantes dans l'analyse du TRT selon la méthode de la SLI, présentée dans le Chapitre 2. Le deuxième lien avec le Chapitre 2 repose sur l'utilisation du profil de température mesuré à l'équilibre dans l'ECG comme principale source de données. Celui-ci a été mesuré et corrigé selon les méthodes présentées

dans l'article 1 (Chapitre 2). Bien plus, ce chapitre a permis de présenter un autre cas d'utilisation du profil de température mesuré à l'équilibre dans un ECG.

Abbreviation

BHE:	borehole heat exchanger ou forage pour échangeur de chaleur
Eq:	equation ou équation
HC:	volumetric heat capacity ou capacité thermique volumique
OTRT:	oscillatory thermal response test ou test de réponse thermique oscillatoire
RE:	relative error ou erreur relative
RMSE:	relative mean square error ou erreur relative moyenne au carré
SC:	numerical simulation case ou cas de simulation numérique
TC:	thermal conductivity ou conductivité thermique
TD:	thermal diffusivity ou diffusivité thermique
TRT:	thermal response test
1-U:	single U-pipe ou boucle à un tuyau
2-U:	double U-pipe ou boucle à doubles tuyaux
UGT:	Undisturbed ground temperature ou température du sol non perturbé

Nomenclature

c_1 :	empirical coefficient ou coefficient empirique
e :	exponential ou exponentiel

<i>L</i> :	length (m) ou longueur (m)
<i>N</i> :	number of observations ou nombre d'observation
<i>P</i> :	harmonic period for a radial frequency ou période de l'oscillation harmonique radiale.
<i>SIN</i> :	sine function ou fonction sinus
<i>T</i> :	temperature (°C) ou température (°C)
<i>y</i> :	assessed parameter ou paramètre évalué
<i>z</i> :	depth (m) ou profondeur (m)
<i>Z</i> :	damping depth (m) ou profondeur d'amortissement (m)

Greek symbol

α :	thermal diffusivity ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
λ :	thermal conductivity for injection period ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
π :	constant (3.14159265358979)

Subscript

calc:	calculated
dd:	damping depth
eff:	effective
g:	normalized
Obs:	observed
bot:	bottom

λ : thermal conductivity for injection period ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

π : constant (3.14159265358979)

3.1 Introduction

Thermal response tests (TRT) made in borehole heat exchangers (BHEs) and analyzed with the infinite line source equation are commonly used to infer in situ thermal conductivity (TC) (Gehlin et Spitler, 2015; Antelmi et al., 2020; Sakata et al., 2021). However, the heterogeneity of the ground and the presence of groundwater flow are often neglected to simplify the analysis. Furthermore, estimation of in situ thermal diffusivity (TD) and heat capacity (HC) are also needed when TRT are combined with the infinite line source equation to reproduce observed temperatures (Raymond, 2018).

TRT analyzed with numerical models or the moving line source equation, for example, are advanced options to characterize the thermal and hydrogeological properties of the subsurface (Antelmi et al., 2020; Sakata et al., 2021). However, developing such numerical or analytical models is a complex task and only provides information on TC and not HC. Core pieces or chip samples can be analyzed in the laboratory in dry or water saturated conditions to better assess thermal storage properties and reduce uncertainty (Kluitenberg et al, 1995; Raymond, 2018; Miranda et al.,2020). However, samples are commonly disturbed and analysis may not be representative of the in situ conditions. Another common simple practice is to arbitrarily select a literature-based in situ HC that matches the geological description of materials found in a borehole (Waples et Waples, 2004a-b; Andújar Márquez et al., 2016; Raymond et al., 2017). However, a study carried out by Giordano et al. (2021) revealed that typical uncertainty associated to the in situ TD could reach about $\pm 40\%$ when a conventional TRT is analyzed with an approximated HC for common geological materials (1.50 to $3.20 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$). All these examples highlight uncertainty that prevails about HC when performing a conventional TRT (Kluitenberg et al., 2015; Raymond, 2018). Therefore, alternative field methods to infer heat storage properties are still needed. Oscillatory TRT (OTRT) proposed and discussed by, for instance, Oberdorfer (2014) and applied by Giordano et al. (2021), have the potential to evaluate the in situ thermal diffusivity and heat capacity. This methodology is an important and advanced step taken towards the in situ evaluation of this thermal property. However, analyzing the oscillating temperature response is complex and the method needs improvement to significantly reduce uncertainty (currently on the order of $\pm 15\%$). Thus, improving the assessment of ground thermal properties with simple and efficient methods to infer the in situ TD and HC is necessary. Such improvements can help to better design geothermal systems relying on BHEs. Ultimately, this can have a significant positive impact on CO_2 emission reduction and provide advantages to develop green energy alternatives (Javidan et al., 2022).

Another available approach for the assessment of TD and HC is the analysis of ground temperature profiles to characterize the thermo-hydraulic properties of the geological materials (Raymond, 2018; Lehr et Sass, 2014; Hakala et al., 2014; Pambou et al., 2019; Antelmi et al., 2020; Giordano et al., 2021). Ground temperature profiles can be acquired with a submersible probe that is lowered into the BHE during or after a TRT (Lehr et Sass, 2014; Hakala et al., 2014, Ballard et al., 2016). These ground temperature profiles can be used to improve the evaluation of in situ TC and estimate horizontal groundwater fluxes (Lehr et Sass, 2014; Gehlin et Spitler, 2015; Pambou et al., 2019; Antelmi et al., 2020). Moreover, ground temperature profiles measured in the BHE before the TRT have also commonly been used to evaluate the undisturbed ground temperature (Gehlin et Nordell, 2003; Hakala et al., 2014; Raymond et al., 2017; Pambou et al., 2019). Numerical modeling can be used to reproduce an equilibrium temperature profile (Xing, 2014; Raymond et al., 2016; Zhou et al., 2016). The resulting profile can be used to extend the conventional in situ TC assessment of a TRT and to infer the terrestrial heat flow (Raymond et al., 2016; Márquez et al., 2019). Ground temperature profiles measured in observation wells are also used to evaluate other thermal properties such as in situ TD (Kusuda et Achenbach, 1965; Adams et al., 1976; Horton et al., 1983; Costello et al., 1986; Taniguchi, 1993). A calculated ground temperature profile using such analytical or numerical approaches can be further matched to the observed ground temperature profile and used to evaluate vertical groundwater fluxes, hydraulic conductivities and thermal properties of the aquifer (Stallman, 1965; Williams et Gold, 1976; Taniguchi 1993; Klepikova et al., 2011). These methods are based on the evaluation of the annual amplitude temperature decay and the annual damping depth during long-term observation of the ground thermal disturbance diffusion resulting from the annual thermal flux at the ground surface (Costello, 1986; Xing, 2014; Tong et al., 2017). Often, one-dimensional semi-analytical to analytical solutions or numerical simulations are used to infer the ground TD with various methods, such as the amplitude ratio, the phase lag and the harmonic method (Kusuda et Achenbach, 1965; Adams et al., 1976; Horton et al., 1983; Costello, 1986; Nassar et Horton, 1990; Taniguchi, 1993; Cui et al., 2011; Xing, 2014; Tong et al., 2017; Raymond et al., 2017; Naranjo-Mendonza et al., 2018; Cho et Lahm., 2018). Despite the potential of these approaches to provide in situ evaluation of TD, they appear hardly applicable to the design of ground-coupled heat pump systems. The main reason is the time required to continuously measure the ground temperature profiles ranging from several days to a year to record a periodic cycle of heat diffusion in the subsurface (Xing, 2014; Raymond et al., 2017). As a matter of fact, field measurements of prefeasibility studies for the design of ground-coupled heat pumps must be conducted within a few days, for instance, 2–3 days when considering the heating period of conventional TRT or up

to 5 days if the recovery phase of the TRT is included in the analysis (Gehlin et Spitler, 2015; Márquez et al., 2016; Raymond, 2018; Pambou et al., 2019; Márquez et al., 2019; Antelmi et al., 2020; Sakata et al., 2021; Giordano et al., 2021). Recently, Márquez et al. (2016) proposed a methodology for the indirect evaluation of the in situ TD. This approach assumes transient heat conduction in a semi-infinite medium and is based on the evaluation of the minimum and the maximum mean annual ground temperature measured in a shallow borehole and the depth where that mean annual ambient temperature is observed in the ground. In other words, the method proposed by Márquez et al. (2016) is based on the assessment of the depth at which the annual ground temperature remains constant throughout the year (i.e., where there are no seasonal variations). That observed value is called the undisturbed ground temperature (T_{UGT}) (IEA ECES ANNEX21, 2013; Badache et al., 2016;). The results obtained by Márquez et al. (2016) were consistent with TD of mean geological materials identified from a reference borehole. However, this approach requires continuous ground temperature measurements during seven days to a year to identify and confirm the depth where T_{UGT} is located. This field approach is time consuming for a ground-coupled heat pump project. Moreover, the result is sensitive to measurement errors since it is based on a single evaluation of T_{UGT} (Horton et al., 1983; Nassar et Horton, 1990; Franco et Conti, 2020). An entire temperature profile may provide more information from the BHE (in terms of geology and thermophysical properties of the geological materials) and thus potentially minimize uncertainty (Andújar Márquez et al., 2016; Hakala et al., 2014; Pambou et al., 2019).

All the aforementioned difficulties in assessing accurately and quickly the in situ HC can eventually contribute to increasing errors in the design of geothermal heat pump systems and ultimately impact their installation cost (Raymond, 2018; Giordano et al., 2021). Therefore, evaluating the in situ HC can be useful for simulating the operation of BHE used for both ground-coupled heat pump and underground thermal energy storage systems (Gehlin et Spitler, 2015; Giordano et al., 2021). In fact, the Giordano et al. (2021) study indicated that the total drilling length of BHEs calculated when designing a ground-coupled heat pump system can be affected by $\pm 6\text{--}7\%$, which influences the total system cost by $3\text{--}4\%$. This highlights that an accurate evaluation of the in situ HC can help to better design ground-coupled heat pump projects by accurately targeting their installation cost and, therefore, positively impacting the geothermal heating and cooling market (Holmes et al., 2008; Droulia et al., 2009; Raymond, 2018; Giordano et al., 2021).

Bearing in mind the importance of a quick and accurate assessment of in situ HC, this research study had the objective of developing an alternative heat tracing approach to evaluate in situ HC

considering the main guidelines of the TRT (Gehlin et Spitler, 2015; Sakata et al., 2021; Raymond et al., 2017; Giordano et al., 2021). This study was carried out within the scope of a TRT performed in a pilot BHE (Andújar-Márquez et al., 2016; Pambou et al., 2019). The resulting method relied on the measurement of a single equilibrium temperature profile that is not disturbed by the heat injection of a TRT or drilling of the BHE and can be recorded before the TRT. Analysis of this equilibrium temperature profile using heat tracing principles allowed the evaluation of in situ TD. Afterwards, HC was calculated based on the in situ TC evaluated with a TRT. This heat tracing method appears rather novel because the in situ HC is evaluated with a single ground temperature profile, which can be the same as evaluating T_{UGT} before performing a conventional TRT. Moreover, using a single observed temperature profile determined at equilibrium and a TC assessment obtained from a conventional TRT analyzed with the slope method provide advantages in terms of simplicity. The methodology proposed does not need additional borehole or several temperature measurements. Finally, it does not depend on prior knowledge of the Earth heat flow since it is only based on an empirical approach to reproduce the observed undisturbed ground temperature profile measured in the BHE.

3.2 Methodology

3.2.1 Theoretical Background

General concepts used in this heat tracing method are described below to provide the basis of the new field approach developed and applied in this study. The observed undisturbed ground temperature value (T_{UGT} ; °C) and the curve-fit between observed and calculated undisturbed ground temperature profiles are used as a criterion to constrain the analysis in order to infer the damping depth as well as the in situ TD and TC.

A practical approach to accurately evaluate T_{UGT} is based on the arbitrary and graphical selection of the depth interval to be used for evaluation of the mean ground temperature and discarding near-surface data that visually appears to be affected by surface thermal disturbances (Figure 3.1; Droulia et al., 2009; Andújar Márquez et al., 2016; Badache et al., 2016; Raymond et al., 2017; Pambou et al., 2019; Miranda et al., 2020).

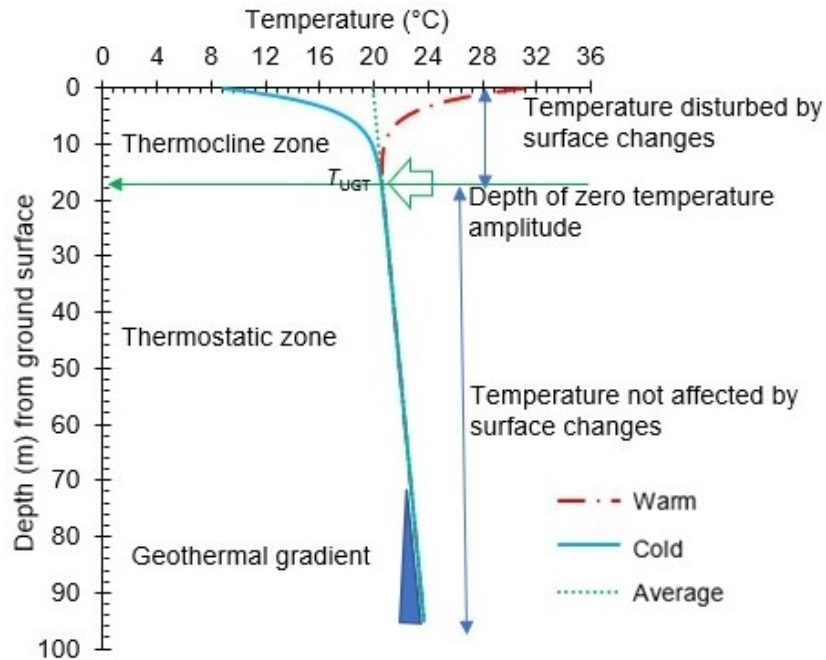


Figure 3.1 Theoretical annual ground temperature distribution.

This graphic example showing the depth of zero temperature amplitude. The blue triangle indicates the geothermal gradient.

The depth at which T_{UGT} is found or at which thermal disturbances from the surface are not perceived is called the depth of zero temperature amplitude and it defines the boundary between thermocline and the thermostatic zones, where the geothermal gradient can be observed (Raymond et al., 2016).

Usually, estimation of the depth of zero temperature amplitude requires monitoring ground temperature profiles at different depths on a yearly basis (Kusuda et Achenbach, 1965; Costello, 1983; Andújar Márquez et al., 2016; Badache et al., 2016), which we want to avoid here to fulfill the TRT practice (Gehlin et Spitler, 2015; Raymond et al., 2017; Pambou et al., 2019; Antelmi et al., 2020; Giordano et al., 2021). For this new method, the acquisition and analysis of ground temperature observations need to be short enough for the test to be reasonably implemented during prefeasibility studies of ground-coupled heat pumps.

Additionally, analysis of the daily ground temperature distribution during seasonal or yearly observations have revealed a near surface depth from where the initial temperature amplitude is damped in the thermocline zone (Kusuda et Achenbach, 1965; Taniguchi, 1993; Holmes et al., 2008; Xing, 2014; Badache et al., 2016). From that damping depth, the wave of the oscillatory

surface temperature begins a linear attenuation with depth in the interval located before the thermostatic zone (Figure 3.2).

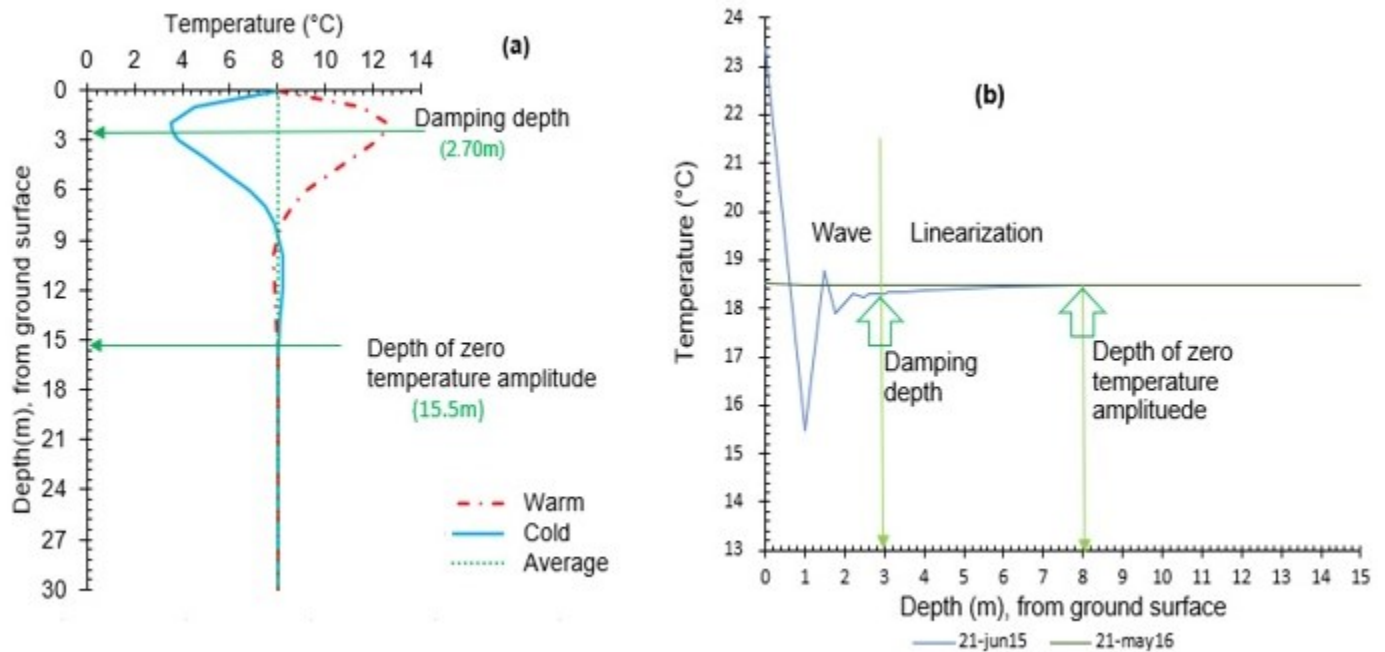


Figure 3.2 Annual ground temperature distribution.

Graphical example showing the damping depth and the depth of zero temperature amplitude, with (a) annual ground temperature profile span and (b) components of the daily oscillatory ground temperature influenced by surface temperature variations diffusing in the shallow subsurface.

A practical approximation ratio is used to evaluate the damping depth by considering the depth where the surface temperature amplitude is reduced to e^{-1} ($1/2.718 = 0.37$) of its initial value (Kusuda et Achenbach, 1965; Holmes et al., 2008; Adeniyi et al., 2012; Gwadera et al., 2017; Wang et al., 2020; Franco et Conti, 2020). Beyond the approximation ratio approach, several other mathematical equations have been proposed to evaluate the damping depth. Those are based on the sinusoidal propagation of surface temperature changes in the ground, the mean ambient temperature, or the temperature amplitude variation with depth/time (Stallman, 1965; Eskilson, 1987; Nassar et Horton, 1990; Holmes et al., 2008; Xing, 2014; Naranjo-Mendoza et al., 2018; Wang et al., 2020). The mathematical formulations are, for instance, the amplitude decay method, the phase lags method, or the inverse slope of a linear regression method (Droulia et al., 2009; Gwadera et al., 2017; Cho et lahm, 2018). Additionally, Stallman et Gold (1965), Taniguchi (1993), and Tong et al. (2017) proposed an analytical parameter method to compute damping depth based on its dependence on subsurface thermal properties (TD, TC and HC) and

hydraulic properties (porosity and Darcy flux). However, these listed approaches require a series of ground temperature profile measurements which is time consuming and less attractive when considering the scope of a TRT.

Therefore, a new empirical equation is proposed to compute the damping depth (Equation (5)) from an observed ground temperature profile. It relies on empirical coefficients found by least square method with a solver applied to reproduce the ground temperature profile with calculations. This new empirical equation is described below and was obtained through analysis of the temperature profiles previously acquired during the field implementation of Pambou et al. (2019). Furthermore, it was tested against the sites used by Kusuda et Achenbach (1965) and Xing (2014). In this work, the application of the method is shown for TD and HC assessment in the scope of a TRT.

3.2.2 Model Assumptions and Parameter Estimation Procedure

In this study, it was assumed that an accurate observed T_{UGT} value can be found by averaging ground temperature profile measured in the thermostatic zone (Gehlin et Nordell, 2003; IEA ECES ANNEX21, 2015; Gehlin et Spitler, 2015; Badache et al., 2016; Raymond et al., 2017). Thermal disturbances caused by surface temperature variations spread by transient heat diffusion in the semi-infinite isotropic and assumed homogeneous subsurface (Kusuda et Achenbach, 1965; Horton et al., 1993; Xing, 2014; Andújar-Márquez et al., 2016; Badache et al., 2016; Gwadera et al., 2017). The latter implies that the diffusion of surface temperature variations can be described by a sinusoidal function or an exponential form of the one-dimension solution governing heat conduction (Kusuda et Achenbach, 1965; Horton et al., 1983; Cui et al., 2011; Xing, 2014; Andújar- Márquez et al., 2016; Gwadera et al., 2017).

Theoretical and field results have demonstrated that in situ TD could be evaluated using ground temperature profiles measured in the borehole (Kusuda et Achenbach, 1965; Horton et al., 1983; Andújar Márquez et al., 2016). Usually, a general equation of the heat conduction or conduction-advection solution is applied to generate ground temperature profiles that are fitted to the observed ground temperature profiles.

Thus, in this project, a ground temperature profile ($T_{obs}(z)$) is measured in the BHE before carrying out a TRT. Then, a heat transfer equation can be applied to the observed ground temperature profile, considering TD as an unknown parameter. With this assumption in mind, an empirical equation (Equation (5.1)) was developed to calculate a normalized ground temperature profile ($T_g(z)$) of the observed ground temperature ($T_{obs}(z)$), in which it is possible to evaluate a damping

depth (Z_{dd}) to infer TD by common analytical equation and the calculated undisturbed ground temperature (C_1) at the depth of zero temperature amplitude.

A trial-and-error approach could be used to retrieve and approximate C_1 and Z_{dd} , but the analysis would be time consuming when considering the scope of a TRT. Therefore, a heat transfer equation (Equation (3.2)) related to the surface temperature variations and a solver optimization (Equation (3.3)) are suggested as the fastest method to accurately find C_1 and Z_{dd} values. These results are subsequently validated using Equation (3.4) and the curve-fit of the observed temperature against normalized depth-temperature profiles.

Detailed explanations of each equation used in this proposed heat tracing method are presented in the following subsection.

3.2.2.1 Calculated Undisturbed Ground Temperature profile

A new empirical heat conduction equation (Equation (3.1)) was developed with the goal of calculating a normalized ground temperature profile at any depth z considering the entire length of the BHE. This proposed equation could be used to approximate the one-dimensional solution of the governing heat conduction equation considering a surface temperature diffusion in the half-infinite medium (Kusuda et Achenbach, 1965; Horton et al., 1983; Eskilson, 1987; Andújar-Márquez et al., 2016). The proposed equation was described with an exponential form to normalize each observed ground temperature measurement that made an equilibrium ($T_{obs}(z)$) and it is defined as:

$$Tg(z) \cong \frac{C_1}{T_{bot}} \times T_{obs}(z) + 0.24615 \times e^{\left[0.001257 \cdot \frac{Z_{dd}}{L_{obs}}\right]} \quad (3.1)$$

where T_g (°C) is the normalized ground temperature at depth over the entire length of the BHE, C_1 (°C) is the average ground temperature at the depth of zero temperature amplitude, T_{obs} (°C) and T_{bot} (°C) are the observed temperature at any depth and at the bottom of the borehole, respectively, Z_{dd} (m) is the damping depth and L_{obs} (m) is the length of the borehole surveyed.

Each ground temperature value calculated using Equation (3.1) is assumed to be a normalized value of the measured ground temperature at each depth over the entire length of the BHE.

Applying the heat balance concept, it is assumed that Z_{dd} and C_1 are integrated parameters of the thermocline zone (Figures 3.1 and 3.2) and the interpolated undisturbed ground temperature at the depth of zero temperature amplitude when considering one-dimension heat conduction, respectively (Raymond et al., 2015; Badache et al., 2016; Márquez et al., 2018; Cho et Lahm, 2018). Therefore, an equation can be used as an upper boundary condition to describe the

surface temperature variations transferred to the subsurface by oscillatory heat diffusion (Carslaw et jaeger, 1947; Chouinard, 2008; Holzbecher, 2005; Xing, 2014; Gwadera et la., 2017; Márquez et al.,2018; Lamarche et al., 2018; Giordano et al., 2021). Thus, a new equation was defined to calculate a ground temperature, as sinusoidal function of the heat diffusion:

$$T_{calc}(z) \cong C_1 + C_2 \cdot e^{(C_3 - C_4 \cdot z)} \text{SIN} \left[2\pi - \frac{z}{0.6027315 \cdot C_3 + C_4} \right] \quad (3.2)$$

where C_1 (°C), C_2 (°C), C_3 (m) and C_4 (m) are experimental coefficients that can be found by using a non-linear solver optimization (Equation (3.3) related to the objective function (OF) and defined as:

$$OF = \sum_1^N \frac{1}{T_{obs}(z)} [T_{obs}(z) - T_{calc}(z)]^2 \quad (3.3)$$

where OF (°C) is the sum of the squared residual computed from the difference between observed and calculated temperature at the same depth and 1 to N is the depth interval distribution covering the total length of the BHE.

The optimization function OF is validated when the bias error (BE) between C_1 and the T_{UGT} , inferred from the ground temperature profile measured in the BHE, is less than 5%, such that:

$$BE(C_1, T_{UGT}) < 5\% \quad (3.4)$$

and :

$$BE \text{ in } \% = \left(1 - \frac{C_1}{T_{UGT}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

3.2.2.2 Calculated Damping Depth

Using the experimental coefficients from Equation (3.2), Z_{dd} is computed by a newly proposed field correlation defined as:

$$Z_{dd} = 0.6027315 \cdot C_3 + C_4 \quad (3.6)$$

3.2.2.3 Calculated Subsurface Thermal Diffusivity

In situ TD can be inferred using the damping depth method, defined as (Costello, 1986; Nassar et Horton, 1990; Adeniyi et al., 2012; Andújar Márquez et al., 2016; Gwadera et al., 2017):

$$\alpha_{calc} \cong \frac{\pi (Z_{dd})^2}{P} \quad (3.7)$$

where α_{calc} ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) is the calculated effective thermal diffusivity of the subsurface and P (s) is the harmonic period for a radial frequency of the sinusoidal thermal penetration in the subsurface and is assumed as a year equal to $P = 31,536,000\text{s}$.

3.2.2.4 Calculated Subsurface Volumetric Heat Capacity

In situ HC is calculated directly from the analytical thermal diffusivity equation, with respect to the thermal conductivity inferred from a TRT done in the BHE [Gehlin et Spittler, 2015; Raymond, 2018; Raymond et al., 2017; Giordano et al., 2021]:

$$C_{\text{calc}} = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\alpha_{\text{calc}}} \quad (3.8)$$

where C_{calc} ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$) is the in situ heat capacity and λ_{eff} ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) is the effective thermal conductivity inferred from the TRT.

3.2.3 Quality of Parameter Estimation

Statistical parameter analysis was used to evaluate accuracy and efficiency of the correlation between observed and calculated temperature. Relative error (RE) and root mean square error ($RMSE$) were calculated as:

$$RE = \left(1 - \frac{y_{\text{calc}}}{y_{\text{obs}}}\right) \times 100 \quad (3.9)$$

and :

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_0^{\infty} \frac{1}{y_{\text{obs}}} (y_{\text{obs}} - y_{\text{calc}})^2 \right]^2 \quad (3.10)$$

where y_{obs} and y_{calc} are the observed and calculated parameters, respectively. N (–) is the total number of observations from the equilibrium temperature profile. RE (%) is an indicator of an overestimated (positive difference) versus an underestimated value (negative difference), while the $RMSE$ (–) indicates the deviation magnitude in the range value.

3.2.4 Stepwise Procedure for Parameter Estimation

The following stepwise procedure is suggested to summarize the parameter estimation analysis (Figure 3.3).

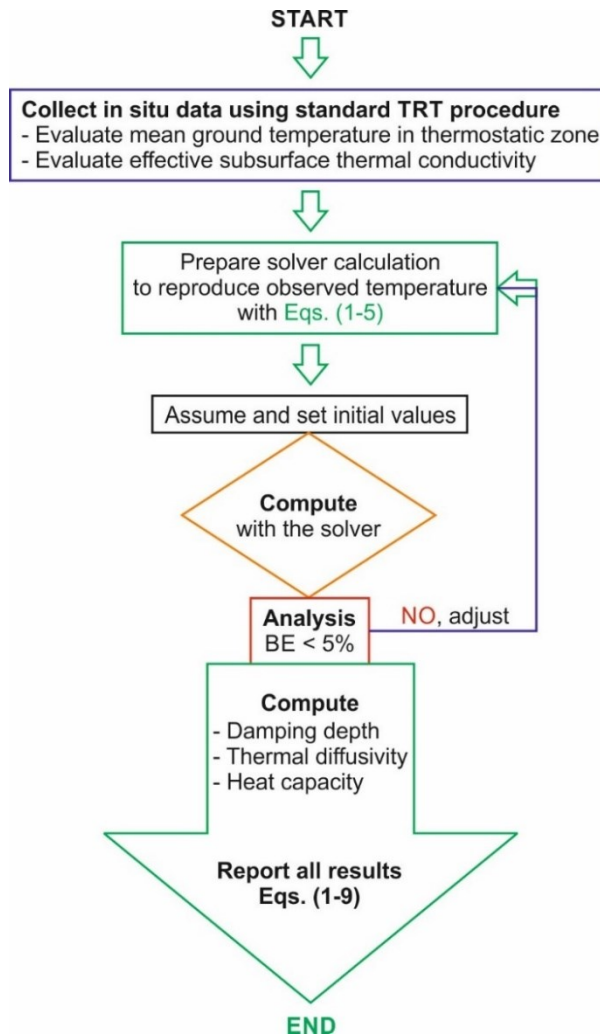


Figure 5.3 Procedure for assessing the in situ HC from a temperature profile undisturbed by a TRT and the in situ TC inferred from the TRT.

1. Accurately measure an equilibrium temperature profile ($T_{\text{obs}}(z)$) in a BHE and apply proper corrections for the rise of the water level in the U-pipe when using a wired probe as suggested by Pambou et al. (2019);
2. Perform a standard TRT and evaluate in situ TC;
3. Prepare the solver optimization to reproduce the normalized temperature profile ($T_g(z)$) through Equations (3.1) to (3.5);
4. Match the observed and calculated temperature profile using Equation (3.2) and refine the results by minimizing BE (Equation (3.4)), which describes the difference between T_{UGT} and $C1$;

5. Evaluate the quality of parameter estimation using statistical analysis (Equations (3.8) and (3.9)) and proceed to the next step when the results are within the best value range and thus considered acceptable by static analysis (Equations (8) and (9));
6. Calculate the damping depth Z_{dd} , in situ TD and HC (Equations (3.5)–(3.7)).

Microsoft Excel spreadsheet and its solver were used in this research to implement the equations, find the empirical coefficients by optimization and use the newly proposed method. The validation of the methodology is given in the next subsection.

3.2.5 Validation of the Proposed Method

The methodology proposed in this study was verified and validated by evaluating the in situ HC at the INRS geothermal experimental site in Quebec City (Figure 3.4).



Figure 3.4 Geothermal experimental site at INRS (Quebec City).

Numbers beside boreholes (obs and U) and along yellow lines indicate elevation of the water table in meters above the sea level and local potentiometric level, respectively See field set up in (Giordano et al., 2021) Obs are four open observation wells, while 1-U and 2-U are the borehole heat exchangers.

This geothermal experimental site was chosen for its scientific and technical interest due to the availability of BHEs and observation wells. In fact, several studies have been conducted at this site to improve the design of the BHEs and the methods for characterization of thermal properties

(Raymond, 2018; Raymond et al, 2017; Lamarche et al., 2018; Pambou et al., 2019; Márquez et al., 2018; Márquez et al., 2019; Giordano et al., 2021). For example, field measurements were performed with different equipment to accurately assess T_{UGT} (Raymond et al., 2017; Pambou et al., 2019; Márquez et al., 2018) and several types of TRT were carried out in different seasons (fall, winter, summer) to infer TC and borehole thermal resistance (Raymond et al, 2017; Lamarche et al., 2018; Pambou et al., 2019; Márquez et al., 2018; Giordano et al., 2021) (see Figure 2.5, for an example of field setup).

Recently, other research of interest was made to evaluate heat flux density (Márquez et al., 2019), subsurface hydrothermostratigraphic log and groundwater flow (Pambou et al., 2019), as well as in situ HC evaluation by analytical equations and numerical modeling (Giordano et al., 2021).

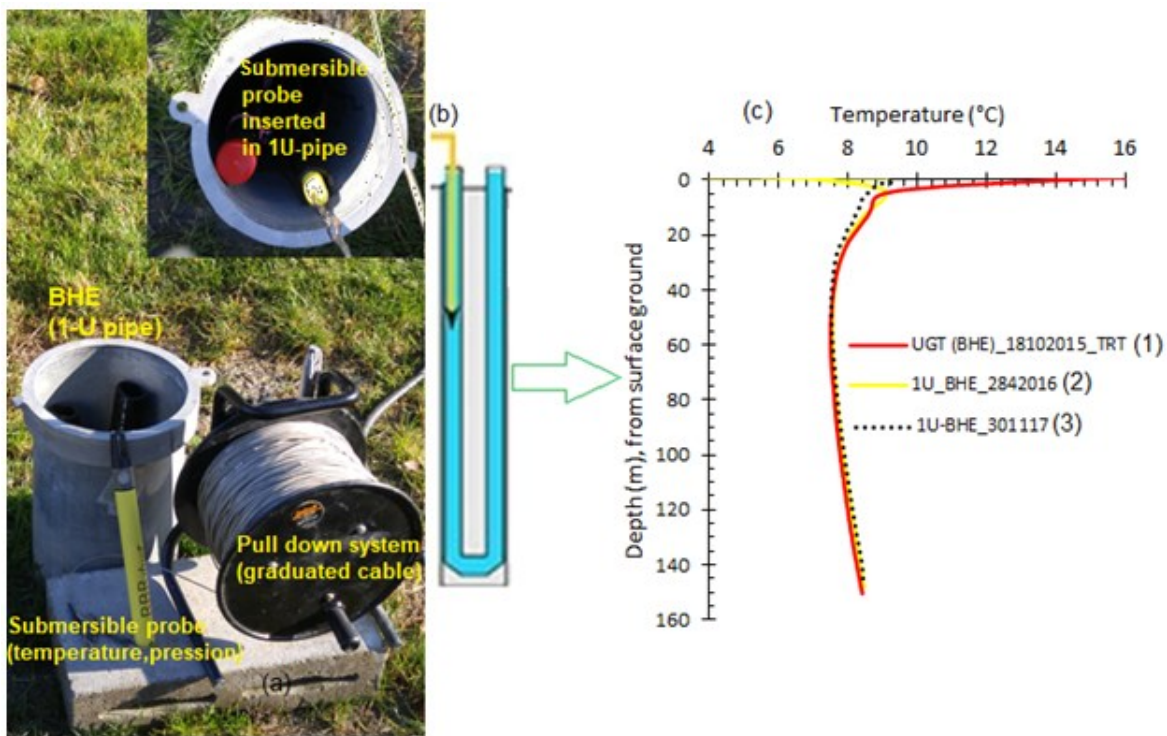


Figure 3.5 Ground temperature profiling at INRS geothermal experimental site (Quebec).

Field equipment (a) with examples of (b) how to conduct measurements in the single U-pipe BHE and (c) results of observed ground temperature profiling; (2) and (3) are uncorrected for water level rise in the 1-U pipe, while (1) is corrected, respectively (see field protocol in Pambou et al. (2019).

3.2.5.1 Borehole Heat Exchanger and Site Description

The INRS geothermal experimental site has two BHEs (1U-pipe and 2U-pipe) and five observation wells (Obs) that were installed from 2015 (Raymond et al., 2017) to 2020 (Giordano et al., 2021). The single U-pipe BHE used in this study has a diameter of 114 mm (4.5 in) and is

grouted with a mix of bentonite and silica sand down to the entire depth of 154 m. The subsurface described at the site of INRS consists of shale bedrock under an overburden of 10 to 14 m in thickness (see Figure 5.6, for the stratigraphy at the location of the 1U-BHE).



Figure 3.6 Hydrothermostratigraphic log of the 1UBHE at the INRS experimental site.

The layered TC is done using analysis method from Pambou et al. (19) and the geological cross-correlation based on borehole logs from Raymond et al. (10).

The shale bedrock is fractured and groundwater fluxes were inferred in the fractured zones (Raymond et al., 2017; Márquez et al., 2018; Pambou et al., 2019). At the site, elevation of the water table varies from 14 to 16 m above sea level with northeast flow direction towards the Saint-Charles River (Figure 3.4).

3.2.5.2 Field Validation

Assessment of the mean T_{UGT} is required to validate experimental coefficients C_1 to C_4 using the criterion described in the Equation (3.4). The first step involved estimating the mean T_{UGT} from temperature profiles measured at equilibrium state. The ground temperature profiles were acquired in 2015 and 2016 before the TRT, respectively (Raymond et al., 2017; Márquez et al.,

2018; Pambou et al., 2019). Two techniques were used for the temperature measurements. One was based on a submersible wired probe using a vertical spatial resolution of 1 m. The second was based on a fiber optic distributed temperature sensor with a spatial resolution of 0.25 m (Márquez et al., 2018; Márquez et al., 2019). The temperature measurements made with a wired probe were corrected for the rise of the water in the U-pipe of the BHE (Pambou et al., 2019). In the second step, the coefficients C_3 and C_4 were used to calculate the damping depth Z_{dd} and effective in situ TD and HC. The bulk TC previously estimated from a conventional TRT performed at this field site (Raymond et al., 2017) was used for the evaluation of HC. Additionally, the in situ HC estimated with the approach developed in this work was consecutively compared to the results obtained for the in situ HC determined by Giordano et al. (2021). The approach developed by these authors to evaluate in situ HC is briefly described in the following lines to facilitate understanding and comparison.

Giordano et al. (2021), at first, evaluated HC following the dual needle probe concept suggested in Raymond (2018), using the 1-U BHE and the observation well (obs4; Figure 3.4). This allowed to independently assess the in situ HC and validate the OTRT method. The TRT was performed with a heating cable and temperature sensors in both the BHE and the observation well located 1.2 m apart. Temperature sensors were placed in the observation well at vertical distances varying from 2.5 to 5 m. The analysis was performed with the infinite line source equation and results from this test can be assumed as the most reliable field assessment of the in situ HC. As a second step, Giordano et al. (2021) performed a sinusoidal heat injection for the OTRT based on Oberdorfer protocol (2014). The oscillatory thermal response was analyzed with equations proposed by Eskilson (1987). In situ TC was inferred using the infinite line source equation applied to the linear temperature component as in a conventional TRT (Sakata et al., 2021; Raymond, 2018; Raymond et al., 2017; Pambou et al., 2019). Then, in situ TD was calculated using the amplitude attenuation and the phase lag of the oscillatory component (Kusuda et Achenbach, 1965; Adams et al., 1976; Costello, 1986; Giordano et al., 2021). HC was then evaluated similarly to what was done in this article using Equation (2.7).

3.3 Results

The validity and applicability of the new heat tracing method presented in this work to assess the in situ HC are presented and discussed below. A comparison between calculated and observed temperature was carried out, as well as between inferred thermal properties using results from various field methods applied at the same experimental site and regional previous geological

characterization (Raymond et al., 2017; Lamarche et al., 2018; Pambou et al., 2019; Márquez et al., 2018; Márquez et al., 2019; Raymond et al., 2019; Giordano et al., 2021).

3.3.1 Estimation of Empirical parameters

3.3.1.1 Observed Undisturbed Ground Temperature

Equilibrium ground temperature profiles ($T_{\text{obs}}(z)$) measured in warm and cold seasons were used to accurately analyze and evaluate the in situ T_{UTG} (Figure 3.7). The evaluated T_{UTG} was estimated to vary between 7.90 and 8.01 °C using temperature measurements from the depth interval 15 to 154 m and considering the temperature profiles measured at different times of the year with a vertical spatial resolution of 1 m (submersible sensor (Raymond et al., 2017; Pambou et al., 2019) and 0.25 m (fiber optic, Márquez et al., 2019).

These profiles highlight the influence of the seasonal air temperature variations and the heat diffusion within the subsurface at the INRS experimental site. Two zones can be defined from the temperature profiles with analogy to Figures 3.1 and 3.2. These two zones are: the upper part which is influenced by the surface conditions (thermocline zone) and the lower part which is not affected by seasonal variations (thermostatic zone) but the geothermal gradient, on the order of 12.00 °C km⁻¹ (Figure 3.7; Márquez et al., 2019; Raymond et al., 2019). The temperature profiles acquired show an inverted gradient in the upper thermostatic zone (Figure 3.7). This inverted gradient can be due to recent climate warming (Holzbecher, 2005; Chouinard, 2008; Márquez et al., 2019). Finally, it can be observed that in the thermostatic zone, both the temperature profile from the observation well and from the BHE have the same behavior. These results are in a good agreement with the assumption of temperature diffusion by heat conduction in a homogeneous and isotropic media (Williams et Gold, 1976; Wagner et Clauser, 2005; Holmes et al., 2008; Badache et al., 2016; Gwadera et al., 2017; Radioti et al., 2017).

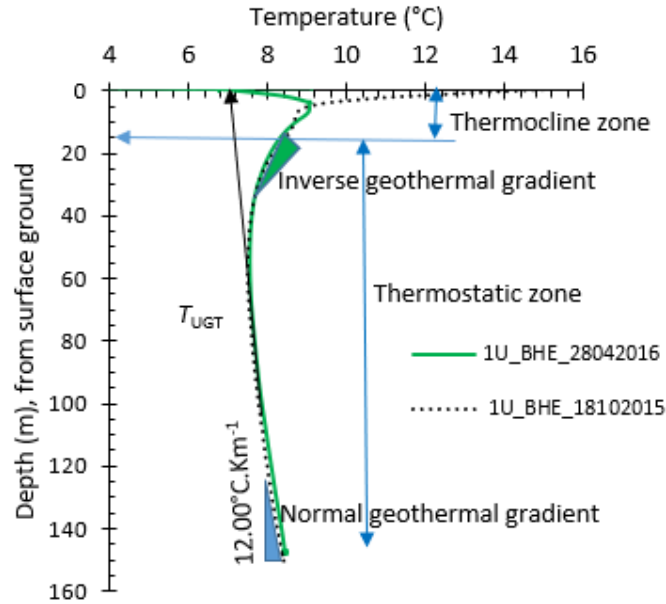


Figure 3.7 Observed undisturbed ground temperatures at the INRS experimental site.

3.3.1.2 Assessment of Empirical Coefficients

The T_{UTG} was evaluated using a single equilibrium temperature profile ($T_{obs}(z)$) measured in 2015 before a conventional TRT was done (Figures 3.4 and 3.7). The calculated T_{UTG} , which is assumed equal to C_1 , gave the value 7.96 °C. The absolute difference between measured mean ground temperature (7.90–8.01 °C) and the calculated T_{UTG} (or C_1) ranges between 0.69% and 0.57%. Such results indicate a low bias error (Equation (3.4)). Furthermore, these results are used to validate the empirical coefficients C_1 to C_4 found by the solver (Equations (3.3)) and (3.4; Table 3.1).

Table 3.1 : Experimental coefficients estimated from solver optimization (Equations (2) to (4)) applied on the temperature profile measured ($T_{obs}(z)$) in 2015 at the INRS experimental BHE before a TRT

Empirical Coefficient	Value
C_1 (°C)	7.96
C_2 (°C)	0
C_3 (m)	0.30
C_4 (m)	2.52

The results obtained suggest that calculated C_1 is similar to T_{UTG} evaluated from the measured temperature profile and is in the range of the validation criterion $BE < 5\%$. Moreover, the value C_2

equals to zero suggests that the calculated T_{UTG} (or C_1) is assessed close to the depth of zero temperature amplitude (Figures 1 and 2). Thus, these experimental coefficients C_3 and C_4 can be used for the next step to ultimately evaluate the in situ HC (Figure 3.1). The curve-fit between normalized ground temperature profile ($T_g(z)$) based on Equation (3.1) against the measured temperature profile ($T_{obs}(z)$) at equilibrium state during the TRT (Gehlin et Nordell, 2003; Raymond et al., 2017; Pambou et al., 2019) is plotted in Figure 3.8.

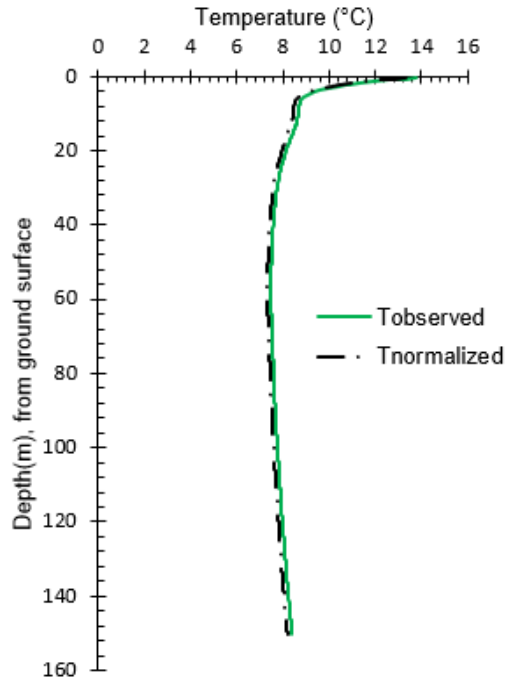


Figure 3.8 Normalized ($T_{normalized}$) and measured ($T_{observed}$) temperature profiles at the INRS experimental site.

3.3.2 Subsurface Thermal Diffusivity and Volumetric Heat Capacity

3.3.2.1 Damping Depth (Z_{dd}) and TD Estimation Using the New Empirical Method

The value of Z_{dd} (Equation (3.3)) was evaluated equal to 2.70 m. Thus, the resulting subsurface TD (Equation (3.6)) was inferred to $7.28 \times 10^{-7} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

1.1.1.1 HC Estimation Using the New Empirical Method

The conventional TRT done on this BHE revealed a bulk TC of about $1.75 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Raymond et al., 2017). Thus, the resulting subsurface HC (Equation (3.7)) is $2.40 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ (Table 3.2) when considering the above TD.

Table 3.2 : In situ TD and HC estimated (Equations (3.2) to (3.6) by applying the new heat tracing method on the temperature profile measured in 2015 at the INRS site before a TRT.

Parameter	Value	Description
C_1 ($^{\circ}\text{C}$)	7.96	Undisturbed ground temperature
Z_{dd} (m)	2.70	Damping depth
α_{calc} ($\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	7.28×10^{-7}	Thermal diffusivity
HC_{calc} ($\text{MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$)	2.40	Volumetric heat capacity

1.1.1.2 Comparison of Calculated Subsurface Heat Capacity with the Dual Needle Concept

The results, which are thought most accurate among Giordano field method (Giordano et al., 2021), are presented for each submersible temperature sensor inserted at different depths in the BHE and ground layer encountered in the observation well obs4 (Table 3.2).

Table 3.3 : Subsurface HC inferred with the new heat tracing method compared to the results obtained by (Giordano et al., 2011) using the dual needle concept at the INRS experimental site. Mean values of each method and mean relative difference in bold

Depth (m)	TRT with Observation Well HC ($\text{MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$)	New Empirical Approach HC ($\text{MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$)	Relative Difference (%)	Thermo-Geological Zone
5	2.81	2.40	14.59	Overburden (sediments)
7.50	2.67		10.11	
10	2.81		14.59	
12.50	2.75		12.73	
17	2.27		-5.73	Bedrock (shale)
22	2.48		3.23	
Mean	2.61	2.40	 10.16 	

Temperature measurements taken at a depth of about 22 m in the observation well obs4 (Figure 3.4) with the heating cable TRT were used to evaluate both in situ TD and HC (Giordano et al., 2021). Field results from dual needle concept were compared with those from this new heat tracing method using Equations (3.6) and (3.7) to infer the in situ HC (Tables 3.2 and 3.3). The average absolute discrepancy for the upper layer made of mixed unconsolidated sedimentary deposits and weathered shale (0 to 12.50 m) was 13.01%, while that for the lower layer made of shale (17 m to 22 m) was 4.48% (Table 3). The average absolute discrepancy considering both layers was 10.16% (Table 3.3; Figure 3.5). This difference between field results obtained at the same site using different methods was considered small enough, and therefore, this new heat tracing method was confirmed reliable (Table 3.3).

1.1.1.3 Comparison of Calculated Subsurface Heat Capacity with OTRT Method

Results from this new heating tracing method were also compared with results from the OTRT method of Giordano et al. (2021) (Table 3.4). Absolute discrepancy when considering the HC evaluated with the oscillatory resistance method and phase shift method was found to be greater than 26% compared with this new empirical approach (Table 3.2 versus Table 3.4).

Table 3.4 : Subsurface HC inferred with the new heat tracing method compared to the results obtained by (Giordano et al.,2021) using the OTRT method at the INRS experimental site

Analysis Procedure	OTRT HC (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	New Empirical Approach HC (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	Relative Difference (%)
Thermal recovery period	2.16	2.40	-11.11
Oscillatory resistance	1.90		-26.32
Phase shift	3.56		32.58

The results obtained from the recovery period revealed an underestimated value on the order of 10%; while the difference with the oscillatory resistance analysis and from the phase shift analysis are out of 15%, respectively (Table 3.2 versus Table 3.4). The differences found in these values suggest that the OTRT may be affected by uncertainties, and it may be useful to use corrected factors to adjust the range of the values when evaluating in situ HC using the OTRT (Table 3.4).

The sources for such variability can be caused by, for instance, the HC of the grout filling the BHE (Giordano et al., 2021).

Despite some sources of uncertainty that need to be addressed, such as the influence of the backfilling material, the project made by Giordano et al. (2021) proposed alternative avenues to improve in situ assessment of subsurface HC. Analysis of results reveals that the concept used by Giordano et al. (2021) is straightforward but the implementation in the field of a sinusoidal heat injection can be complex and need specific analytical expertise, which is not always available. Finally, these results suggest that the new heat tracing method here developed and discussed below is, at present, more reliable than the OTRT and simpler than conducting a TRT with the dual probe concept requiring an observation well (Tables 3.2–3.4, Giordano et al., 2021).

3.4 Discussion and Conclusions

A novel one-dimensional heat tracing field method was developed and applied to accurately evaluate the undisturbed ground temperature ($T_{UGT} = C_1$) and the damping depth (Z_{dd}) of the surface temperature changes in the subsurface at the vicinity of the borehole heat exchanger (BHE). These values were used to infer the in situ thermal diffusivity (α_{calc}) and, subsequently, the in situ heat capacity (HC). The results were compared with other field methods undertaken at the same site. This comparison suggests that using this new empirical method in combination with the conventional thermal response test (TRT) to assess thermal conductivity (TD) can reduce uncertainty when characterizing heat storage properties. In other words, T_{UGT} and effective subsurface TD and HC can now be inferred with the new approach in the scope of a TRT over the geological materials intercepted by a BHE.

This empirical heat tracing method assumes transient heat conduction mechanism of the surface temperature variations diffusing through an isotropic and homogeneous semi-infinite medium (i.e., the subsurface in which an equilibrium temperature profile is measured). This newly proposed method uses least squares and a nonlinear solver optimization to fit the observed temperature profile and to find the experimental coefficients (C_1 to C_4). These parameters are incorporated in the new semi-analytical ground temperature sinusoidal function which is assumed to be an upper boundary condition of the heat conduction equation (Carslaw et Jaeger, 1947; Raymond et al., 2016; Tong et al., 2017; Márquez et al., 2018). This method thus relies on an accurate equilibrium ground temperature profile measured in a BHE before a TRT (Raymond et al., 2017; Pambou et al., 2019). The calculated experimental coefficients are used to evaluate a damping depth and an effective thermal diffusivity. The bulk heat capacity of the geological materials is afterwards estimated using a bulk in situ thermal conductivity inferred from a

conventional TRT. Evaluation of thermal conductivity was made in this article with the infinite line source equation but could be made with a numerical approach as suggested by other authors (Gehlin et Spitler, 2015; Raymond et al., 2016; Raymond, 2018; Naranjo-Mendoza et al., 2018; Cho et lahm, 2018; Miranda et al., 2021). This can help to better evaluate thermal conductivity but will not significantly change the assessment of thermal diffusivity and heat capacity, mostly relying on the determination of the empirical coefficients from an undisturbed temperature profile, in this newly proposed heat tracing approach.

The in situ heat capacity evaluated with the newly proposed method at the INRS experimental site in Quebec City was successfully compared to that inferred by other field methods (Tables 3 and 4) as a criterion of validation (Zschocke, 2005; Verdoya et al., 2007; Raymond et al., 2017; Giordano et al., 2021). Furthermore, these results were in the range of thermal properties for geological materials of the Quebec City area (Raymond et al., 2019). Hence, the obtained results validate the model assumptions and the parameter estimation procedure. Consequently, the stepwise implementation of this new method (Figure 3) can be conducted in the scope of ground-coupled heat pump system design (Gehlin et Spitler, 2015; Raymond et al., 2017; Raymond, 2018; Pambou et al., 2019; Antelmi et al., 2020; Giordano et al., 2021). Moreover, this method proposes a new damping depth equation which does not rely on the temperature amplitude as the previous methods adopted to evaluate the in situ thermal diffusivity (From Kusuda et Achenbach, 1965; Gwadera et al., 2017). In addition, the newly proposed heat tracing method does not rely either on prior knowledge of the subsurface heat flux (Raymond et al., 2016; Márquez et al., 2018; Miranda et al., 2021) or does not require time series of the annual temperature monitoring (Kusuda et Achenbach, 1965; Dec et al., 2009; Andújar Márquez et al., 2016; Badache et al., 2016; Gwadera et al., 2017). This is an advantage compared to previous damping depth methods used for the same purpose (Adams et al., 1976; Costello, 1986; Gwadera et al., 2017). Field measurements only require a single temperature profile that can be rapidly collected before a conventional TRT. This highlights the advantages and novelty of the proposed methodology when compared to the sampling steps required by other approaches using time series of ground temperature measurements (Kusuda et Achenbach, 1965; Zschocke, 2005; Verdoya et al., 2007; Dec et al., 2009; Andújar Márquez et al., 2016; Badache et al., 2016; Gwadera et al., 2017). Another field benefit is that the new method does not need an additional borehole when compared to the dual probe method experimented in the field at the scale of a BHE by Giordano et al. (2021). A practical advantage is also related to the mathematical formulation that can be easily implemented and optimized with a built-in solver found in a spreadsheet program. Considering one hour for the field setup and measurements with a wireline

temperature probe for a BHE of 154 m depth and a single analysis that should not require more than half an hour for data processing, the method can be qualified as fast when compared against commonly used field and laboratory methods (Andújar-Márquez et al., 2016; Gwadera et al., 2017; Raymond, 2018; Giordano et al., 2021).

Moreover, results obtained using this newly proposed heat tracing method depend on experimental coefficients that, in turn, rely on an accurate ground temperature profile measurement that was successfully reproduced at the INRS experimental site. Current practice is to infer the mean ground temperature from the measurements of a ground temperature profile that is acquired before a TRT and by lowering a submersible temperature datalogger in the BHE (Gehlin et Nordell, 2003; Gehlin et Spitler, 2015; Raymond et al., 2016; Raymond et al., 2017; Pambou et al., 2019). In some cases, measurements can be done with a 1 m spatial resolution over the length of the BHE that can reach 160 to 200 m. Measurements using a spatial resolution of 5 to 10 m are typically not good enough for this proposed method. Moreover, care should be taken with the field procedure by selecting an accurate temperature probe and by correcting the temperature profile for the water level rise when measured in a U-pipe (Pambou et al., 2019). For example, the submersible temperature sensor and pressure probe used in this study had a high accuracy and resolution, as well as: $\pm 2 \times 10^{-3}$ °C accuracy, $< 5 \times 10^{-5}$ °C resolution, $\pm 5 \times 10^{-4}$ dbar accuracy and $< 1 \times 10^{-5}$ dbar resolution.

It is worth highlighting that these results are obtained with the assumption of conductive heat transfer in a homogeneous and isotropic subsurface. However, a validation process through field-testing complemented by numerical modeling is recommended in case of a strongly heterogeneous and anisotropic subsurface or the presence of significant groundwater flow (Taniguchi, 1993; Wagner et Clauser, 2005; Verdoya et al., 2007; Antelmi et al., 2021).

As scientific contributions, this study puts forward a new damping depth equation and field estimation of thermal diffusivity and heat capacity relying on a single measured equilibrium ground temperature profile. It confirms that ground temperature profiles measured in borehole heat exchanger are an inexpensive source of data that can be analyzed to obtain more information on the subsurface thermophysical properties (Xing, 2014; Andújar Márquez et al., 2016; Gwadera et al., 2017; Raymond, 2018; Márquez et al., 2018; Miranda et al., 2020; Giordano et al., 2021). These contributions provide advantages for the design of ground-coupled heat pump systems by considering this heat tracing method as a complementary in situ tool for improving conventional thermal response test (Gehlin et Spitler, 2015; Raymond et al., 2016; Sakata et al., 2020; Raymond, 2018; Giordano et al., 2021).

4 CHAPITRE 4: TROISIÈME ARTICLE

Titre de l'article

Analyse numérique d'un log thermostratigraphique à partir d'un profil de température non perturbé mesuré dans un échangeur de chaleur géothermique

Auteurs :

Claude Hugo K. Pambou ¹, Jasmin Raymond ², Miora Mira Rajaobelison ³, Mafalda M. Miranda ⁴.
¹⁻²⁻³⁻⁴ INRS - Institut National de la Recherche Scientifique, 490 rue de la Couronne, Quebec City, QC , G1K 9A9, Canada,

Article soumis à une revue scientifique

Contribution des auteurs:

Le concept qui consiste à reproduire numériquement le profil de température observé dans l'ECG a été proposé par Raymond et al. (2015), en considérant un transfert conductif dans un sous-sol homogène, donc sans écoulement souterrain. Sur cette base, C.H.K Pambou a établi le nouveau concept en considérant un sous-sol hétérogène avec ou sans présence de l'écoulement souterrain. Cette nouvelle approche a été validée par J. Raymond. Les travaux sur le terrain et la modélisation numérique ont été réalisés par C.H.K Pambou avec la contribution de M.M. Rajaobelison et de M.M. Mafalda. Tous les auteurs ont participé à la rédaction de l'article.

Lien entre les articles précédents :

Ce chapitre a permis de présenter une nouvelle approche méthodologique qui a été utilisée pour simuler numériquement le profil de température mesuré dans l'ECG (article 1) puis d'évaluer le log thermostratigraphique du sous-sol recoupé par le forage dans lequel un ECG a été installé. Le résultat du profil de température recalculé semi-analytiquement (Chapitre 3) a permis de confirmer qu'il était possible de reproduire le profil mesuré sur toute la longueur de l'ECG pour inférer des propriétés thermophysiques, en utilisant par exemple la modélisation numérique. Cette innovation a été basée sur un retour d'expérience terrain (articles 1 et 2). Il se positionne comme une approche de solution intégrée alternative lorsqu'il n'est pas possible de recourir au traçage thermique de la restitution du TRT pour évaluer le log thermostratigraphique du sous-sol

au voisinage de l'ECG par la méthode analytique (article 1). L'utilisation des résultats obtenus dans les chapitres précédents, notamment comme des intrants pour la définition des conditions initiales et la validation des résultats, constitue également un lien fort avec les autres articles.

Abréviation

CT:	conductivité thermique effective
CO ₂ :	gaz carbonique
D:	dimension de la modélisation (géométrie)
ECG:	échangeur de chaleur géothermique
INRS:	Institut national de la recherche scientifique
MAAT:	moyenne annuelle de la température de l'air au sol
Obs:	puits d'observation ou piézomètre
SIN:	fonction sinus
TRT:	test de réponse thermique
U:	tuyau en U d'un échangeur de chaleur géothermique

Nomenclature

<i>C</i> :	capacité thermique ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)
<i>H</i> :	charge hydraulique (m)
<i>k</i> :	conductivité thermique ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
<i>q</i> :	flux de chaleur géothermique (W.m^{-2})
<i>q'</i> :	vecteur vitesse de Darcy (m.s^{-1})
<i>p</i> :	déphase de la diffusion de l'onde thermique dans les sous-sol (s) or (j)

t :	temps (s)
S_n :	pente de la variation de la côte topographique ($^{\circ}\text{C}.\text{m}^{-1}$)
S_T :	pente de la variation de la température de surface dans le temps ($^{\circ}\text{C}.\text{s}^{-1}$)
T :	température (K) or ($^{\circ}\text{C}$)
z :	profondeur (m)

Indices

<i>amp</i> :	<i>Amplitude</i>
<i>s</i> :	<i>Surface</i>
<i>ss</i> :	<i>sous-sol</i>
<i>w</i> :	Eau
<i>n</i> :	chiffre non défini

Symbole grec

α :	diffusivité thermique (m^2s^{-1})
ρ :	densité de l'eau (Kg m^{-3})

4.1 Introduction

L'utilisation des échangeurs de chaleur géothermique (ECG), verticaux couplés aux systèmes de chauffage et de climatisation, présente des avantages dans la réduction de la facture énergétique et permet de réduire les émissions de gaz à effets de serres pour plusieurs applications en ingénierie (Liu et al., 2018; Gehlin et Spitler, 2015; Pishkariahmadabad et al., 2021; Javidan et al., 2022). Néanmoins, la mise en marché de cette technologie émergente est confrontée à plusieurs défis stratégiques et opérationnels qui limitent son déploiement lorsque comparés à d'autres systèmes qui entrent en compétition (Asl et al., 2015 ; Gehlin et Spitler, 2015; Raymond, 2018; Berg et al., 2018; Hamm et al., 2021). Le coût initial de l'aménagement la pompe à chaleur géothermique (PACG) a été considéré comme l'un des principaux inconvénients en se basant sur le ratio de l'analyse coûts-avantages et le nombre d'années pour le retour sur investissement de ce levier technologique (Conti et al., 2013; Berg et al., 2018; Hamm et al., 2021; Kutzner et al., 2022). Ce coût serait principalement lié au nombre de forages requis pour disposer de la longueur adéquate de la PACG. La réalisation des tests de réponse thermique (TRT) et des essais en laboratoire pour évaluer les propriétés thermiques qui serviront à optimiser la longueur de la PACG engendre un coût important à assumer en début de projet (Conti et al., 2013; Robert et Gosselin, 2014; Liu et al., 2018; Raymond, 2018; Kutzner et al., 2022).

Par ailleurs, les travaux récents de Raymond et al. (2019), sur la cartographie des propriétés thermiques des formations géologiques des Basses Terres du Saint-Laurent, ont permis d'observer qu'une incertitude dans la plage de valeur attendue pour la conductivité thermique pour certaines unités du roc peut facilement doubler la longueur de forage requise pour suffire aux besoins énergétiques d'un bâtiment. Il apparaît donc qu'une erreur d'estimation minime peut engendrer un impact important sur le coût d'un projet d'aménagement de PACG sur ce territoire, dont les coupes de forages ou des observations sur des parois des tranchées ou des carrières ont révélé une stratigraphie hétérogène affectée par plusieurs zones fracturées (Pehme et al., 2013 ; Read et al., 2013; Klepikova et al., 2016 ; Bense et al., 2016) et parfois par des intercalations des dykes de roches magmatiques (Raymond et al., 2017; Jaziri et al., 2019; Pambou et al., 2019). Cependant, l'accès à cette information détaillée du sous-sol n'est pas possible lorsqu'un TRT est analysé avec la méthode de la pente graphique basée sur l'évolution de la température enregistrée durant le TRT conventionnel, en considérant un modèle de sous-sol homogène sur toute la longueur de l'ECG pilote et plus tard de la PACG à l'échelle globale (Gehlin et Spitler, 2015; Raymond, 2018). La raison est que cette hypothèse conceptuelle ne considère pas l'hétérogénéité des couches du sous-sol et la présence de l'écoulement souterrain

ou tout au moins considère que leur impact est négligeable sur la valeur de la conductivité thermique effective (Raymond et Lamarche, 2013; Gehlin et Spitler, 2015; Liu et al., 2018). Une telle hypothèse est acceptable en présence de faibles variations lithologiques recoupées par les ECGs ou en présence d'un écoulement souterrain ayant un très faible flux de Darcy (Liebel, 2011; Raymond et al., 2011c; Raymond et al., 2017; Pambou et al., 2019). Des observations sur le terrain ont par ailleurs montré que l'hypothèse de l'homogénéité ne pourrait pas expliquer la différence des résultats obtenus entre certains TRT réalisés dans le même site ou le fonctionnement disproportionné d'un ECGs toujours sur un même site (Pahud, 2001; Liebel, 2011). Pour réduire l'incertitude sur les résultats, une approche alternative serait par exemple, de réaliser en complément du TRT un essai de pompage et d'utiliser des méthodes d'analyses avancées afin d'évaluer les propriétés hydrauliques des couches traversées par le forage de l'ECG pilote (Fujii et al., 2009; Pehme et al., 2013; Lehr et Sass, 2014). Cependant, l'application de cette solution de terrain augmenterait les coûts d'essai, ce qui n'est pas souhaitable pour rendre les PACG plus attractifs. Il est donc apparu nécessaire de développer des méthodes de caractérisation détaillées du sous-sol afin de prendre en compte l'hétérogénéité et l'écoulement souterrain (Jaziri et al., 2019). Par exemple sur plusieurs projets, la mesure de la température à l'aide d'un câble à fibre optique insérée dans un ECG lors du TRT a été utilisée afin de caractériser, avec un intervalle de 0,25 à 1m, l'hétérogénéité du sous-sol et évaluer l'impact de l'écoulement souterrain (Fujii et al., 2009 ; Acuña et Palm, 2013; Hakala et al., 2014; Soldo et al., 2016; Hakala et al., 2022). Toutefois, cette technologie nécessite une expertise spécialisée et présente un coût important difficilement justifiable pour les projets résidentiels ou commerciaux de petite taille (Raymond, 2018). Par conséquent, l'obtention de profils de température autrement qu'avec la fibre optique a été explorée par Martos et al. (2011). Ceux-ci ont proposé de réaliser un TRT conventionnel et d'effectuer des mesures de température à l'aide d'une sonde submersible autonome, insérée dans le tuyau en U, qui circuleraient dans l'ECG. Cependant, cette technologie innovante nécessite l'utilisation de pièces spéciales de plomberie. Celles-ci ajoutent une complexité pour la mise en œuvre du TRT. Dans l'approche de réduction du coût du TRT conventionnel, Raymond et al. (2015) ont proposé de réduire le taux d'injection de chaleur dans l'ECG. Le principe consiste à utiliser le câble chauffant inséré dans l'un des tuyaux pour réchauffer l'eau dans l'ECG (Márquez et al., 2018; Zhang et al., 2020). Les mesures de température sont réalisées à l'aide de sondes submersibles de température fixées à certains points correspondant à des profondeurs présélectionnées. Des mesures en continue avec la fibre optique ont permis de confirmer la faisabilité de l'approche et la possibilité de caractériser l'hétérogénéité verticale du sous-sol et de l'écoulement d'eau souterraine (Márquez et al., 2018;

Zhang et al., 2020; Hakala et al., 2022). Malgré un potentiel significatif de réduction du taux d'injection de chaleur de 75 W m^{-1} à 9.8 W m^{-1} , avec tous les bénéfices potentiels attendus, certains défis ont été observés lorsqu'un câble chauffant en section est utilisé (Márquez et al., 2018; Zhang et al., 2020). Par exemple, la présence des cellules de convections a été observée aux jonctions des sections de câbles chauffants. Celles-ci contribueraient à bonifier la valeur de la conductivité thermique bien que ce ne soit pas le cas pour un câble chauffant continu (Raymond et al., 2015; Márquez et al., 2018; Zhang et al., 2020). Le choix stratégique de la distribution du pas de mesures, qui est liée à la profondeur de positionnement des sondes submersibles de température dans une section d'ECG, contribuerait également à l'incertitude sur les résultats (Raymond et al., 2015; Márquez et al., 2018; Zhang et al., 2020; Giordano et al., 2021; Hakala et al., 2022).

En utilisant une sonde submersible de bonne résolution attachée à un câble pour les mesures de la température et de la pression, Pambou et al. (2019) ont montré qu'il été possible d'inférer un profil thermostratigraphique du sous-sol avec une résolution spatiale de 1 m sur toute la longueur de l'ECG. Le principe consiste à mesurer quotidiennement un profil de température, durant l'étape de restitution thermique d'un TRT conventionnel, jusqu'à observer le retour à l'équilibre thermique du sous-sol au voisinage de l'ECG. Une limitation opérationnelle de cette approche est son lien avec le nombre de jours requis pour évaluer le retour à l'état d'équilibre thermique du sous-sol, à la suite de l'injection de chaleur durant la réalisation du TRT dans l'ECG. Cette durée de traçage thermique durant la restitution thermique peut varier de trois (03) à plus de cinq (05) jours, selon la lithologie du site (Kavanaugh, 2010; Kavanaugh, 2016; Raymond et al., 2017). Ce nombre de jours de mesurage constitue un coût supplémentaire en comparaison avec l'analyse conventionnelle du TRT par la méthode de la pente graphique qui requiert uniquement des mesures de températures durant trois jours d'injection de chaleur (Gehlin et Spitler, 2015; Raymond et al., 2017; Giordano et al., 2021).

Diverses autres approches d'analyse du TRT ont été développées mais celles-ci sont complexes, donc moins utilisées dans le secteur, comparativement à l'analyse conventionnelle du TRT par la méthode de la source linéique infinie (Yang et al., 2010; Raymond et al., 2011c; Raymond et Lamarche, 2013; Gehlin et Spitler, 2015; Raymond, 2018; Franco et Conti, 2020). C'est par exemple, l'utilisation de la modélisation numérique pour reproduire les températures des fluides durant les deux phases du TRT en considérant un modèle hétérogène ou l'écoulement d'eau souterraine (Raymond et al., 2011c; Raymond et al., 2013; Choi et al., 2013). La méthode du choc thermique par injection pulsée de l'eau réchauffée ou la méthode de l'analyse du temps de

relaxation durant le TRT sont d'autres approches qui ont été proposées afin d'améliorer la caractérisation du sous-sol (Lanini et Nguyen, 2009; Chae et al., 2020). Toutes ces approches n'ont pas à ce jour été fortement utilisées dans le secteur à cause soit des coûts ou soit de la complexité opérationnelle sur le terrain et dans l'analyse des données. Par conséquent, le besoin d'une méthodologie alternative basée sur l'utilisation des outils avancés mais peu onéreux et facile d'implémentation dans les standards du secteur est demeuré nécessaire et d'actualité.

À cet effet, les récentes avancées dans la modélisation numérique ont montré qu'il était facile d'implémenter des solutions peu complexes capables de fournir des résultats probants dans un délai de simulation raisonnable (Raymond et Lamarche, 2013; Gehlin et al., 2015; Raymond et al., 2016; Márquez et al., 2018; Mafalda et al., 2021; Rajaobelison et al., 2021). Fort de cela, la réponse du troisième objectif spécifique de ce projet a été montée sous la forme d'une solution numérique permettant de reproduire le profil de température afin de caractériser l'hétérogénéité du sous-sol et de l'écoulement souterrain et finalement d'inférer un profil thermostratigraphique fiable au voisinage de l'ECG. L'idée est de ne pas recourir à des mesures actives de profils de température dans l'ECG durant la phase de restitution du TRT ou à des mesures avec la fibre optique, lorsqu'il n'est pas possible ou nécessaire financièrement de collecter les données par traçage thermique durant le TRT. En d'autres termes, il s'agissait de développer un modèle capable de renseigner sur l'information géologique, hydrogéologique et thermique du sous-sol en se servant du profil de température comme un matériel mémoire de la diffusion thermique et du transfert hydraulique dans le sous-sol (Klepikova et al., 2011; Raymond et al., 2011c; Lee et Lam, 2012; Raymond et Lamarche, 2013; Pehme et al., 2013; Read et al., 2013; Lehr et Saas, 2014; Raymond et al., 2015; Klepikova et al., 2016; Yoshioka et al., 2017). Le principe de l'approche de solution proposée consiste à reproduire, par des simulations numériques, un profil de température mesuré à l'équilibre sur toute la longueur de l'ECG en considérant un modèle de sous-sol hétérogène et qui soit capable de considérer la présence de l'écoulement souterrain (Fujii et al., 2009; Klepikova et al., 2016; Sakata et al., 2021). La modélisation numérique en éléments finis est dans une première étape réalisée avec un modèle unidimensionnel (1D) en considérant un transfert de chaleur uniquement conductif. Dans une seconde étape, réalisée en modèle bidimensionnel (2D), le transfert de chaleur conductif est couplé au transfert advectif afin de considérer l'impact de l'écoulement souterrain (Lee et Lam, 2012; Choi et al., 2013). Cette analyse par modélisation numérique a permis de développer une approche innovante d'analyses des propriétés thermophysiques du sous-sol avec un modèle hétérogène par comparaison à la méthode conventionnelle qui utilise une procédure analytique basée sur un modèle homogène

sans prise en compte de l'écoulement souterrain au voisinage de l'ECG (Gehlin et Spitler, 2015; Franco et Conti, 2020). L'ECG pilote construit sur le site expérimental de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS, Québec) a été utilisé comme un exemple d'application de la nouvelle méthode proposée (Raymond et al., 2017; Ballard et al., 2019).

4.2 Présentation du site de l'ECG

Le site géothermique expérimental de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) est situé à Québec, dans la province du Québec au Canada (Figure 4.1).



Figure 4.1 Site expérimental de l'INRS (Québec).

Le site dispose de 2 ECGs (1 tuyau en U et 1 double tuyau en U) en plus de 5 puits d'observation (Obs). Notons que le Obs3 est situé à 1.2 m de l'ECG (1U). Le profil de température utilisé pour ce projet travail a été mesuré dans l'ECG 1-U. Les cotes isopiezés (15 m à 17 m) ont été considérées pour les conditions frontières (charge hydraulique) du modèle numérique présenté ci-dessous.

Ce site expérimental dispose de deux ECGs et 5 puits d'observations qui ont été utilisés pour évaluer les paramètres thermophysiques du sous-sol. Par exemple, l'évaluation in situ de la conductivité thermique a été réalisée à partir de TRT en considérant plusieurs approches: TRT

conventionnel (Raymond et al., 2017), TRT avec un câble chauffant et des mesures simultanées avec la fibre optique et des sondes submersibles (Márquez et al., 2018), TRT avec injection de chaleur en mode oscillatoire (Giordano et al., 2021), analyse avec un modèle hétérogène de l'étape de la restitution de température du TRT conventionnel (Pambou et al., 2019). D'autres projets, réalisés sur le même site, ont permis d'évaluer de façon in situ la capacité thermique et la diffusivité thermique (Giordano et al., 2021; Pambou et al., 2022). Le flux de chaleur terrestre, le flux de Darcy dans les zones fracturées et le profil de conductivité thermique ainsi que la coupe thermolithostratigraphique ont été également évalués de façon in situ (Márquez et al., 2018; Pambou et al., 2019). Toutes ces données disponibles ont été utilisées pour valider les conditions aux limites et l'ensemble des résultats obtenus à partir de la nouvelle méthode basée sur la simulation numérique et qui a été présentée dans ce manuscrit.

4.2.1 Géologie du site et synthèse thermostratigraphique

La géologie, les zones fracturées et les conditions hydrogéologiques sur le site sont présentées dans la coupe thermostratigraphique (Figure 4.2). Pour la simplification du modèle numérique, les différentes unités recoupées par le forage sur 164m de profondeurs ont été regroupées comme suit :

- (1) l'unité géologique 1, sommital (0 à 14 m), est un mort-terrain mixte composé de till, des galets et une petite épaisseur de dépôt d'argile qui repose sur le shale altéré.
- (2) l'unité géologique intercalaire (14m à 120m), est composée de shales gris, fracturé du groupe de Sainte-Rosalie (Formation de Les Fonds). Trois (03) zones fracturées ont été identifiées et décrites (Pambou et al., 2019; Ballard et al., 2016).
- (3) l'unité géologique basale (120 à 164m) est composée de shales gris et shales gris-noir du groupe de Sainte-Rosalie (Formation de Les Fonds). Une seule zone fracturée a été identifiée et décrite (Pambou et al., 2019).

Toutes ses formations lithostratigraphiques ont été attribuées au Groupe de Sainte-Rosalie qui constitue une des unités géologiques de couverture des Basses-Terres du Saint Laurent décrite dans la Région de Québec (Globensky, 1987; Majorowicz et Minea, 2012; Raymond et al., 2017; Bédard et al., 2017)

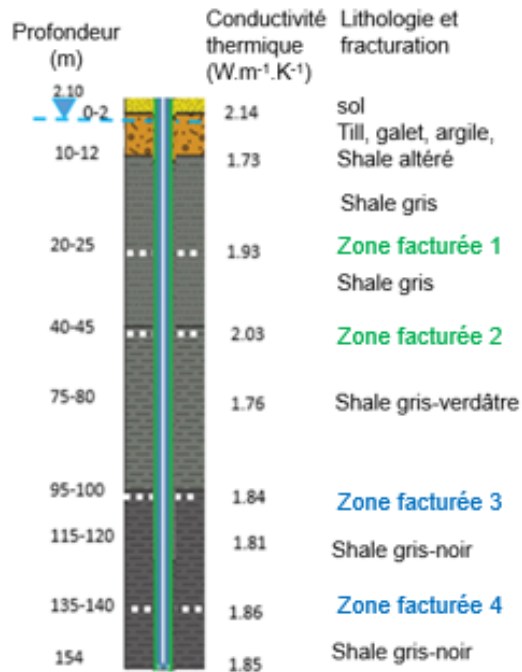


Figure 4.2 Coupe thermostratigraphique au voisinage de l'ECG (1U) sur le site expérimental de l'INRS (Québec).

Tous les ECGs et les Obs ont traversé une lithologie similaire avec quelques variations d'épaisseur. L'écoulement souterrain dans les zones fracturées 1 et 2 a aussi été déduit sur les puits d'observations Obs 1 et 2 lors des opérations de forage (profondeur 20-25 et 40-45m, respectivement tandis que les zones fracturées 3 et 4 ont été confirmées par le profilage thermique durant les TRT (11-12).

Par ailleurs, l'analyse de cette coupe a permis d'observer que le sous-sol au voisinage de cet ECG pouvait être considéré comme un milieu hétérogène avec une présence de l'écoulement souterrain dans les zones fracturées, donc utilisable pour implémenter la solution proposée dans ce projet.

4.2.2 Profils de température observés

Sur ce site, deux profils de température de bonne résolution, mesurés respectivement en 2015 et 2016, ont été utilisés pour des travaux de recherche en géothermie (Raymond et al, 2017; Márquez et al., 2018; Pambou et al., 2019). Celui mesuré en 2015 a été réalisé avec une sonde submersible attachée à un câble gradué (résolution spatiale de 1 m) tandis que celui de 2016 a été mesuré en utilisant la fibre optique (résolution spatiale de 0.25m). Les deux ont été mesurés avant la phase d'injection de chaleur des TRT. Ces profils de température sont considérés en

état d'équilibre thermique avec les unités géologiques traversées par l'ECG (Gehlin et Spitler, 2015; Raymond, 2018; Kavanaugh, 2010).

Pour ce projet, le profil de température d'équilibre de 2015 a été utilisé pour évaluer la température du sous-sol non perturbée par un calcul de la moyenne arithmétique en considérant uniquement la portion du profil de température située dans la zone non perturbée (Boban et al., 2018 ; Ballard et al., 2016; Pambou et al., 2022). Il a aussi été utilisé comme observation de terrain que l'on a tenté de reproduire avec les modèles numériques.

4.2.3 Profil de conductivité thermique et flux de chaleur

Les travaux de Pambou et al. (2019) ont permis de disposer d'un profil de conductivité thermique qui présente une bonne corrélation avec le modèle géologique et hydrogéologique défini à partir de la coupe de forage. Ce dernier a été évalué par une méthode analytique appliquée à des profils de température mesurés dans l'ECG durant la phase de restitution thermique à la suite d'un TRT. La valeur effective de la conductivité thermique évaluée par le calcul arithmétique (1.79 à $1.82 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) sur la longueur totale du profil est similaire à la valeur effective de la conductivité thermique inférée in situ (1.71 à $1.75 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) à partir d'un TRT conventionnel (Raymond et al., 2017).

Pour le flux de chaleur, les travaux de Márquez et al. (2018) basés sur la simulation numérique 1D ont permis d'inférer une valeur effective du flux de chaleur terrestre (28.9 mW m^{-2}) à partir du profil de température mesuré en 2016 en utilisant la fibre optique. Le résultat obtenu a montré une bonne corrélation avec les données régionales provenant de la littérature (Majorowicz et Minea, 2012; Raymond et al., 2017; Márquez et al., 2018).

4.3 Méthodologie

4.3.1 Approche conceptuelle

L'approche d'évaluation de la conductivité thermique effective du sous-sol qui a été utilisée consiste à reproduire numériquement un profil de température observé dans un ECG. Le principe de base a été formulé par Raymond et al. (2015). Par la suite, Márquez et al. (2018) et Miranda et al. (2021) ont utilisé le même cadre conceptuel afin d'évaluer le flux de chaleur terrestre. Dans tous ces travaux pionniers, il a été considéré que l'ECG recoupe un sous-sol homogène, sans présence de l'écoulement d'eau souterraine. Le transfert de chaleur a été uniquement simulé par

conduction. Un solveur d'optimisation inverse a été utilisé en remplacement des itérations manuelles.

En utilisant le même principe conceptuel, une nouvelle méthode d'analyse numérique d'un log thermostratigraphique a été développée en considérant un sous-sol hétérogène (recoupé par l'ECG) et la présence de l'écoulement d'eau souterraine dans les zones de fractures ou dans les unités hydrostratigraphiques. Cette nouvelle approche a été réalisée en deux étapes :

A la première étape, des simulations de conduction de chaleur en 1D ont été effectuées de façon directe puis inverse pour reproduire le profil de température mesuré dans un ECG. Les conditions opératoires des simulations des transferts thermiques en modèle 1D étaient similaires à celles dans les travaux de Raymond et al. (2015), Márquez et al. (2018) et de Miranda et al.(2021), notamment pour les aspects suivants :

- les conditions aux frontières : une température de surface a été imposée au sommet de chaque modèle (condition frontière de Dirichlet, Figures 4.4 et 4.5). Un flux de chaleur uniforme, constant et unidirectionnel vers la surface a été imposé sur la limite basale du modèle (condition frontière de Neumann, Figures 4.4 et 4.5).
- le transfert de chaleur a été simulé uniquement par conduction en régime transitoire et un solveur d'optimisation inverse a été utilisé pour reproduire le profil de température observé.

En deuxième étape, les résultats du modèle 1D ont été utilisés comme intrants dans le modèle 2D. Ce dernier est composé des mêmes unités thermostratigraphiques et des zones fracturées considérées comme des drains hydrauliques pour l'écoulement de l'eau souterraine (Pehme et al., 2013; Hakala et al., 2014; Klepikova et al., 2016 ; Hakala et al., 2020). Ces dernières sont souvent des zones de perméabilité plus importante comparativement au reste de la matrice rocheuse dans le sous-sol (Read et al., 201 ; Klepikova et al., 2016; Jaziri et al.,2019). Cet écoulement souterrain a été observé dans les zones fracturées du sous-sol ou dans certaines unités géologiques perméables. Celui-ci n'a pas été pris en compte dans l'analyse qui utilise le modèle numérique 1D et dans l'analyse conventionnelle du TRT (Pahud, 2001; Yang et al., 2010; Gehlin et Spitler, 2015; Raymond, 2018).

Les modèles 2D ont été simulés en mode direct, en régime permanent ; et, en considérant que l'ECG est en équilibre thermique avec son encaissant durant le mesurage du profil de température observé (Kavanaugh, 2016). La prise en compte de l'écoulement souterrain dans

les zones fracturées a permis de considérer les transferts de chaleur en mode couplé conduction-advection afin d'utiliser le flux de Darcy (Lehr et Sass, 2014; Pambou et al., 2019; Rajaobelison et al., 2022).

La description des coupes de forage a servi pour la validation de base des différentes unités géologiques du sous-sol afin de définir la stratigraphie au site à l'étude pour ensuite définir les caractéristiques thermophysiques distinctes de chaque unité. Le profil de température observé dans l'ECG a quant à lui été utilisé pour valider les résultats de chaque étape de modélisation numérique.

Le logiciel commercial COMSOL Multiphysics qui utilise la méthode des éléments finis a servi pour réaliser les simulations numériques de transfert de chaleur 1D et 2D en mode direct et pour des simulations inverses 1D (Raymond et al., 2015; Márquez et al., 2018; Mafalda et al., 2021). Lors des simulations inverses 1D, l'enjeu a été d'évaluer le profil de conductivité thermique et le flux de chaleur terrestre par une superposition entre les profils de température observés versus simulés. Le processus a été réalisé par optimisation inverse, en utilisant l'algorithme Nelder-Mead implémenté dans COMSOL (Márquez et al., 2018; Mafalda et al., 2021). Ce dernier utilise une approche peu complexe basé sur l'évaluation du minimum et du maximum de la valeur des propriétés thermophysiques ciblées, jusqu'à son optimum plausible, en considérant les critères de convergence, le nombre d'itérations spécifiées et l'incertitude tolérée (Figure 4.3 et Tableau 4.1).

Toute la procédure d'intégration requise, pour la mise en œuvre de cette nouvelle méthode de modélisation numérique, a été présentée dans un schéma décisionnel qui montre également les étapes à réaliser (Figure 4.3).

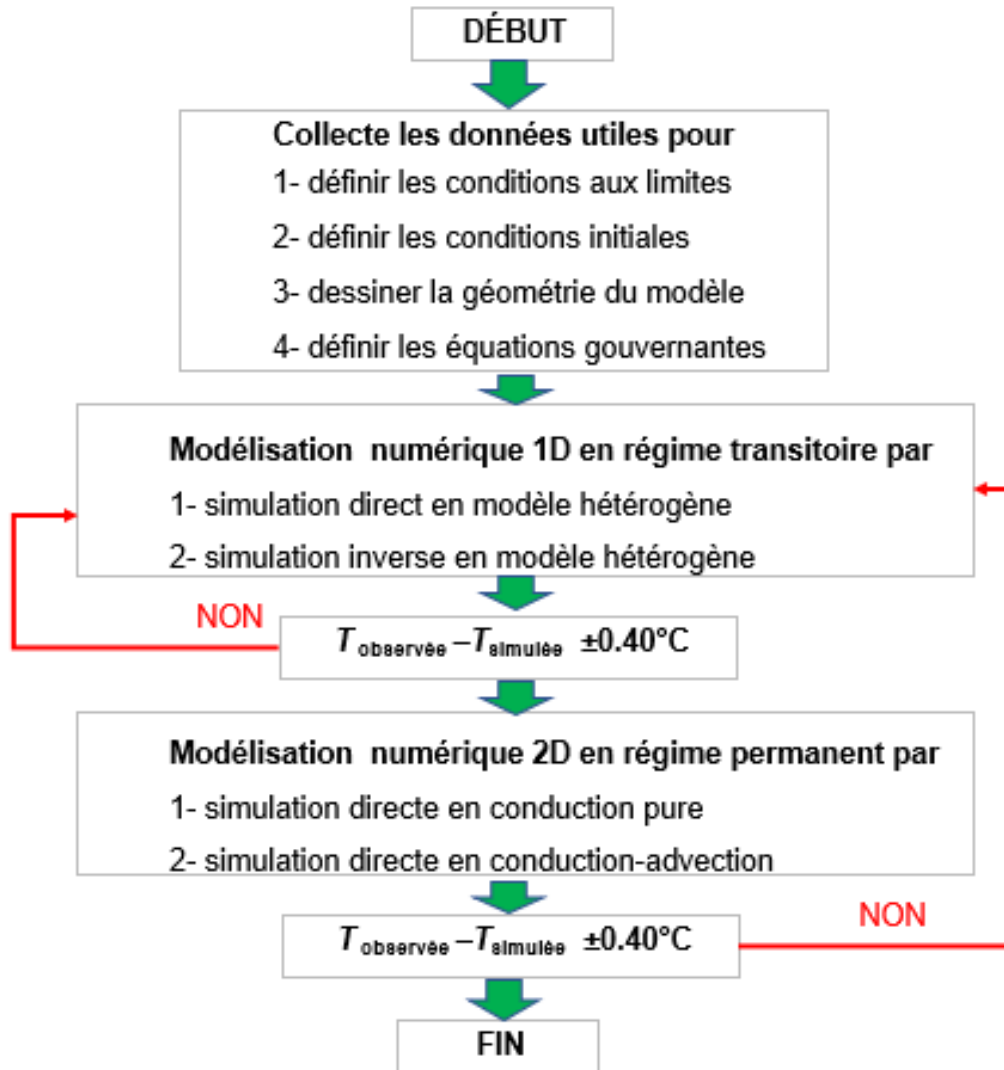


Figure 4.3 Étapes méthodologiques suivies pour l'analyse numérique.

4.3.2 Modèle numérique 1D pour l'analyse thermostratigraphique

À cette étape, le phénomène physique simulé est la diffusion par conduction de la perturbation de la température de surface dans le sous-sol. L'équation gouvernante 1D (coordonnées cartésiennes, sans dispersion, ni production interne d'énergie) utilisée a permis de décrire le transfert de chaleur en mode transitoire dans le sous-sol comme suit :

$$\frac{z_n}{\alpha_n} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4.1)$$

dans laquelle $\alpha_n = \frac{k_n}{C_n}$ est la diffusivité thermique effective du sous-sol ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), k_n est la conductivité thermique effective du sous-sol ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$), C_n est capacité thermique volumétrique effective du sous-sol ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$) et z_n (m) est la profondeur du forage ou la longueur total de l'ECG.

Pour la géométrie, le modèle 1D a été développé en considérant un sous-sol défini comme un solide hétérogène constitué par les différentes unités thermostratigraphiques isotropes incluant des zones fracturées (Figure 4.1) dans lesquelles un transfert de chaleur par diffusion unidirectionnelle a été simulé (Figures 4.4 et 4.5).

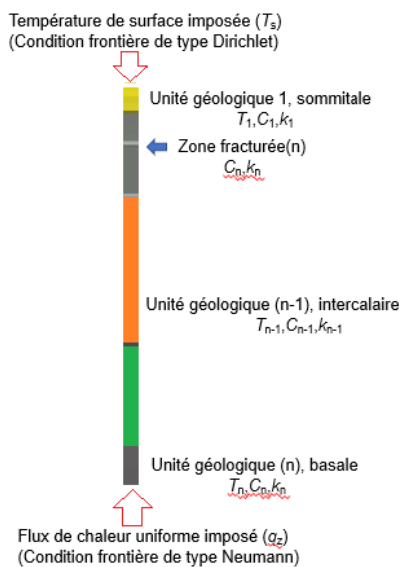


Figure 4.4 Modèle conceptuel en coupe verticale 1D.

La Figure 4.4 présente les principaux intrants qui ont été utilisés dans la modélisation numérique. T_s ($^{\circ}\text{C}$) est la température imposée à la surface du modèle ; q_z (W.m^{-2}) est le flux de chaleur terrestre considéré constant et imposé à la base du modèle. L'indice n sur chacune des propriétés a été utilisé afin de montrer que le nombre des unités thermostratigraphiques isotropes est supérieur à 2.

La géométrie pour la simulation numérique 1D de l'ECG pilote de l'INRS a été réalisée en considérant la coupe lithostratigraphique du forage (Figure 4.5). Celle-ci a été subdivisée en neuf unités thermostratigraphiques, dont deux zones fracturées dans lesquelles un écoulement d'eau souterraine a été considéré (modèle 2D, uniquement), en se basant sur l'analyse des résultats des travaux antérieurs (Figure 4.2, Raymond et al, 2017; Márquez et al., 2018; Ballard et al., 2019).

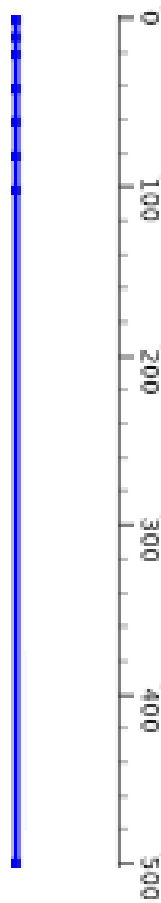


Figure 4.5 Géométrie du modèle numérique 1D pour l'ECG sur le site de l'INRS.

Ce modèle géométrique a été généré en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics pour l'ECG du site de l'INRS. Le modèle conceptuel est constitué par 9 unités thermostratigraphiques isotropes collées. Le premier nœud et le dernier nœud représentent respectivement les conditions frontières de température à la surface du modèle et de flux de chaleur Terre à la base du modèle. Les nœuds 3 et 4 sont les zones fracturées considérées comme les des unités thermostratigraphiques très minces. Les autres nœuds servent de limites des unités thermostratigraphiques isotropes.

Deux propriétés thermiques ont été considérées pour chaque unité géologique isotrope: la conductivité thermique k_n ($W K^{-1} m^{-1}$) et la capacité thermique volumétrique C_n ($J m^{-3} K^{-1}$). Les principaux intrants utilisés dans la modélisation 1D ont été restitués ci-dessous (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 : Intrants utilisés dans le modèle numérique 1D

Description des paramètres	Type	Valeur
T_{MAAT} (°C)	Valeur fixe ajustée manuellement	5.00 à 25.00
T_{amp} (°C)	Valeur fixe ajustée manuellement	5.00 à 30.00
t (s) sur 100ans, Pas de temps = 1mois;1an	Valeur fixe	315.36×10^7
S_T (°C.s ⁻¹)	Valeur fixe ajustée manuellement	6.34×10^{-10}
k_1, \dots, k_n (W K ⁻¹ m ⁻¹)	Variable inférée par le solveur	1.50 à 5.00
C_1, \dots, C_n (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	Valeur fixe	2400
q_z (m W m ⁻²)	Variable inférée par le solveur	20.00 à 90.00
z_1, \dots, z_n (m)	Valeur fixe ajustée manuellement	2.00 à 1000.00
p (rad s ⁻¹)	Valeur fixe ajustée manuellement	0.20 à 1.00

Pour la condition frontière au sommet du modèle, les variations de température à la surface (T_s) ont été simulées en utilisant une équation de diffusion oscillatoire de la température en fonction du temps. Cette équation a été développée dans le cadre de ce projet. Elle est définie par :

$$T_s(1D) \cong T_i(0) + S_T + 0.345772 T_{amp} \times \text{SIN}\left[2 \times 3.141593 \times \left(\frac{t}{31536000}\right) + p\right] \quad (4.2)$$

dans laquelle T_s (°C) est la température à la surface du sol; $T_i(0)$ est la température initiale à la surface du sol qui peut être extrapolée graphiquement à partir de la droite de la pente du gradient géothermique local (Raymond et al., 2015); S_T (°C) est la pente de la variation des températures à la surface pendant un temps spécifié, T_{amp} (°C) est l'amplitude de la température annuelle moyenne à l'échelle locale; t (s) est le temps de simulation de la diffusion des changements de température à la surface; p est le déphasage dans la diffusion de la perturbation thermique se propageant dans le sous-sol.

Le transfert de chaleur simulé dans le modèle se produit par la diffusion de la perturbation thermique de surface dans le sous-sol qui a été engendrée par l'augmentation de la température ambiante à la surface du sol (par exemple le réchauffement climatique). Bien plus, il faudrait

considérer également que les variations mensuelles de température en surface sont aussi affectées par les écarts de température qui varient selon les mois de l'année. Ainsi donc, la valeur de la température initiale ($T_i(0)$) pour la condition limite à la surface (T_s) a été calculée avec l'équation suivante :

$$T_i(0) \cong 1.00815 T_{MAAT} + 0.999 \quad (4.3)$$

où T_{MAAT} (°C) est la température annuelle moyenne ambiante de l'air, à la surface du sol à l'échelle locale. Tandis que la condition initiale de la température à différente profondeur a été évaluée à partir de l'équation suivante:

$$T_i(z) \cong T_i(0) + \left(\frac{qz}{k_n}\right) \cdot z_n \quad (4.4)$$

La condition frontière de flux de chaleur unidirectionnel à la base a été positionnée à une profondeur raisonnable afin de minimiser son influence sur la diffusion de la perturbation thermique dans le sous-sol depuis la surface du sol.

Dans le modèle géométrique, le maillage extrêmement fin avec des éléments triangulaires a été utilisé pour l'ensemble du domaine, totalisant une longueur de 500 m. Par contre, un raffinement de la taille des éléments a été réalisé sur les 40 premiers mètres de profondeur afin d'améliorer la résolution du modèle dans la zone de perturbation thermique superficielle qui est souvent soumis à des fluctuations thermiques depuis la surface du sol.

4.3.3 Modèle numérique 2D pour l'analyse thermostratigraphique

Dans le modèle bidimensionnel (2D) d'un sous-sol hétérogène (Figure 4.6 et Figure 4.7), le transfert de chaleur a été simulé par conduction et advection en considérant la présence d'un écoulement d'eau souterraine dans les zones de fractures, dans lesquelles une conductivité hydraulique plus importante a été observée en comparaison au reste de la masse rocheuse autour de l'ECG (Pambou et al., 2019). L'écoulement d'eau souterraine a été pris en compte en utilisant la loi de Darcy (Lehr et Sass, 2013; Pambou et al., 2019; Rajaobelison et al., 2021). Rappelons que le modèle par conduction représente le cas où le flux de Darcy est nul ou en d'autres termes le cas lorsqu'il n'y a pas d'écoulement souterrain simulé (Rajaobelison et al., 2021).

L'équation gouvernante qui définit le transfert de chaleur en 2D, en régime permanent (coordonnées cartésiennes, sans dispersion, ni production interne d'énergie) a été décrite comme suit :

$$k_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - c_w \rho_w q' \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.5)$$

où q' (m s^{-1}) est le flux de Darcy, c_w ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) est la capacité thermique massique de l'eau et ρ_w (Kg m^{-3}) est la densité de l'eau.

La géométrie utilisée et les unités thermophysiques définies dans le modèle 2D ont été restituées dans les Figures 4.6 et 4.7.

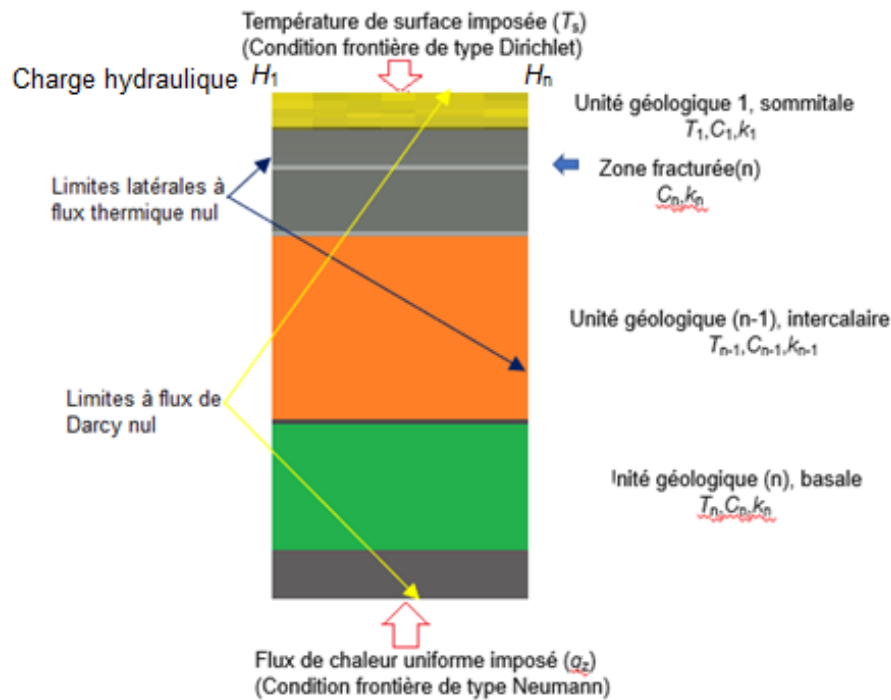


Figure 4.6 Modèle conceptuel en coupe verticale 2D.

Elle présente les différents intrants qui ont été utilisés à cet étape. T_s ($^{\circ}\text{C}$) est la température imposée à la surface du modèle ; q_z (W m^{-2}) est le flux thermique uniforme imposé à la base du modèle. Les charges hydrauliques H_n (m) sont imposées aux frontières latérales. Les propriétés thermophysiques suivantes ont été retenues pour chaque unité géologique : k_n ($\text{W K}^{-1} \text{s}^{-1}$) est la conductivité thermique ; C_n ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$) est la capacité thermique volumétrique.

Pour le site de l'ECG de l'INRS (Figure 4.7), la géométrie du modèle 2D a été figurée en considérant une surface rectangulaire de 20 m de large, 100 m de longueur comme aire d'application de la condition frontière de sommet. Une distance de 500 m de profondeur a été considérée pour imposer la condition frontière à la base du modèle (Figure 4.6).

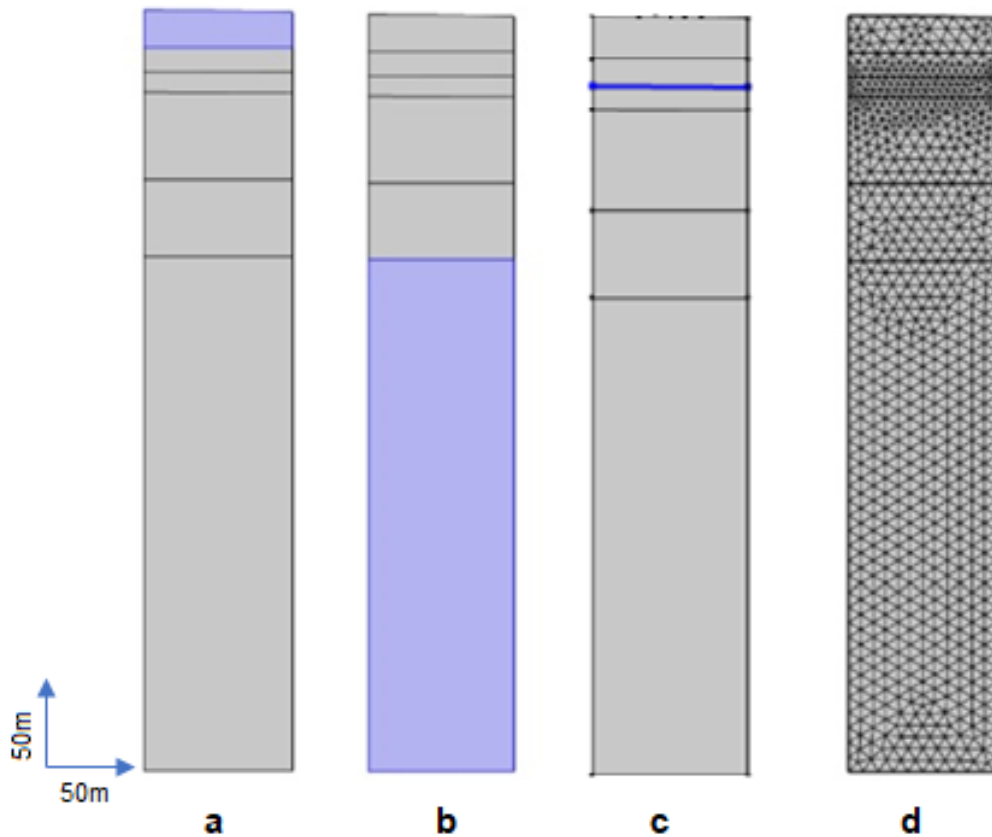


Figure 4.7 Géométrie et maillage du modèle 2D autour de l'ECG pour le site de l'INRS.

Elle est composée de 9 unités thermostratigraphiques (a, b) Constituent les unités au sommet et à la base du modèle. (c) Montre une zone fracturée et (d) montre le maillage avec le raffinement appliqué à des points critiques. Ce maillage est composé de 1572 éléments triangulaires, 202 éléments de coin et sommets puis 19 éléments sous forme de vertex.

Les conditions frontières ont été définies comme suit, soit une température constante à la surface du modèle et un flux de chaleur à la base. Deux types de limites latérales ont été définies : des limites adiabatiques pour le transfert de chaleur par conduction ; alors que pour la simulation de l'écoulement d'eau souterraine, la charge hydraulique a été imposée pour simuler le gradient hydraulique qui a permis de considérer l'écoulement souterrain horizontal dans les zones de fractures et le reste du domaine. Le sommet et la base du modèle ont été considérés comme des limites imperméables.

Dans toutes les simulations, les propriétés thermiques, les conditions frontières (température de surface et flux de chaleur) et les conditions initiales déterminées avec le modèle 1D ont été réutilisées comme des intrants dans le modèle 2D.

Les intrants qui ont été utilisées à cette étape sont présentées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Intrants utilisés pour le modèle numérique 2D

Description des paramètres	Type	Valeur
T_{amb} (°C)	Valeur proposée, fixe	6.50
T_{amp} (°C)	Valeur proposée, fixe	14.00
t (s)	Valeur proposée, fixe	315.36×10^7
Rho (kg m ⁻³)	Valeur proposée, fixe	2700.00
Cp (J kg K ⁻¹)	Valeur proposée, fixe	880.00
$k_{fracture}$ (W m K ⁻¹)	Valeur proposée selon le modèle 1D	2.00 à 2.50
k_1 (W m K ⁻¹)	Valeur proposée selon le modèle 1D	1.50 à 2.50
$k_2 \dots k_n$ (W.m.K ⁻¹)	Valeur proposée selon le modèle 1D	1.50 à 3.50
q_z (mW. m ⁻²)	Valeur proposée selon le modèle 1D	20 à 90
$d_{fracture}$ (mm)	Valeur proposée selon la coupe forage ECG	0.03 à 0.10
K (m s ⁻¹)	Valeur ajustée itérativement	1.00×10^{-8} à 1.00×10^{-5}
H_n (m)	Valeur ajustée itérativement	10 à 20

Dans toutes les simulations, les propriétés thermiques, le flux de chaleur et les conditions initiales déterminées avec le modèle 1D ont été réutilisés comme des intrants dans le modèle 2D. Les simulations numériques 2D ont été réalisées en régime permanent en considérant que l'ECG est en condition d'équilibre thermique avec le sous-sol environnant (Kavanaugh, 2010; 2016).

La simulation numérique directe a été utilisée pour reproduire adéquatement les températures observées aux voisinages de l'ECG. Les propriétés thermiques du sous-sol (profil de conductivité thermique), les conditions frontières et initiales et les valeurs des charges hydrauliques aux extrémités du modèle ont été considérées comme connues (Raymond et Lamarche, 2013). Les charges hydrauliques ont été variées, sur plusieurs ordres de grandeur afin de vérifier et valider les valeurs du flux de Darcy qui ont été recalculés analytiquement en considérant le profil de conductivité thermique inféré à partir des différentes unités thermostratigraphiques simulées numériquement (Choi et al., 2013; Verdoya et al., 2015; Pambou et al., 2019; Rajaobelison et al., 2021).

4.3.4 Raffinement du maillage et indépendance des conditions frontières

Une analyse d'indépendance du maillage a été réalisée afin de s'assurer que le modèle numérique proposé puisse garantir des résultats fiables (Annexe I). Le maillage a été raffiné en passant du plus grossier au plus fin, tout en s'assurant de maintenir un temps de simulation raisonnablement rapide (Raymond et al., 2015; Márquez et al., 2018; Mafalda et al., 2019; Rajaobelison et al., 2021). Le raffinement du maillage a été fait de deux façons (Annexe I) : premièrement en augmentant uniquement le nombre d'éléments ; et, deuxièmement en diminuant simultanément la taille des éléments du maillage tout en augmentant le nombre d'éléments dans les points critiques, respectivement au niveau de la limite supérieure du modèle et dans les zones fracturées.

L'impact de la profondeur à laquelle le flux de chaleur doit être imposée au niveau de la frontière basale a aussi été évalué afin de réduire l'influence de ce dernier sur la diffusion de la température depuis la surface (Raymond et al., 2015; Márquez et al., 2018; Mafalda et al., 2021; Rajaobelison et al., 2021). La distance pour imposer la condition frontière inférieure a été vérifiée en évaluant la température à une profondeur de 100 à 1000 m et en augmentant la distance de façon graduelle jusqu'à ce que la température ne varie plus (Annexe I).

Les résultats sur la vérification du raffinement et de l'indépendance du maillage ainsi que le processus du choix de la profondeur de la condition frontière ont été restitués, dans la section annexe de ce manuscrit (Annexe I).

4.3.5 Critères de validation des résultats

Les résultats ont été validés par un processus itératif d'analyses comparative en considérant : les résultats des analyses numériques utilisant des propriétés thermiques et les conditions frontières connues (Tableaux 4.1 et 4.2), le profil de température observé, la conductivité thermique inférée antérieurement à partir des TRT effectués sur le même site (Raymond et al., 2017; Márquez et al., 2018; Giordano et al., 2021), le flux de chaleur Terrestre évalué numériquement (Márquez et al., 2018) et le flux de chaleur terrestre calculé analytiquement en utilisant le gradient géothermique et le profil de température à l'équilibre. L'analyse de tous ces résultats a permis de définir les exigences acceptables pour valider les résultats de la nouvelle méthode, en considérant les critères suivants:

- (1) une différence de 0.40°C entre le profil de température simulé et celui observé;
- (2) une différence de l'ordre de 10% entre la conductivité thermique effective (CT) évaluée précédemment de façon in situ avec un TRT versus inférée avec le modèle numérique;
- (3) une différence de l'ordre de 10% entre le flux de chaleur imposé à la base du modèle versus celui qui a été évalué en utilisant d'autres méthodes. Pour ce projet, par exemple, la comparaison a été réalisée avec les résultats des travaux de référence locale et régionale (Majorowicz et Minea, 2012; Raymond et al., 2015; Bédard et al., 2017; Márquez et al., 2018; Nasr et al., 2018).

4.4 Résultats

Cette section présente les résultats de l'application in situ de la nouvelle méthode à un cas réel de l'ECG existant au site de l'INRS. Le profil de température observé en 2015 a été utilisé car il a servi de source d'intrants fiables et de référence pour plusieurs travaux antérieurs (Raymond et al., 2015; Márquez et al., 2018; Pambou et al., 2019; Ballard et al., 2019; Giordano et al., 2021; Pambou et al., 2022).

4.4.1 Analyse numérique du log thermostratigraphique en modèle 1D

Les changements de température en surface ont été pris en compte par la condition frontière de température de surface imposée au sommet du modèle. Ceux-ci ont été simulés en utilisant l'Équation 1 sur un intervalle temporel $t = 100$ ans en considérant une augmentation linéaire de 2°C. Une valeur de la pente de régression équivalente à $6.34 \times 10^{-10} \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1}$ a été évaluée.

4.4.2 Profil de température simulé de l'ECG

La Figure 4.8 présente la comparaison graphique entre les profils de température du sous-sol observé dans l'ECG (en 2015) versus le profil de température simulé numériquement, par optimisation inverse.

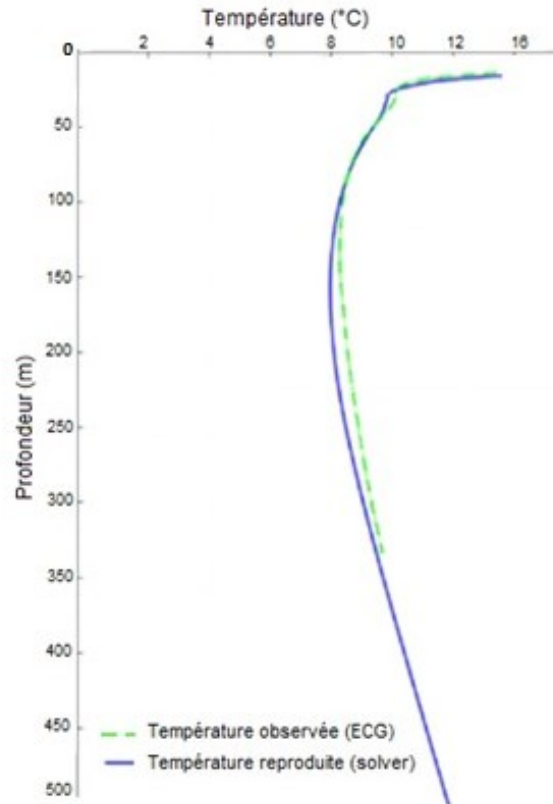


Figure 4.8 Profils de température observé et simulé en 1D au site de l'INRS.

Une superposition graphique acceptable des courbes de température a été observée dans les deux zones thermiques du profil de température (Majorowicz et Minea, 2012) : soit la zone superficielle (0 à 20m) ou thermocline qui est affectée par les variations de la température à la surface; et, la zone thermoclastique au-delà de 20 m de profondeur. Cette dernière est marquée par l'alignement de deux profils de température avec la pente du gradient géothermique (Figure 4.8; Raymond et al., 2015; Márquez et al., 2018; Miranda et al., 2021).

Par ailleurs, ces résultats ont montré une diminution, avec la profondeur, de la somme des résidus au carré entre les températures simulées versus les températures observées. Celle-ci a été observée sur toute la longueur de l'ECG (Tableau 4.3). Ces différences de valeurs ont permis

également d'observer les impacts engendrés par les perturbations thermiques en diffusion dans le sous-sol depuis la surface du modèle qui est en contact avec le réchauffement en surface.

Tableau 4.3 : Somme des résidus au carré entre les températures observées et simulées.

Nombre de points de mesure	Profondeur (m)	Somme des résidus au carré
2	0-1	4.04
220	100	0.08
331	150	3.76×10^{-4}

Pour valider les résultats de la simulation 1D, les valeurs de la température du sol non perturbé et les températures de fond de l'ÉCG ont été calculées (moyenne arithmétique) en considérant uniquement les températures observées et simulées dans la zone thermostatique délimitée sur les différents profils de température (Tableau 4.4; Majorowicz et Minea, 2012; Raymond et al., 2015; Pambou et al., 2021).

Tableau 4.4 : Évaluation des températures observées et simulées

Température (°C) de fond dans l'ÉCG à 150m			Température (°C) du sous-sol non perturbé (de 20m à 150m)		
Observée	Simulée	Différence absolue	Observée	Simulée	Différence absolue
8.40	8.38	0.02	7.90	7.78	0.12

L'analyse du tableau 4.4 a montré une différence absolue de moins de 0.20°C pour les différents types de températures considérées. Cette marge a été considérée conservative et en accord

avec les critères de validation définis pour garantir des résultats dans une marge de résolution adéquate (Figure 4.3).

4.4.3 Profil de conductivité thermique simulé

Les simulations inverses du profil de température en 1D ont permis également de définir la valeur optimale de la conductivité thermique simulée au niveau de chaque unité thermophysique (Tableau 4.5).

Tableau 4.5 : Comparaison des résultats entre les méthodes analytiques versus numérique 1D

Profondeur (m) pour chaque unité thermostratigraphique	Conductivité thermique par couche (W m ⁻¹ K ⁻¹)		
	Valeur inférée analytiquement à l'aide de profils mesurés durant la restitution thermique <i>Pambou et al.2019)</i>	Valeur inférée numérique avec un profil de température à l'équilibre <i>(Nouvelle approche)</i>	Différence absolue (%)
0 - 10	2.14	1.72	19.63
10-20	1.73	2.10	21.39
20-25	1.93	1.80	6.74
25-40	1.73	2.10	21.39
40-45	2.03	2.08	2.46
45-95	1.76	1.80	2.27
95-100	1.84	1.70	7.61
100-140	1.81	1.75	3.31
140-154	1.86	1.85	0.54
<i>k_{eff}</i> (W m⁻¹K⁻¹)	1.94	1.86	4.12

La distribution spatiale verticale, en faisant correspondre l'intervalle de profondeur de chaque unité avec la valeur de la CT correspondante, a permis de définir le profil de conductivité thermique relié au sous-sol recoupé par l'ECG (Tableau 4.5). Une valeur de conductivité

thermique effective de $1.86 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a été inférée en considérant une capacité thermique volumique de $2.40 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ et un flux de chaleur terrestre optimisé à 25.60 W m^{-2} . Ces résultats ont été considérés similaires à ceux évalués antérieurement sur le même site (1.75 à $2.19 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et 28.90 mW.m^{-2}) à partir des différentes méthodes de caractérisation des propriétés thermophysiques précédemment employées sur le même ECG (Raymond et al., 2017; Márquez et al., 2018; Pambou et al., 2019; Giordano et al., 2021).

La différence absolue avec la moyenne du profil de conductivité thermique évalué antérieurement sur le même site est de l'ordre 2.12% (Tableau 4.5). Celle-ci en termes de conductivité thermique effective étant minime (moins de 10%), les résultats obtenus avec cette nouvelle approche de simulation numérique unidimensionnel (1D) ont été considérés satisfaisants (critères définis dans la section 3.4) et en accord avec les résultats de référencés, à l'échelle du site et au niveau régional (Castonguay et al., 2002; Raymond et al., 2017; Bédard et al., 2017; Márquez et al., 2018; Nasr et al., 2018).

4.4.4 Évaluation du flux de chaleur terrestre

En utilisant la nouvelle méthode proposée, le flux de chaleur terrestre effectif a été évalué par simulation numérique à 25.60 mW m^{-2} . Cette valeur de flux de chaleur terrestre est similaire à celle qui a été inférée par simulation numérique à 28.9 mW m^{-2} en considérant un modèle homogène isotrope (Márquez et al., 2018). L'écart en pourcentage de 11.42% observé entre les deux résultats peut être considéré comme acceptable.

Toutes ces valeurs sont en accord avec les données régionales récentes qui ont permis d'évaluer un flux de chaleur terrestre moyen de 30 à 40 mW m^{-2} à plus grande profondeur dans les Basses Terres du Saint- Laurent (Raymond et al., 2015; Raymond et al., 2017; Bédard et al., 2017; Márquez et al., 2018).

4.4.5 Analyse numérique du log thermostratigraphique du modèle 2D

Les simulations numériques 2D, en considérant initialement la conduction de chaleur puis la convection, ont permis de redéfinir les unités thermostratigraphiques en termes de conductivité thermique cette fois affectée par l'écoulement d'eau souterraine (Figure 4.9).

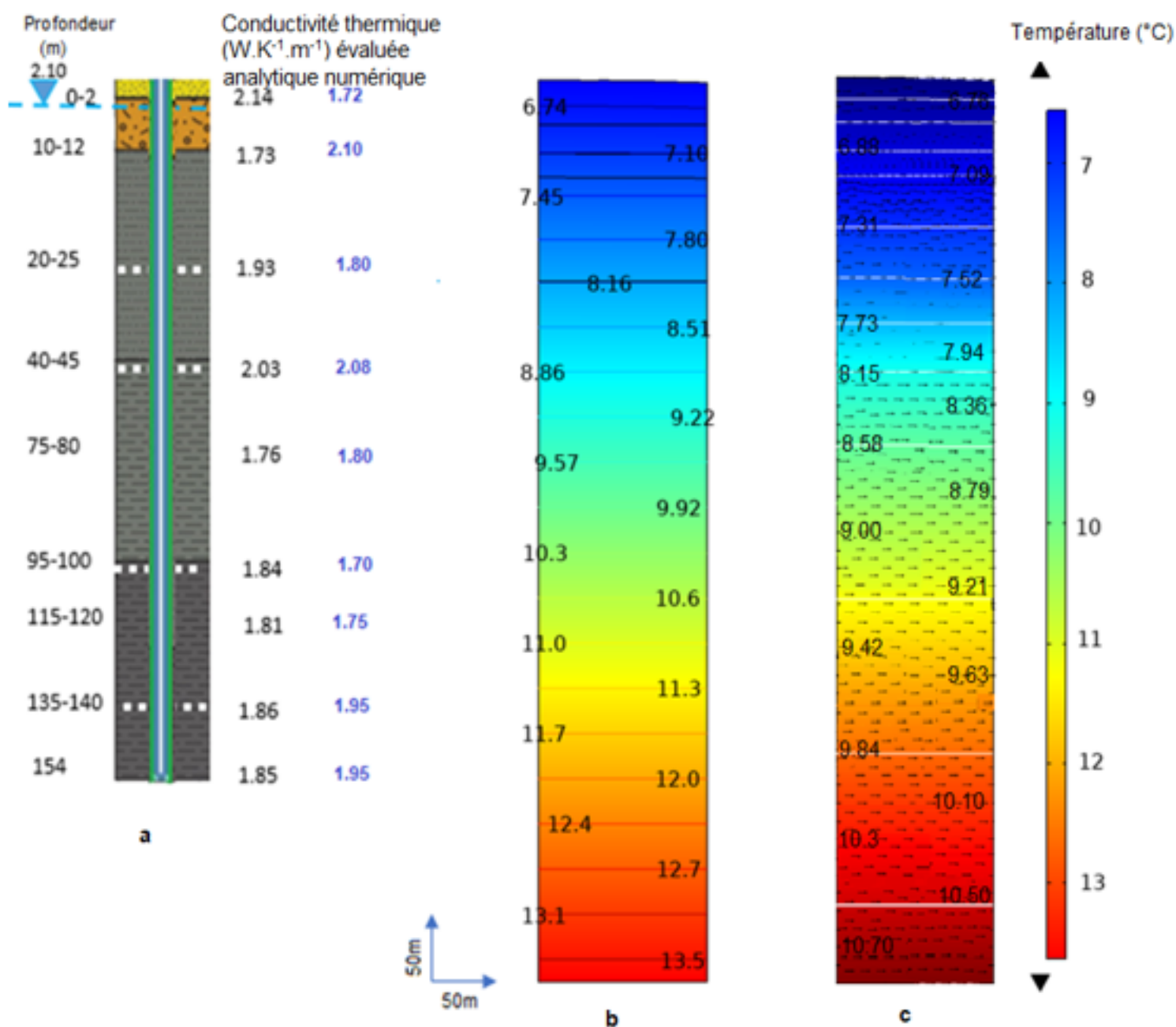


Figure 4.9 Comparaison de la coupe thermostratigraphique de l'ECG (a) et des résultats de modélisation 2D.

Ce modèle 2D présente un transfert conductif (b) et convectif (c). On observe une variation significative des vecteurs de vitesse du flux de Darcy dans les zones fracturées moins profondes (20-25m et 40-45m) comparativement aux deux zones fracturées plus profondes (95-100m et 135-140m) ainsi que dans le reste de la matrice du modèle.

Tableau 4.6 : Comparaison entre les températures observé versus simulé en 2D

Profondeur (m)	Température observée ou T_{obs} (°C)	Température simulée 2D (°C)		Différence absolue (°C)	
		Conduction T_{cond}	Convection T_{conv}	T_{obs}/T_{cond}	T_{obs}/T_{conv}
0	11,96	6,57	6,51	29,07	29,72
2	10,87	6,60	6,57	18,25	18,51
5	9,04	6,63	6,59	5,81	6,01
7	8,78	6,66	6,59	4,48	4,78
9	8,69	6,68	6,62	4,02	4,26
11	8,63	6,70	6,64	3,72	3,95
15	8,46	6,74	6,69	2,96	3,14
21	8,06	6,82	6,73	1,54	1,77
25	7,91	6,86	6,71	1,09	1,44
30	7,75	6,94	6,88	0,65	0,75
35	7,64	7,01	6,90	0,40	0,56
40	7,57	7,08	7,02	0,24	0,31
42	7,55	7,10	7,02	0,20	0,29
45	7,53	7,15	7,13	0,14	0,16
51	7,50	7,23	7,17	0,07	0,11
60	7,49	7,37	7,28	0,01	0,04
70	7,53	7,51	7,42	0,00	0,01
80	7,60	7,65	7,56	0,00	0,00
90	7,67	7,79	7,60	0,01	0,00
95	7,72	7,87	7,62	0,02	0,01
101	7,78	7,95	7,64	0,03	0,02
110	7,87	8,07	7,66	0,04	0,05
115	7,93	8,14	7,68	0,04	0,06
120	7,99	8,21	7,73	0,05	0,07
125	8,05	8,28	7,78	0,05	0,07
130	8,18	8,35	7,86	0,03	0,10
140	8,27	8,42	7,94	0,02	0,11
150	8,40	8,56	8,15	0,03	0,06

Les résultats obtenus en appliquant le protocole de la nouvelle méthode (pour d'un cas réel de l'ECG au site de l'INRS) ont permis de distinguer les zones marquées par un transfert conductif comparativement à celles affectées par un transfert advectif significatif et confirmé par la quantité importante des vecteurs de vitesse de Darcy (Figure 4.9a versus 4.9b, 4.9c). Les zones affectées par le transfert advectif ont été comparées avec celles décrites comme des zones fracturées sur la coupe lithostratigraphique (Figures 4.2, 4.9a). Elles ont été également identifiées in situ sur des profils de températures observés, durant la restitution du TRT, par des pics des valeurs de la

température montrant un refroidissement rapide (Pehme et al., 2013; Klepikova et al., 2011; Soldo et al., 2016; Boban et al., 2018; Raymond et al., 2017; Pambou et al., 2019). L'analyse comparative entre les simulations avec et sans l'écoulement souterrain a permis d'observer que les vecteurs de vitesse de Darcy sont plus abondants dans les zones fracturées identifiées (Figure 4.9c) confirmant ainsi une perméabilité plus grande que celle de la matrice, donc une contribution plus importante dans le transfert thermique. Tous ces résultats confirment que le traçage thermique à travers des profils de température mesurés durant les essais d'injection de chaleur et des TRT constituent un moyen adéquat pour la caractérisation géologique et hydrogéologique du sous-sol, qui joue un rôle important dans les applications en géothermie (Pehme et al., 2007; Fujii, 2009; Fujii et al., 2009; Pehme et al., 2013; Read et al., 2013; Klepikova et al., 2013; Klepikova et al., 2016; Brixel et al., 2019; Zhou et al., 2021).

L'analyse comparative à différentes profondeurs a été présentée dans les tableaux 4.6 afin de visualiser la distribution verticale des températures selon le profil de température versus les profils simulés 2D en conduction et en mode couplé, respectivement. On peut observer qu'au-delà de 30m de profondeur, toutes les valeurs de la différence absolue sont de moins de 1 (°C). De même, les valeurs de température à certaines profondeurs sélectionnées comme référence (20m; 30m; 50m; 100m et 150m) montrent une corrélation en adéquation avec les critères de validation.

4.4.6 Évaluation des critères de validation des résultats

Les différents critères de validation, ont été testés et ont permis d'obtenir des résultats satisfaisants en comparaison par rapports aux travaux antérieurs. Par exemple : dans le modèle 1D, la température du sous-sol non perturbé a été évaluée avec une différence absolue de moins de 0.20°C entre les profils de température mesuré versus celui simulé. Ce résultat est comparable à celui obtenu avec le modèle 2D en considérant que la température des isothermes à 150 m de profondeur a été observée respectivement à une valeur de 8.58°C pour la simulation de la conduction de chaleur et de 8.15°C lorsque la convection est considérée. Ses valeurs sont similaires à la valeur de 8.40°C observée comme température de fond dans l'ECG avec le profil de température observé à l'équilibre et de 8.38°C pour le profil de température simulé en 1D (Figure 4.8; Tableau 4.4).

Au niveau du profil de conductivité thermique effective et de la valeur du flux de chaleur terrestre, les écarts absolus par rapport à la moyenne n'ont pas dépassé 12%. Il est donc apparu que les critères de validation proposés qui sont basés sur la moyenne de la différence absolue étaient conservateurs (section 4.3.4).

Pour les enjeux de la modélisation numérique liés à la durée de simulation et le nombre d'itérations par simulation, il a été observé que l'optimisation inverse 1D pour chaque solution a été effectuée en moins de 30 minutes, pour 1000 itérations avec une résolution respectant les différents critères de validation (section 4.4). Globalement, les simulations numériques dans les deux étapes (1D, 2D) ont abouti à des solutions acceptables, au bout d'un temps très court ne dépassant pas 1 heure pour 1000 itérations.

4.5 Discussion et conclusions

Une nouvelle approche basée sur la simulation numérique a été développée afin d'évaluer un log hydrothermostratigraphique, en considérant un sous-sol hétérogène constitué par des couches isotropes avec ou sans présence d'écoulement souterrain. Le principe consiste à reproduire un profil de température observé dans un ECG, non perturbé par un TRT (Figure 4.5). L'utilisation d'un modèle mathématique simplifié, d'une géométrie peu complexe ainsi que les choix adéquats des conditions initiales et des conditions frontières ont permis d'obtenir des solutions acceptables et rapides pour les différentes simulations numériques réalisées, en considérant un modèle conceptuel qui reflète le plus possible le modèle géologique et hydrogéologique au voisinage de l'ECG (Al-Khoury et al., 2005; Nebbali, 2007; Fujii, 2009; Dieresch et al., 2011; Raymond et Lamarche, 2013; Lee et Lam., 2012; Raymond et al., 2015; Márquez et al., 2018; Miranda et al., 2021; Sakata et al., 2021). En considérant le cas appliqué à l'ECG de l'INRS, une corrélation avec une différence absolue acceptable de moins de 0.40°C a été observée sur la longueur totale de l'ECG (profondeur de 150 m) entre les températures mesurées au fond de l'ECG (8.40°C ; versus les températures simulées respectivement avec le modèle 1D (8.38°C) ; et avec le modèle 2D par conduction seulement (8.56°C) et 8.15°C lorsque le transfert couplé (conduction-advection) a été considéré avec le modèle 2D. Pour la conductivité thermique, les résultats obtenus à partir de l'application à un cas réel de l'ECG de l'INRS ont montré que la résolution de la distribution spatiale verticale des propriétés thermophysiques dans chaque unité du modèle hétérogène pouvait être évaluée numériquement, sans avoir recours aux analyses des échantillons en laboratoire (Raymond, 2018) ou à plusieurs jours de traçage thermique de la restitution de chaleur après un TRT (Pambou et al., 2019) ou en utilisant des mesures distribuées de température par la fibre optique (Boban et al., 2018) ou des mesures multiniveaux avec le câble chauffant (Márquez, 2019).

En appliquant la méthode sur l'ECG du site de l'INRS, la valeur de la conductivité thermique effective de $1.86 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et un flux de chaleur terrestre de 25.60 mW m^{-2} ont été inférés en utilisant le modèle 1D. Ces résultats ont été considérés similaires à ceux obtenus avec d'autres méthodes d'essai in situ utilisées sur le même site et à l'échelle régionale (Mareschal et al., 2000; Raymond et al., 2015; Bédard et al., 2017; Márquez et al., 2018). La nouvelle méthode a donc permis d'accéder à un ensemble d'informations géothermiques importantes, mais non disponibles à partir de l'analyse d'un TRT conventionnel (Fujii, 20094; Gehlin et Spitler, 2015; Sakata et al., 2017). Par exemple : l'évaluation de la valeur du flux de chaleur à l'échelle du site, la caractérisation et la distribution spatiale des propriétés thermiques et de l'écoulement souterrain.

L'écoulement souterrain a été simulé en considérant les zones de fractures comme des drains hydrauliques avec une perméabilité liée à l'épaisseur de chaque zone fracturée (selon la loi cubique). Des faibles valeurs du flux de Darcy (de l'ordre de 10^{-9} à $10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) ont été observées. Ces données sont compatibles avec les analyses de Pambou et al. (2019) qui a observé la présence d'un aquifère à faible débit d'écoulement dans un milieu peu perméable (0 et 0.3 m/jour). La comparaison entre les résultats obtenus avec et sans advection (Figures 4.9 b,c) a permis également d'améliorer la compréhension du rôle de l'écoulement d'eau souterraine dans le transfert de chaleur dans les zones fracturées du roc au voisinage d'un ECG (Klepikova et al., 2011; Huber et al., 2012; Loveridge et al., 2013; Cardiff et al., 2013; Pehme et al., 2013; Wagner et al., 2014, Klepikova et al., 2016). Cette comparaison a permis de confirmer la nécessité de ne pas minimiser systématiquement le rôle de l'écoulement d'eau souterraine dans le transfert de chaleur au voisinage d'un ECG (Choi et Lee 2013; Klepikova et al., 2016; Raymond, 2018). Nonobstant la faible perméabilité, il a été observé une forte corrélation entre la densité des vecteurs de vitesse du flux de Darcy et les zones fracturées qui sont les zones de transfert hydraulique et de contraste de perméabilité. Ces zones ont été marquées par des valeurs supérieures à la moyenne pour la conductivité thermique. De même, la superposition graphique a permis d'observer que la distribution des anomalies de température sur les profils de température pouvait être corrélée, sans équivoque, aux zones d'hétérogénéité et de présence de l'écoulement d'eau dans le sous-sol fracturé (Pehme et al., 2013; Klepikova et al., 2016; Pambou et al., 2019; Liu et al., 2020; Zhou et al., 2021).

Globalement, ces résultats ont révélé qu'une avancée scientifique et technique significative a été franchie dans l'analyse du TRT conventionnel. Par cette méthode, il est désormais possible de fournir un rapport technique avec un contenu plus proche de la coupe lithostratigraphique du

forage, en considérant une approche de sous-sol multicouche avec ou sans présence de l'écoulement souterrain. L'application à un cas réel d'ECG a permis d'observer que la nouvelle méthode est un levier technologique facile à implémenter; et ceci à un coût abordable; lorsque comparé à des solutions existantes (Rohner et al., 2005; Fujii et al., 2009; Martos et al., 2011; Gehlin et Spittler, 2015; Raymond, 2018; Aranzabal et al., 2018; Antelmi et al., 2021). De plus, ces résultats ont permis de confirmer que l'utilisation d'un seul profil de température de bonne résolution, mesuré avant ou après un TRT, permet d'évaluer le profil de conductivité thermique du sous-sol et la distribution hydrothermostratigraphique autour de l'ECG avec une incertitude acceptable. Cette option offre un avantage significatif dans la réduction du temps de collecte des données lorsque qu'on compare avec la méthode analytique proposée antérieurement et qui nécessitent au moins 5 jours de mesurage suivant la réalisation d'un TRT pour la caractérisation des propriétés thermophysiques du sous-sol (Pambou et al., 2019). C'est également le cas avec la méthode d'analyse multipoints basée sur certaines profondeurs ciblées qui se fait avec un câble chauffant et qui peut nécessiter 3 à 5 jours de traçage thermique in situ (Kavanaugh, 2010; Raymond et al., 2017; Márquez et al., 2018). Ce gain de temps significatif s'ajoute à la rapidité dans la convergence des modèles durant les simulations qui sont réalisées en moins d'une heure. Cette durée d'exécution est favorable pour que cette méthode soit mise en œuvre dans l'intervalle de temps équivalent à celui de la réalisation d'un TRT conventionnel (Florides et Kalogirou, 2008; Raymond et al., 2015; Márquez et al., 2018; Giordano et al., 2021). De façon pratique, le développement de ce modèle numérique pourrait être effectué avec des données préliminaires basées) sur les résultats des travaux de forage de l'ECG avant l'étape de l'injection de chaleur du TRT. La validation finale de la simulation numérique pourrait être réalisée aussitôt que les résultats du TRT conventionnel seront connus. En y ajoutant les résultats de l'évaluation numérique du log stratigraphique, le rapport d'études d'ingénierie fournirait alors une caractérisation détaillée du sous-sol basée sur un modèle conceptuel de sous-sol hétérogène avec ou sans l'écoulement souterrain et leur impact potentiel sur la performance de l'ECG (Fujii et al., 2009; Soldo et al., 2013; Jaziri et al., 2019; Pambou et al., 2019; Hakala et al., 2020).

Par ailleurs, sur le plan scientifique, les résultats satisfaisants de l'utilisation de l'approche numérique pour un cas réel de terrain ont permis de montrer le potentiel novateur de cet outil scientifique lorsque couplé au TRT conventionnel. Les analyses sont réalisées en considérant la caractérisation des différentes unités géologiques du sous-sol et des niveaux fracturés traversés par un forage (Pehme et al., 2013; Lehr et Sass, 2013; Hakala et al., 2014). La faible incertitude dans les résultats à toutes les étapes du processus d'intégration constitue également un atout important pour évaluer l'impact de la variabilité spatiale verticale de l'hétérogénéité, de

l'écoulement souterrain et de la fracturation dans les roches (Gehlin et Spitler, 2015 ; Raymond, 2018; Jaziri et al., 2019; Franco et Conti, 2020 ; Klepikova et al., 2020).

Toutefois, la méthode d'analyse numérique présentée dans cet article a été réalisée en considérant uniquement une valeur constante de la capacité thermique du sous-sol, dans toutes les unités isotropes thermostratigraphiques. Bien que cette propriété thermique varie peu avec la lithologie, cette hypothèse n'est pas forcément adéquate lorsque le forage de l'ECG recoupe des couches géologiques de lithologies différentes (Florides et Kalogirou, 2008; Fujii et al., 2009; Lee et Lam, 2012; Pehme et al., 2013; Soldo et al., 2016; Hakala et al., 2014; Jaziri et al., 2019; Hakala et al., 2020). La prise en compte de la variation de la capacité thermique selon les couches, dans le modèle 2D, pourrait certainement être un atout pour améliorer davantage la résolution de ces résultats lors de l'analyse du TRT conventionnel.

Par ailleurs, dans ce projet, le flux de Darcy facilement inférée par des essais hydrauliques in situ et à partir du profil de conductivité a été considérée comme la composante représentative de tous les mécanismes de l'écoulement d'eau souterraine. Il pourrait être intéressant d'effectuer des simulations avec une variation de la perméabilité et de la porosité dans les unités thermostratigraphiques. Ces deux propriétés ayant été reconnues comme des intrants qui ont un impact non négligeable sur les vitesses d'écoulement de l'eau ainsi que la transmissivité hydraulique qui affectent le transfert de chaleur dans le sous-sol (Liebel, 2011; Huber et Arshan, 2012; Pehme et al., 2013; Lehr et Sass, 2013; Wagner et al., 2014; Rajaobelison et al., 2021).

Bien que les résultats obtenus n'ont pas permis d'égaliser le pas de distribution spatiale verticale de 1 m utilisé avec l'approche analytique ou les mesures au 0.25m avec la fibre optique, il n'en demeure pas moins que cette nouvelle approche constitue un levier technologique qui a permis de montrer qu'il est possible de considérer l'hétérogénéité du sous-sol et l'écoulement souterrain durant l'analyse d'un TRT conventionnel, sans recourir à plusieurs jours de traçage thermique (méthode analytique; Pambou et al., 2019) avec des profils de température dans l'ECG après la réalisation du TRT ou sans recourir à des approches dispendieuses et complexes (méthode avec la sonde submersible autonome ou la fibre optique; Aranzabal et al., 2018; Hakala et al., 2020).

5 DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSIONS

5.1 Problématique, approche conceptuelle, hypothèse de travail et limitations

L'implémentation facile des opérations sur le terrain et l'utilisation du modèle d'analyse basé sur la méthode de la SLI ont fait du TRT conventionnel une solution prioritairement acceptée et utilisée par l'industrie (Gehlin et Spitler, 2015; Raymond, 2018; Hakala et al., 2022). Cet essai in situ a fait ses preuves pour évaluer la conductivité thermique effective du sous-sol lors de la conception des ECG (Raymond et al., 2017; Liu et al., 2018). Cependant, au fil des années de pratiques, des limitations ont été observées en comparant les résultats obtenus sur des ECG construits dans le même site. Ces différences ont été justifiées en considérant un transfert de chaleur dans un environnement géologique hétérogène ou en considérant la présence d'un écoulement d'eau souterraine dans certaines couches géologiques autour des ECG (Pahud, 2001; Pehme et al., 2007; Fujii et al., 2009; Langlois, 2010; Jacques, 2015; Gehlin et Spitler, 2015; Klepikova et al. 2016; Abesser et al., 2021). Plusieurs travaux ont montré également que le coût des travaux préliminaires (TRT et ECG pilote) ont un impact non négligeable sur l'investissement initial pour l'exploitation des ressources géothermiques de très basse température. Celle-ci est dépendante de la longueur de la PACG qui détermine, le nombre de forages, leur distribution spatiale et la performance des ECG utilisés (Simon, 2016; Giordano et al., 2021; Kutzner et al., 2022). De nombreuses solutions ont été implémentées en laboratoire et sur le terrain. Celles-ci se sont révélées complexes et peu profitables en se basant sur le ratio coût/bénéfices du projet (Raymond, 2018; Franco et Conti, 2020; Kutzner et al., 2022). Il est donc apparu nécessaire de développer une nouvelle méthode afin d'inférer des résultats similaires à ceux des méthodes de TRT distribués. Dans ce cadre, ce projet a permis d'implémenter une nouvelle méthode interactive et récursive basée sur la combinaison de plusieurs approches qui fonctionnent en complémentarité mutuelle avec des balises d'auto-contrôle de résultats de l'une par rapport à l'autre (Figure 5.1). Celles-ci ont montré des résultats fiables pour l'évaluation des propriétés thermophysiques du sous-sol en considérant l'hétérogénéité et l'écoulement souterrain. Celles-ci utilisent uniquement des profils de température mesurés avec une sonde submersible dans un ECG ou recalculés analytiquement ou simulés numériquement dans la même durée de temps d'implémentation du TRT conventionnel, d'où l'intérêt de ce projet doctoral. L'utilisation d'un protocole intégrateur unique et simplifié basé sur une mise en œuvre inclusive (TRT conventionnel et traçage thermique) apporte également une valeur ajoutée à l'originalité et l'innovation de cette nouvelle méthode (Figure 5.1). Le protocole simplifié de mise

œuvre a été déclinée en quatre étapes réalisables dans la même durée de temps d'implémentation du TRT conventionnel, en respectant le cheminement proposé (Figure 5.1) afin de garantir une incertitude basée sur des critères de validité des résultats qui ont été vérifiés in situ avec une incertitude raisonnable.

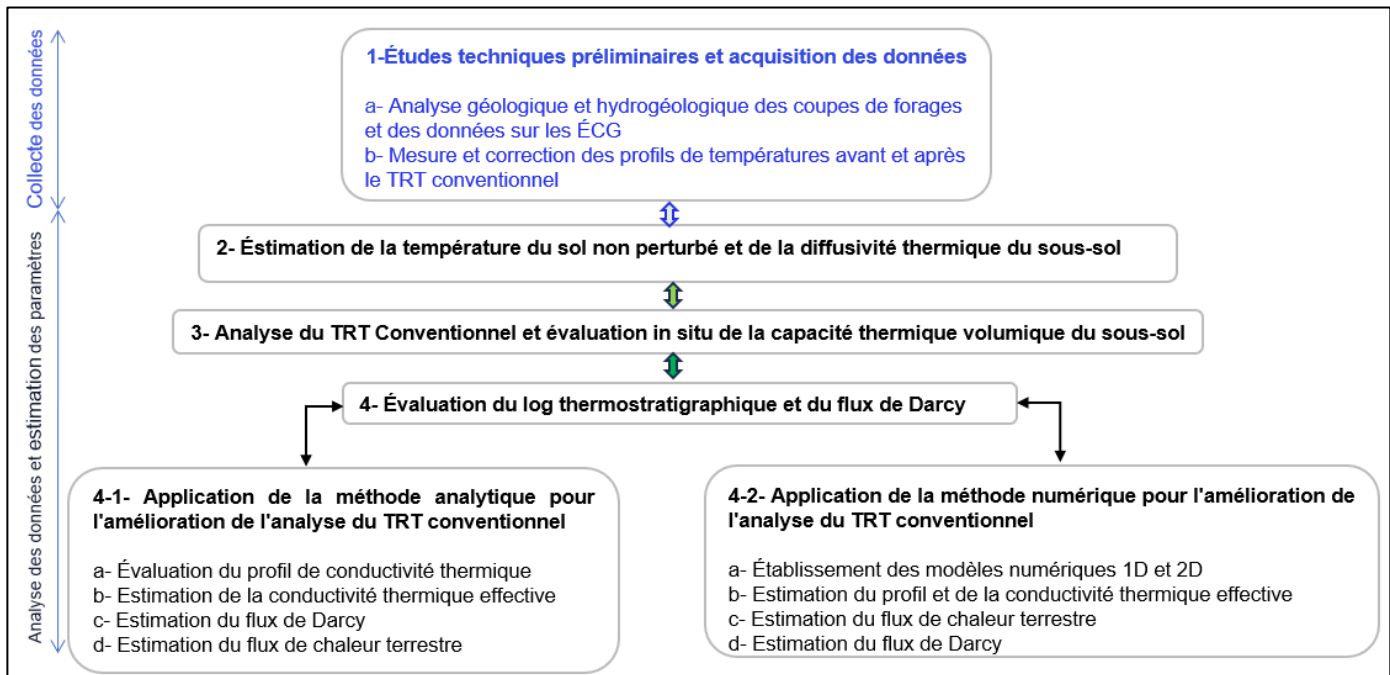


Figure 5.1 Procédure pour l'évaluation des paramètres thermophysiques et hydrauliques en utilisant la nouvelle méthode proposée.

Cette nouvelle méthode utilise des profils de température mesurés avec une sonde submersible dans l'ECG, qui est une pratique courante déjà maîtrisée par les professionnels dans le secteur (Gehlin et Spitler, 2015 ; Raymond, 2018). La comparaison des résultats sur des cas réels d'ECG a montré que les méthodes proposées sont à la fois fiables dans les résultats fournis, novatrices dans les approches proposées et sont implémentées à des coûts abordables pour la collecte et l'analyse des données servant à caractériser, évaluer et de qualifier le potentiel des ressources géothermiques à l'échelle du site, mais également pour une cartographie à l'échelle régionale.

L'autre valeur ajoutée de ce projet doctoral est d'avoir montré qu'il est possible d'utiliser les mêmes profils de température mesurés dans un ECG, pour identifier les hétérogénéités dans le milieu souterrain et pour évaluer la conductivité thermique, la capacité thermique, le flux de

chaleur terrestre, le flux de l'écoulement souterrain à l'échelle du site. Par ailleurs, l'analyse de ces profils de température a fourni d'autres informations capitales sur la performance de l'ECG. Par exemple, les résultats sur l'évaluation du temps de retour à l'équilibre (délai de récupération du sous-sol) à la suite de l'installation de l'ECG (perturbation mécanique) et à la suite du TRT (perturbation thermique), peuvent servir pour évaluer le délai entre les deux TRT consécutifs.

L'analyse comparative de ces résultats par rapport aux travaux réalisés antérieurement dans le bassin sédimentaire des Basses Terres du Saint-Laurent a montré que la nouvelle méthode constitue une solution d'exploration efficace dans une marge acceptable pour des ressources de basse enthalpie (Mareschal et al., 2000; Raymond et al., 2015; Bédard et al., 2017; Raymond et al., 2017; Márquez et al., 2018; Giordano et al., 2021). De même, les travaux réalisés dans cette thèse ont également montré qu'il est possible d'obtenir des données avec une résolution spatiale verticale similaire à celle des méthodes d'analyses distribuées utilisant la fibre optique pour mesurer la température. De plus, les différents résultats obtenus ont confirmé que le profil de température mesuré avec une sonde submersible sur la longueur totale d'un ECG constitue une source de données fiables, obtenues à moindres coûts. Le recours à cette approche est donc potentiellement une alternative raisonnable à l'utilisation de la fibre optique.

Néanmoins, il convient de signaler certaines limitations. Par exemple pour la méthode de l'analyse du TRT présentée dans le chapitre 2 (Article 1), il faut mesurer plusieurs profils de température durant la phase de restitution thermique suite à l'injection de chaleur lors du TRT dans l'ECG. L'opération pourrait durer plus de 150 heures dans le cas où la conductivité thermique du sous-sol est faible (Kavanaugh, 2010; Ballard et al., 2016). Ces heures supplémentaires, en comparaison avec la durée du TRT conventionnel, pourraient constituer une contrainte de coût supplémentaire. La méthode pourrait se révéler également peut efficace dans le cas d'un ECG dans lequel l'eau remplace le coulis, car le retour à l'équilibre très rapide pourrait poser une contrainte pour l'acquisition d'un historique de profils de température représentatif de la restitution thermique. La même limitation pourrait s'avérer en présence d'un aquifère suffisamment productif.

Par ailleurs, selon la vitesse d'enregistrement des mesures qui a été spécifiée à la sonde submersible, le volume de données collectées peut devenir problématique à gérer. Dans l'étape 1 du chapitre 2 de ce projet, un travail d'optimisation a été nécessaire pour sélectionner la vitesse d'enregistrement adéquate afin de conserver le meilleur ratio opérationnel entre l'acquisition des données versus l'analyse des données. Une vitesse de 7.5 à 12.5 cm s⁻¹ a été retenu comme le meilleur compromis entre l'acquisition des données pour la sonde submersible RBR Duet versus

l'analyse de données en utilisant un tableur informatique peu complexe couramment disponible (par exemple Microsoft-Office Excel) et communément maîtrisé par l'expertise actuelle de l'industrie. Il convient de rappeler également que seuls les profils de température mesurés durant la phase de descente de la sonde submersible ont été utilisés car ceux de la remontée fournissent des données perturbées par l'agitation de la colonne d'eau en ramenant la sonde et le câble hors de l'ECG.

Pour l'estimation de la capacité thermique (Article 2), la dépendance à la valeur de la conductivité thermique inférée par le TRT est un facteur qui pourrait augmenter l'incertitude, lorsque la valeur est uniquement inférée par la méthode de la SLI sans être contrôlée par des données indépendantes (Raymond et al., 2017). Quant à la méthode d'analyse numérique (Article 3), une acquisition de connaissance ou de compétence pour la modélisation numérique est nécessaire afin de pouvoir utiliser la méthode présentée dans le chapitre 4.

5.2 Les livrables de la thèse et leurs contributions

Les méthodes d'analyses et les techniques de réalisation des TRT ont récemment été améliorées pour inclure le concept de TRT en mode distribué spatialement (DTRT) sur toute la longueur de l'ECG afin d'inférer un log hydrothermostratigraphique du sous-sol, à l'échelle de l'ECG (Fujii et al., 2009; Raymond., 2018; Márquez et al., 2018; Hakala et al., 2022). L'absence d'un profil de conductivité thermique et d'information sur l'écoulement de l'eau souterraine résultant de l'analyse du TRT conventionnel avec l'équation de la LSI ont conduit à des résultats incomplets ou pas suffisamment représentatifs des conditions in situ, en comparaison à celui du DTRT. En complétant l'analyse du TRT conventionnel par des résultats obtenus à partir des méthodes proches de la pratique professionnelle courante, ce projet a permis d'améliorer le concept de caractérisation des propriétés thermostratigraphique du sous-sol à partir des profils de température mesurés avec une sonde submersible dans un ECG (Rohner et al., 2005; Martos et al., 2011; Aranzabal et al., 2018). Bien plus, l'utilisation du câble gradué pour faire descendre et remonter la sonde submersible dans l'ECG a rendu plus simple, rapide et moins dispendieuse l'implémentation du traçage thermique et la collecte des données, en comparaison aux dispositifs spéciaux proposées par Martos et al. (2011) et améliorés par Aranzabal et al. (2018).

Chaque objectif spécifique de ce projet doctoral a été présenté succinctement par chapitre dans lequel chaque livrable a été décrit en termes de : théorie et concept, mode opératoire ayant été exécuté et validé par des applications à un cas réel sur l'ECG pilote ainsi que par des analyses comparatives à des travaux similaires au niveau local et régional.

A cet effet, le chapitre 2 présente les résultats qui ont apporté des réponses pour le premier et le deuxième des objectifs spécifiques de cette thèse. Les livrables sont : (1) deux méthodes pour la correction des profils de températures mesurés dans l'ECG (Figures 2.2 et 2.3) qui ont servi pour évaluer le délai de récupération du sous-sol et la température du sous-sol non perturbé; (2) une méthode analytique qui a servi pour évaluer le log hydrothermostratigraphique (2.9 à 2.12) et les flux d'écoulement souterrain (Figure 3.13). La mise en œuvre de la première méthode (mesure dans un tuyau de l'ECG non bouchonné; Figure 2.2 b) a permis de valider in situ les travaux de Raymond et al. (2015) qui n'avaient pas été implémentée à l'échelle du site. En sus, un nouveau concept de mesurage du profil de température a été formulé comme deuxième méthode; et, celle-ci a été implémentée et validée in situ. Le mode opératoire de cette nouvelle approche ingénieuse consiste à effectuer des mesures in situ dans un tuyau de l'ECG bouchonné d'un côté du tube en U (Figure 2.2 c). Sa mise en œuvre a révélé plus de facilité opérationnelle, car elle a permis de s'affranchir des mesures de niveaux d'eau avant et après insertion de la sonde submersible dans le tuyau de l'ECG, en plus d'offrir une simplification des calculs effectués pour corriger le décalage de profondeur engendrée par la remontée du niveau d'eau (Équation 2.3). Ce gain constitue un atout important pour minimiser la durée des mesures. Avec les deux méthodes, le calcul de la profondeur corrigée a été réalisée à partir de la pression hydrostatique enregistrée par la sonde submersible parcourant la longueur totale de l'ECG, au pas de 1 m. Cette façon d'effectuer les mesures a permis de disposer d'une correction incrémentée et distribuée verticalement selon le gradient de température-profondeur, au lieu d'une correction pondérée sur la longueur totale de l'ECG. Cette approche in situ s'est également révélée très efficace afin d'obtenir une résolution spatiale (environ 1m) qui se rapproche à celle des mesures distribuées utilisant la fibre optique (0.25 m). La méthode de correction proposée ne concerne pas la valeur de la température mesurée, uniquement l'évaluation de la profondeur adéquate de mesure de la température (Équation 2.3). L'impact de l'incertitude de la sonde n'a pas été analysé parce que la résolution de la sonde de température qui est de 0.001°C (qui est déjà supérieure à celle des thermomètres de la fibre optique 0.01°C) satisfait largement les critères de l'ASHRAE qui encadrent la sélection de la sonde de température lors des TRT (Ballard et al., 2015). L'analyse proposée suppose que la valeur de la température observée est suffisamment précise selon les critères fournis par l'ASHRAE. De plus, la correction proposée par Raymond et al. (2016) concerne uniquement la localisation du gradient (profondeur à laquelle la température est mesurée) dans la ECG qui est affectée par la remontée de l'eau (Équation 2.3).

Par ailleurs, une nouvelle méthode analytique d'analyse du TRT conventionnel selon un log thermostratigraphique a été présentée dans ce deuxième chapitre, avec son application in situ. Celle-ci utilise les profils de température mesurés dans un ECG avec la sonde submersible attachée à un câble comme alternative à l'utilisation des mesures avec la fibre optique. Celle-ci est basée sur l'utilisation combinée du principe de superposition temporelle de Pehme et al. (2007) appliquée à la méthode d'analyse de la SLI avec les protocoles de Hakala et al. (2014) et de Pasquier afin d'évaluer la distribution verticale du gradient en faisant correspondre la température mesurée à la profondeur adéquate. Cette nouvelle méthode d'analyse a permis d'évaluer le profil de conductivité thermique du sous-sol, en considérant toute la longueur de l'ECG parcourue par la sonde submersible durant la mesure du profil de température. Finalement, les profils de températures et le profil de conductivité thermique ont été utilisés pour évaluer l'impact de l'écoulement souterrain, notamment pour identifier les zones à transmissivité hydraulique élevée, pour lesquelles le flux de Darcy a été inféré en utilisant le principe de calcul du nombre de Peclet (Lehr et Sass, 2013). Tous ces résultats ont par la suite été corrélés à la coupe lithostratigraphique du forage dans lequel l'ECG a été aménagé. Ces résultats validés par des applications réalisées in situ constituent une première scientifique et technique, qui a permis d'inférer un log hydrothermostratigraphique, avec une résolution spatiale verticale de 1 m à l'échelle de l'ECG, sur le site de l'INRS (Sainte-Foy, Québec), sans utiliser les mesures distribuées avec la fibre optique. Tous ces résultats ont également permis de confirmer qu'il était possible d'utiliser des équipements couramment utilisés par l'expertise actuelle de l'industrie, dans les essais in situ. Ces nouvelles méthodes ont été intégrées à l'analyse du TRT conventionnel afin de disposer d'un protocole unique pour qui prend en compte la caractérisation de l'hétérogénéité du sous-sol et de l'écoulement souterrain, sans recourir à des mesures distribuées verticales par la fibre optique ou des sondes multi-niveaux.

La première partie de la réponse au troisième objectif spécifique de ce projet doctoral a été présentée au Chapitre 3 de cette thèse. Dans cette étape, une nouvelle méthode d'évaluation in situ de la température du sous-sol non perturbé, de la diffusivité thermique et de la capacité thermique du sous-sol a été implémentée. Ce sont des paramètres thermophysiques importants ayant une application en géothermie; et qui ont été, auparavant, évalués en utilisant d'autres approches plus complexes et dispendieuses (Figure 3.2; Kusuda et Achenbach, 1965; Chabert, 1980; Hillel et al., 1982; Gwadera et al., 2017; Radioti et al., 2017 ; Raymond, 2018; Giordano et al., 2021). La méthode proposée est basée sur l'utilisation des nouvelles équations semi-analytiques pour calculer le profil de température mesuré dans le sous-sol, en considérant un transfert de chaleur en régime transitoire, qui précède l'état d'équilibre observé dans le profil de

température mesuré dans l'ECG. En appliquant le concept de profondeur de zéro amplitude au profil de température observé à l'équilibre dans un ECG, des variables d'ajustement ont été calculés afin d'inférer la profondeur d'amortissement normalisé de l'onde thermique en diffusion dans le sous-sol depuis la surface, la diffusivité thermique du sous-sol et la température du sous-sol non perturbé. La conductivité thermique inférée par l'analyse du TRT conventionnel a été alors utilisée pour évaluer la capacité thermique du sous-sol, en utilisant l'équation analytique qui lie les trois paramètres. L'estimation in situ de la capacité thermique et de la diffusivité thermique du sous-sol, en considérant l'analyse d'un seul profil de température mesuré à l'équilibre dans un ECG, constitue une nouvelle contribution scientifique sans précédent. Bien plus, cette approche in situ innovante a confirmé que les propriétés liées à la diffusion et l'emmagasinement de chaleur dans le sous-sol peuvent être inférées durant la réalisation du TRT conventionnel. Une autre contribution est que cette nouvelle méthode peut être utilisée pour corriger et qualifier la valeur de la température du sol non perturbé, conventionnellement évaluée par un calcul de la moyenne statistique à partir d'une délimitation arbitraire de l'intervalle des températures de la zone perturbé versus zone non perturbée (Figure 3.1). L'analyse de tous les résultats de cette étape a montré qu'une ingénieuse utilisation des connaissances fondamentales sur les mécanismes de transfert de chaleur et de l'interdépendance entre les propriétés thermophysiques permet d'évaluer la température du sol non perturbé, la diffusivité thermique et la capacité thermique à l'aide d'une seule méthode in situ novatrice fiable, peu complexe et facile à déployer sur le terrain car déjà intégrée à la pratique courante du traçage thermique lors de la réalisation du TRT; mais surtout, peu coûteuse en comparaison avec les essais en laboratoire ou les autres approches de terrain (Waples et Waples, 2004; Popov et al., 2017; Raymond, 2018; Giordano et al., 2021).

La deuxième partie, de la réponse au troisième objectif spécifique de cette thèse, a été traitée dans les Chapitres 4. Cette section présente le développement et la validation d'une nouvelle approche pour évaluer, par simulation numérique, la distribution verticale de la conductivité thermique du sous-sol selon des unités thermostratigraphique du sous-sol recoupé par l'ECG en considérant la présence ou l'absence de l'écoulement souterrain. L'idée est de tirer profit des avantages de la simulation numérique afin de ne pas réaliser plusieurs TRT ou une série de profils de températures durant la restitution du TRT (surcoût au projet), sans compromettre la qualité des résultats de caractérisation du sous-sol (Pambou et al., 2019). La nouvelle méthode développée se distingue des résultats précédents sur plusieurs points :

- (1) le profil de température observé a été reproduit sur toute la longueur de l'ECG, grâce à l'utilisation d'une nouvelle équation développée qui recalcule la température imposée à la

condition frontière de surface, contrairement à l'utilisation d'une valeur moyennée de la température ambiante. Cette nouvelle approche permet de mieux considérer l'incertitude sur la fluctuation de température due aux variations climatiques annuelles et aux changements paléoclimatiques.

- (2) la nouvelle méthode utilise une analyse du sous-sol selon un modèle hétérogène afin de prendre en considérant les différentes couches du sous-sol avec ou sans présence de l'écoulement souterrain alors que le modèle précédent utilise une approche de sous-sol homogène.
- (3) pour la condition frontière à la base du modèle, le flux de chaleur terrestre est déterminé simultanément par simulations numériques inverses; alors que dans le modèle de Raymond et al. (2015), cette condition est un intrant évalué à partir de la conductivité thermique (CT) fournie par l'analyse du TRT et du gradient de température mesuré par le profil de température observé dans un deuxième ECG sur le site à l'étude.
- (4) la nouvelle méthode repose sur des simulations 1D de la conduction chaleur (similaire au modèle précédent) puis de la conduction et l'advection en 2D, afin de considérer l'effet de l'écoulement d'eau souterraine.
- (5) conséquemment, le nouveau modèle permet d'évaluer la CT de chaque couche géologique à la place d'une valeur effective de la conductivité thermique inférée pour toute la longueur de l'ECG.
- (6) le nouveau modèle permet l'évaluation de l'écoulement souterrain en terme de flux de Darcy, tandis que le modèle précédent considère la présence de l'écoulement souterrain comme négligeable, en considérant que le transfert conductif vertical comme étant prépondérant par rapport aux échanges thermiques horizontaux pouvant être liés à l'écoulement de l'eau souterraine.

Plus spécifiquement, cette nouvelle approche a permis de proposer une distribution spatiale verticale des températures simulées numériquement dans des unités thermostratigraphiques afin de pouvoir les comparer avec les températures mesurées dans l'ECG. Les valeurs inférées, de la conductivité thermique de chaque unité thermostratigraphique, ont été utilisées pour calculer la valeur effective de la conductivité thermique qui a été comparée avec celle inférée par l'analyse du TRT conventionnel. Les résultats obtenus avec la nouvelle approche ont montré que la modélisation numérique était une alternative raisonnable comparativement à la série des mesures nécessaires pour évaluer la restitution de température suite à l'injection de chaleur durant le TRT conventionnel afin de disposer des données adéquates pour inférer le log hydrothermostratigraphique, selon la méthode analytique présentée dans le premier chapitre.

L'évaluation du flux de chaleur terrestre, à l'échelle du site, en même temps que le log thermostratigraphique constitue également un avantage de cette méthode. Les zones fracturées identifiées durant les opérations de forage (Figure 4.2) ont été considérées pour simuler l'écoulement des fluides en essayant de reproduire le profil de température observé dans un ECG (Figures 4.5, 4.8 et 4.9). Ces simulations numériques ont permis d'observer que les zones de fractures dans le roc, servant de drains hydrauliques pour l'écoulement des eaux souterraines, ont une contribution non négligeable au transfert de chaleur, malgré des faibles conductivités hydrauliques fréquemment observées (10^{-8} à 10^{-5} m s⁻¹). Finalement, le flux de chaleur terrestre évalué à la base du modèle entre 25 et 30 mWm⁻² à 500 m de profondeur et la température imposée à la surface considérant les variations saisonnières de température ont joué un rôle important pour reproduire le profil de température dans les unités thermostratigraphiques du sous-sol (Tableau 4.5, Figure 4.8 et 4.9).

5.2.1 Évaluation de la température du sous-sol non perturbé

De nombreux travaux ont montré l'importance d'évaluer correctement la température du sol non perturbé (Langlois, 2010; Raymond et al., 2016). Ceux-ci ont établi, par exemple, qu'une incertitude de plus de 10% sur sa valeur affecte directement l'évaluation de la longueur de l'ECG et sa performance (Gehlin et Nordell, 2003; Langlois, 2010; Raymond, 2018). L'évaluation adéquate et à faible coût de la température du sous-sol non perturbé a donc été priorisée dans le premier objectif. Les résultats présentés dans le Chapitre 2 ont montré que l'utilisation des méthodes de correction du gradient de température en fonction de la profondeur sur un profil de température mesuré avec une sonde submersible de bonne résolution et un pas de mesure de 1 m permettait de réduire l'incertitude en comparaison avec la méthode courante basée sur la circulation de l'eau avant la phase d'injection de chaleur durant le TRT (Gehlin et Nordell, 2003; Raymond et al., 2016; Raymond et al., 2017). De même, la délimitation arbitraire (basé sur un visuel du graphique) de l'intervalle de la zone perturbée versus non perturbée par les effets de variations de température en surface durant le calcul statistique de la température du sol non perturbé introduit une autre incertitude non négligeable. Pour corriger cette incertitude, la méthode proposée dans le Chapitre 3 a montré de bons résultats. Celle-ci est basée sur le concept de la profondeur de zéro amplitude de température qui permet d'évaluer la profondeur à partir de laquelle les effets de variations de la température à la surface sont amortis et n'ont plus d'impact sur l'évaluation de la valeur de la température non perturbé du sol. Le fait que ces corrections sont réalisées avec le profil de température mesuré dans l'ECG durant le TRT n'engendre pas un surcoût au niveau des travaux de terrain. Cependant, tous ces résultats ne

sont possibles que si les mesures de profils de température sont effectuées avec une sonde submersible de bonne résolution et avec un pas de mesure de moins de 5 m. Un investissement est donc à prévoir pour l'achat de la sonde submersible de bonne exactitude et le câble gradué.

5.2.2 Évaluation de la diffusivité thermique et de la capacité thermique

Malgré que la valeur de la diffusivité thermique du sous-sol soit importante dans la validation de l'analyse du TRT conventionnel par la méthode de la SLI, au travers du calcul du nombre de Fournier (Équation 2.9), les approches pour son évaluation in situ lors d'un TRT ont été peu développées (Raymond, 2018; Giordano et al., 2021). La méthode proposée dans le chapitre 3 apporte une contribution importante, en faisant en sorte que l'analyse du TRT conventionnel soit désormais validée à partir d'un nombre de Fournier évalué in situ en utilisant des données représentatives fournies par le profil de température mesuré dans l'ECG, au même site. À notre connaissance, ceci constitue une première scientifique car la pratique courante est d'utiliser les valeurs arbitraires déduites des tables de référence ou de la littérature ou à partir des résultats des essais dispendieux en laboratoire ou des ou à partir des simulations numériques complexes par la méthode bayésienne (Gehlin et Spitler, 2015; Raymond, 2018; Pasquier et Marcotte, 2020; Giordano et al., 2021). La disponibilité des valeurs in situ de la diffusivité thermique et de la capacité thermique contribue donc à réduire cette incertitude dans le résultat du TRT.

La rapidité d'exécution de la méthode d'analyse empirique a permis de montrer qu'elle peut être implémentée en parallèle à la réalisation d'un TRT conventionnel en utilisant le même profil de température qui a été mesuré pour l'évaluation de la température non perturbée du sous-sol. Cependant le résultat obtenu est sous forme d'une valeur effective inférée pour l'ensemble de la longueur interceptée par l'ECG. En considérant des matériaux géologiques de même densité ou très proche, la valeur effective sera peu utile pour caractériser suffisamment les hétérogénéités des matériaux géologiques traversés par l'ECG (Florides et Kalogirou, 2008; Boban et al., 2018).

5.2.3 Évaluation du profil de conductivité thermique, de l'hétérogénéité et de l'écoulement d'eau souterraine

Deux nouvelles approches (analytique et numérique) ont été développées pour caractériser l'impact de l'hétérogénéité du sous-sol et de l'écoulement souterrain autour d'un ECG. Les principaux résultats sont présentés sous la forme d'un profil de conductivité thermique. Il a été adéquatement corrélé aux unités lithostratigraphiques définis à partir des résultats des coupes

de forages tandis que la moyenne de la CT des unités thermophysiques a été validée par les résultats des TRT réalisés sur l'ECG pilote au site expérimental de l'INRS à Sainte-Foy.

L'approche analytique utilise une série de profils de température mesurés lors de la restitution thermique suite à la réalisation du TRT (Ballard et al., 2019). Cependant, l'utilisation de cette approche occasionne des coûts supplémentaires liés aux mesures des profils de température, après le TRT. À l'inverse, la méthode de simulation numérique qui consiste à reproduire le profil de température mesuré à l'équilibre utilise un seul profil de température, qui est le même que celui utilisé pour évaluer la température du sous-sol non perturbé. Les limitations courantes au développement d'un modèle numérique ont été surmontées pour des cas unidimensionnel (1D) et bidimensionnel (2D). Un modèle à 9 unités géologiques sur environ 150 m de profondeur a été considéré pour le site de l'INRS. Le développement de l'approche tridimensionnel (3D) pourrait certainement aider à prendre en compte l'anisotropie. Cependant, cette approche d'analyse 3D pourrait nécessiter plus de temps à converger avec des impacts sur le temps de réalisation des simulations numériques qui pourraient être hors délai du temps imparti pour le TRT et le projet. Les résultats présentés dans le chapitre 2 combinés à ceux du chapitres 3 et 4 ont permis de définir une coupe thermohydrostratigraphique de bonne résolution pour chaque ECG pilote, à des coûts nettement plus abordables et avec une facilité d'analyse du TRT, comparativement si des profils de température étaient mesurés avant et après le TRT.

5.2.4 Évaluation du flux de chaleur terrestre

La valeur du flux de chaleur terrestre a été inférée simultanément durant la simulation numérique inverse 1D. La valeur obtenue sur le cas pratique de l'ECG de l'INRS a montré une valeur similaire à celle évaluée analytiquement à partir de la combinaison de la valeur de la CT inférée par le TRT et du gradient de température provenant du profil de température mesuré dans l'ECG, par un modèle de sous-sol homogène (Márquez et al., 2018).

5.2.5 Propriétés thermophysiques du sous-sol au site de l'INRS

L'application in situ des méthodes de caractérisation développées au niveau de l'ECG du site de l'INRS (Québec) a permis de réaliser l'évaluation des propriétés thermophysiques du sous-sol à l'échelle du site. Les résultats obtenus ont permis de colliger des données géothermiques, géologiques et hydrogéologiques de bonne résolution afin de positionner ce site comme une référence scientifique pour établir des corrélations locales et régionales, sur au moins 150m de profondeur (Tableau 5.1).

Tableau 5.1 : Paramètres thermophysiques évaluées pour le l'ECG au site de l'INRS (Québec)

Paramètres utiles pour la conception des PACG	Approche analytique <i>Pambou et al. (2019)</i>	Approche semi-analytique <i>Pambou et al. (2022)</i>	Approche numérique <i>Pambou et al. (2023)²</i>	Autres références Raymond et al., (2017) Márquez et al. (2018) Giordano et al. (2021)
Température du sol non perturbé (°C)	7.90	7.96	-	7.80 - 8.03
Profondeur d'amortissement de l'onde thermique (m)	-	2.70	-	-
Conductivité thermique $k_{\text{eff}} \text{ (W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$	1.79 -1.82	-	1.86	1.71 - 2.19
Diffusivité thermique $\alpha_{\text{eff}} \text{ (m}^{-2}\text{ s}^{-1}\text{)}$	-	7.28×10^{-7}	-	-
Capacité thermique $C_{\text{eff}} \text{ (MJ m}^{-3}\text{ K}^{-1}\text{)}$	-	2.40	-	2.48 - 2.61
Flux de Darcy (m s ⁻¹)	4.2×10^{-9} à 1.0×10^{-8}	-	4.2×10^{-9} à 1.0×10^{-8}	-
Flux de chaleur terrestre $q_{\text{eff}} \text{ (mW m}^{-2}\text{)}$	-	-	25.60	28.9

5.3 Conclusions et perspectives

Ce projet doctoral a permis de développer des méthodes alternatives qui ont été regroupées dans un protocole unifié (Figure 5.1) permettant d'évaluer les propriétés thermophysiques du sous-sol et du flux de Darcy autour de l'ECG, en considérant un modèle de sous-sol hétérogène isotrope avec ou sans présence de l'écoulement souterrain, lors de l'analyse des TRT conventionnels à

² 3^e Article soumis à une revue scientifique.

l'étape de la conception des systèmes de PACG. Cette approche nouvelle, comparativement à la pratique actuelle dans le secteur, est basée sur l'utilisation des profils de température mesuré dans un ECG, en conditions non perturbé par un TRT, comme la source principale d'information géologique, hydrogéologique et géothermique enregistrées durant la diffusion de la température dans le sous-sol. En considérant les résultats des applications in situ sur un cas réel de l'ECG pilote du site de l'INRS, la correction in situ du profil de température, l'estimation in situ de la capacité thermique et de la diffusivité thermique ainsi que l'évaluation du profil de conductivité thermique du sous-sol se sont révélées faciles et rapides à implémenter, à un coût abordable. Ces résultats ont montré que les protocoles de mise en œuvre proposés sont facilement applicables. Ils ont également montré que toutes les méthodes proposées peuvent être implémentées simultanément dans le même délai que la réalisation et l'analyse d'un TRT conventionnel. Par contre, la résolution des capteurs de la sonde, le choix adéquat du pas de mesure et la rapidité à détecter les changements de température par la sonde ont été notés comme des sources potentielles d'erreurs. Par ailleurs, les principaux résultats scientifiques et techniques obtenus ont été comparés aux résultats existants à l'échelle du site et au niveau régional afin de contribuer au débat sur les perspectives de l'évaluation in situ des propriétés thermophysiques des unités géologiques et sur la caractérisation des d'hétérogénéité ainsi que l'évaluation de l'impact de l'écoulement souterrain, lors de la conception des PACG (Liebel, 2011; Gehlin et Spitler, 2015; Pehme et al., 2013; Raymond, 2018; Yoshioka et al., 2017; Robert et al., 2022). Bien plus, les résultats de ce projet de recherche ont donc permis de développer et de valider in situ le concept de TRT conventionnel selon une analyse thermostratigraphique et une nouvelle méthode pour l'évaluation in situ de la capacité thermique et de la diffusivité thermique du sous-sol. Cette nouvelle approche intégrée a montré son efficacité pour visualiser l'impact quantitative et qualitative de l'hétérogénéité du sous-sol avec ou sans écoulement souterrain sur les valeurs de la CT liée à conduction versus celle liée à l'advection, durant l'analyse du TRT (Pehme et al., 2013; Lehr et Sass, 2013; Robert et al., 2022). La comparaison avec les résultats obtenus avec des cas réels d'applications ont permis de montrer l'intérêt pratique et scientifique pour l'ingénieur d'utiliser ces nouvelles méthodes, fiables et peu couteuses, à l'étape de la conception des systèmes de PACG. Ces différents outils ont également permis d'identifier et de fournir une description des zones lithologiques ayant un rôle hydrogéologique potentiel, comme par exemple les zones fracturées, qui ont été reconnues comme ayant un impact sur le transfert de chaleur et un rôle hydraulique important dans le transport de masse (Klepikova, 2011; Pehme et al., 2013; Klepikova et al. 2016; Bense et al., 2016; Brixel et al.2019; Klepikova et al., 2020).

Cependant, plusieurs approches de solutions technologiques novatrices sur la caractérisation du sous-sol au voisinage des ECG ont fait face au défi d'acceptabilité et de transfert de compétences qui se caractérise par leur faible utilisation dans le secteur (Gehlin et Spitler, 2015; Rees, 2016; Raymond, 2018; Abesser et al., 2021). Pour cela, il est suggéré de mener une campagne de communication proactive et de démonstration immersive auprès des acteurs et des associations professionnelles du secteur afin d'introduire ces nouvelles méthodes et réaliser le transfert technologique et de compétences pour leur utilisation.

Les résultats obtenus par ce projet ont montré également l'intérêt de continuer d'explorer des approches novatrices proches des pratiques actuelles et qui peuvent avoir un potentiel de prix abordables. Par exemple, Il pourrait être intéressant de combiner ces nouveaux outils avec le TRT à câble chauffant en considérant le concept de double sonde (Raymond, 2018; Giordano et al., 2021). Un de tuyau de l'ECG servirait pour réchauffer l'eau avec le câble chauffant tandis que le second serait utilisé pour mesurer les profils de température avec une sonde submersible afin d'inférer le log thermostratigraphique durant la phase d'injection de chaleur au lieu d'attendre la phase de restitution. Cette approche permettrait de sauver du temps d'implémentation (Pambou et al., 2019).

L'utilisation des PACG installés dans les puits remplis d'eau ou des puits à colonnes permanentes dans le marché Nord-Américain suggère également de nouvelles perspectives d'extension d'utilisation des méthodes proposées (Pasquier et Marcotte, 2020; Robert et al., 2022). La présence de l'écoulement d'eau dans ces types d'ouvrages améliore le transfert de chaleur par les effets combinés de la conduction et de l'advection (Robert et al., 2022). Par exemple, l'utilisation de ces nouvelles méthodes pourrait servir pour confirmer la position des venues d'eau significatives et inférer un log hydrothermostratigraphique de haute précision. La prise en compte du traçage thermique en fonction du temps pour évaluer la composante de la CT liée à l'advection est également une approche à explorer car il est connu que l'écoulement souterrain est potentiellement variable en fonction des saisons (Jaziri et al., 2019; Abesser et al., 2021). De même, l'impact des vitesses de l'écoulement souterrain et de sa dispersion, la distribution des fractures ainsi que la connectivité de ces fractures a été considéré comme négligeable. Néanmoins les travaux. Kang et al. (2015), Klepikova et al. (2016) et de Brixel et al.(2019) ont montré que ces paramètres ont un impact sur la conductivité hydraulique et la transmissivité L'effet thermosiphon signalé par Gehlin (2001) a été également considéré comme négligeable lors de l'évaluation du profil de conductivité thermique dans la méthode analytique qui utilise les profils de température de la phase de restitution du TRT. L'analyse de l'impact de ces processus hydrogéologiques et hydrauliques pourraient servir comme une base de formulation de la

problématique d'un projet qui évaluerait leur impact sur le fonctionnement et la performance à long terme des PACG.

L'application de ces nouvelles méthodes pourrait être validée également sur projets des PACG installés dans des forages profonds (300 à 500m) qui sont de plus en plus utilisés pour tirer profit de l'augmentation de température en profondeur et du gradient géothermique afin d'augmenter la charge thermique extractible du sous-sol, avec une augmentation estimée d'environ 20% du coût de forage seulement (Gehlin et al., 2015; Pasquier et Marcotte, 2020). L'utilisation de l'analyse numérique du log hydrothermostratigraphique dans ces deux types de PACG (puits à colonne et puits profonds) pourrait servir à identifier le meilleur ratio coût/profondeur de la PACG. La cartographie sommaire des paramètres hydrothermostratigraphiques, du flux de chaleur en milieu urbain et pour améliorer les bases des données paléoclimatiques et géoscientifiques sont d'autres avenues fiables et rapides qui sont envisageables, à des coûts abordables.

Enfin, au plan personnel, ce projet doctoral m'a permis d'acquérir des nouvelles connaissances scientifiques et des techniques de prospection des ressources géothermiques et des géofluides afin de contribuer au débat et l'avancement de la recherche sur les enjeux stratégiques de la transition énergétique, leurs implications sur les retombées économiques et environnementales.

BIBLIOGRAPHIE

- Abesser, C., Schincariol, R. A., Raymond, J., García-Gil, A., Drysdale, R., Piatek, A., Molson, J. (2023). Case studies of geothermal system response to perturbations in groundwater flow and thermal regimes. *Groundwater*, 61(2), pp.255-273.
- Acuña, J. (2010). Improvements of U-pipe borehole heat exchangers, School of Industrial Engineering and Management (ITM), Energy Technology, Applied Thermodynamics and Refrigeration. Doctoral dissertation, p.97. KTH, Stockholm, Sweden. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:318637/FULLTEXT01.pdf>.
- Acuña, J., et Palm, B. (2011) Distributed temperature measurements on a multi-pipe coaxial borehole heat exchanger. 10th IEA Heat Pump Conference, Tokyo, Japan.
- Acuña, J., et Palm, B. (2013). Distributed thermal response tests on pipe-in-pipe borehole heat exchangers. *Applied Energy*, 109, pp.312-320.
- ADEME (2015). Cahier des charges pour la réalisation d'un test de réponse thermique de terrain (TRT), pour la réalisation d'une opération de PAC sur champ de sondes géothermiques verticales (CSGV) dans les secteurs résidentiels collectif, tertiaire ou industriel. Collection des cahiers des charges d'aide à la décision, Angers, France. http://ser-evenements.com/IMG/pdf/cdc_ademe_realisation_d'un_trt_2015_10_12.pdf.
- Adams, W. M., Watts, G., Mason, G. (1976). Estimation of thermal diffusivity from field observations of temperature as a function of time and depth. *American Mineralogist*, 61(7-8), pp.560-568.
- Adeniyi, M. O., Oshunsanya, S. O., Nymphas, E. F. (2012). Validation of analytical algorithms for the estimation of soil thermal properties using de Vries model. *Am. J. Sci. Ind. Res.*, 3, pp.103-114.
- Al-Khoury, R., Bonnier, P. G., Brinkgreve, R. B. J. (2005). Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part I: Steady state. *International journal for numerical methods in engineering*, 63(7), pp.988-1013.
- Andújar Márquez, J. M., Martínez Bohórquez, M. Á., Gómez Melgar, S. (2016). Ground thermal diffusivity calculation by direct soil temperature measurement. Application to very low enthalpy geothermal energy systems. *Sensors*, 16(3), 306.
- Antelmi, M., Alberti, L., Angelotti, A., Curnis, S., Zille, A., Colombo, L. (2020). Thermal and hydrogeological aquifers characterization by coupling depth-resolved thermal response test with moving line source analysis. *Energy Conversion and Management*, 225, 113400.

- Antelmi, M., Alberti, L., Barbieri, S., Panday, S. (2021). Simulation of thermal perturbation in groundwater caused by Borehole Heat Exchangers using an adapted CLN package of MODFLOW-USG. *Journal of Hydrology*, 596, 126106.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126106>, 2021.
- Aranzabal, N., Martos, J., Steger, H., Blum, P., Soret, J. (2018). Novel instrument for temperature measurements in borehole heat exchangers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(4), pp.1062-1070.
- ASHRAE Geothermal Energy (2003). In ASHRAE (dir.), *ASHRAE Handbook-HVAC Applications*, Chapter 34. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA.
- ASHRAE Geothermal Energy (2015). In ASHRAE (ed) *ASHRAE Handbook-HVAC applications*, chapter 34. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA.
- Asl, H. F., Fujii, H., Kosukegawa, H. (2015). Heat exchange rate enhancement in ground heat exchangers by water injection and pumping. *Transactions Geothermal Resource Council.*, 39, pp109-116.
- Asl, H. F., Fujii, H., Kosukegawa, H. (2018). Cooling tests, numerical modeling and economic analysis of semi-open loop ground source heat pump system. *Geothermics*, 71, pp.34-45.
- Austin III, W. A. (1998). Development of an in situ system for measuring ground thermal properties, Master dissertation, p.177, Oklahoma State University, Oklahoma, USA.
- Ballard, J-M., Koubikana, P. C. H., Raymond, J. (2016). Développement des tests de réponse thermique automatisés et vérification de la performance d'un forage géothermique d'un diamètre de 4,5 po. Internal report 1601, p.60. Institut national de la recherche scientifique, Québec, Canada.
- Ballard, J. M., Koubikana Pambou, C. H., Raymond, J. (2018). Évaluation de la performance d'un forage géothermique de conception améliorée. Institut National de la Recherche Scientifique. Rapport interne R1601, p.60. Quebec. Canada.
- Badache, M., Eslami-Nejad, P., Ouzzane, M., Aidoun, Z., Lamarche, L. (2016). A new modeling approach for improved ground temperature profile determination. *Renewable Energy*, 85, pp.436-444.
- Bédard, K., Comeau, F. A., Raymond, J., Malo, M., Nasr, M. (2018). Geothermal characterization of the St. Lawrence lowlands sedimentary basin, Québec, Canada. *Natural Resources Research*, 27, pp.479-502.

- Beier, R. A. (2011). Vertical temperature profile in ground heat exchanger during in situ test. *Renewable Energy*, 36(5), pp.1578-1587.
- Beltrami, H., et Mareschal, J. C. (1995). Resolution of ground temperature histories inverted from borehole temperature data. *Global and Planetary Change*, 11(1-2), pp.57-70.
- Berg, V., D., B., Breembroek, G., Ramsak, P., Schreiber, S., Richter, M., Siddiqi, G., (2019). Barriers. Opportunities and RetD needs for geothermal energy. Geothermica Office. Deliverable Geothermica D7.2 up date. 2018/2019. pp.1-45, Reykjavík. Island.
https://orkustofnun.is/gogn/GEOTHERMICA/D7.2Barriers_opportunities_RetD_Needs_def.pdf2.
 Consulté, le 2021-07-01.
- Bernier, M. (2001). Ground-coupled Heat pump system simulation. *ASHRAE Transactions*, 107(1), pp.605-616.
- Bense, V. F., Read, T., Bour, O., Le Borgne, T., Coleman, T., Krause, S., Selker, J. S. (2016). Distributed Temperature Sensing as a downhole tool in hydrogeology. *Water Resources Research*, 52(12), pp.9259-9273.
- Boban L., Soldo V., Stošić J., Filipović E., Tremac F. (2018). Ground Thermal Response and Recovery after Heat Injection: Experimental Investigation. *Transactions of FAMENA*, XLII-Special issue SI-1 (42), p12. <https://doi.org/10.21278/TOF.42Si104>
- Brixel, B., Klepikova, M., Lei, Q., Roques, C., Jalali, R., Loew, S. (2019). Thermo-hydrodynamic response of sparse fracture systems to heat injection. In proceeding of DECOVALEX 2019 Symposium Zurich, Switzerland. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000376200>
- Cardiff, M., Bakhos, T., Kitanidis, P. K., Barrash, W. (2013). Aquifer heterogeneity characterization with oscillatory pumping: Sensitivity analysis and imaging potential. *Water Resources Research*, 49(9), pp.5395-5410.
- Carslaw H. S. et Jaeger J. C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed. Oxford University Clarendon Press 30s, pp.310- 386, Oxford, UK.
- Castonguay, S., Tremblay, A., Lavoie, D. (2002). Carte de compilation géologique. Québec Chaudière. Les ponts géologiques de l'est du Canada. Transect 2. Dossier public 4314. Commission géologique du Canada. Québec.
- Chae, H., Nagano, K., Sakata, Y., Katsura, T., Serageldin, A. A., Kondo, T. (2020). Analysis of relaxation time of temperature in thermal response test for design of borehole size. *Energies*, 13(13), 3297.
- Cho, S. W., et Ihm, P. (2018). Development of a Simplified Regression Equation for Predicting Underground Temperature Distributions in Korea. *Energies*, 11(11), 2894.

- Choi, J. C., Park, J., Lee, S. R. (2013). Numerical evaluation of the effects of groundwater flow on borehole heat exchanger arrays. *Renewable Energy*, 52, pp.230-240.
- Chouinard, C. (2008). Reconstitutions des températures de surface au Canada : des températures basales du glacier laurentidien aux changements récents du climat arctique. Doctoral dissertation, p.136. Université du Québec à Montréal (UQAM), Montreal, Canada.
- Conti, P., Grassi, W., Testi, D. (2013). Proposal of a holistic design procedure for ground source heat pump systems. In *European Geothermal Congress 2013*. June 3-7, Pisa: Italy.
- Costello, T. A. (1986). Apparent Thermal Diffusivity of Soil Determined by Analysis of Diurnal Temperatures (Fourier Series, Nonlinear Regression). Doctoral dissertation, p212. Louisiana State University and Agricultural et Mechanical College, USA.
- Cui, W., Liao, Q., Chang, G., Chen, G., Peng, Q., Jen, T. C. (2011). Measurement and prediction of undisturbed underground temperature distribution. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. (54907), pp.671-676. Denver, Colorado, USA
- Dec, D., Dörner, J., Horn, R. (2009). Effect of soil management on their thermal properties. *J. Soil Sci. Plant Nutr*, 9(1), pp.26-39.
- Diersch, H. J., Bauer, D., Heidemann, W., Rühaak, W., Schätzl, P. (2011). Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: Part 1. Fundamentals. *Computers et Geosciences*, 37(8), pp.1122-1135.
- Droulia, F., Lykoudis, S., Tsiros, I., Alvertos, N., Akylas, E., Garofalakis, I. (2009). Ground temperature estimations using simplified analytical and semi-empirical approaches. *Solar Energy*, 83(2), pp.211-219.
- Duan, X., et Naterer, G. F. (2008). Ground thermal response to heat conduction in a power transmission tower foundation. *Heat and mass transfer*, 44(5), pp.547-558.
- Eskilson, P. (1987). Thermal analysis of heat extraction boreholes. Doctoral dissertation, p.117 University of Lund, Lund, Sweden.
- Florides, G., et Kalogirou, S. (2008). First in situ determination of the thermal performance of a U pipe borehole heat exchanger. in *Cyprus. Applied Thermal Engineering*. 28, 157, 4163. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.03.026>. 5
- Florides, G. A., Christodoulides, P., et Pouloupatis, P. (2013). Single and double U-tube ground heat exchangers in multiple-layer substrates. *Applied energy*, 102, pp.364-373.

- Franco, A., et Conti, P. (2020). Clearing a path for ground heat exchange systems: A review on thermal response test (TRT) methods and a geotechnical routine test for estimating soil thermal properties. *Energies*, 13(11), 2965.
- Fujii, H., Okubo, H., Itoi, R. (2006). Thermal response tests using optical fiber thermometers. In *GRC 2006 Annual Meeting: Geothermal Resources-Securing Our Energy Future*. pp. 545-551.
- Fujii, H., Okubo, H., Nishi, K., Itoi, R., Ohyama, K., Shibata, K. (2009). An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers. *Geothermics*, 38(4), pp.399-406.
- Fujii, H. (2009). Application of optical fiber thermometers in thermal response tests for detailed geological descriptions. In *Proceedings of 11th International Conference on Thermal Energy Storage*; Effstock Stockholm, Sweden.
- Gehlin, S. (2002). Thermal response test: method development and evaluation. Doctoral dissertation, p.191. Luleå tekniska universitet. Luleå. Sweden.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991442/fulltext01.pdf>
- Gehlin, S., et Nordell, B. (2003). Determining undisturbed ground temperature for thermal response test. In *ASHRAE Transactions*. 109(1), pp.151-156.
- Gehlin, S. E., et Hellström, G. (2003). Comparison of four models for thermal response test evaluation. *ASHRAE transactions*, 109, 131.
- Gehlin, S. E. et Spitler, J. D. (2015). Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, pp.1125-1137.
- Gehlin, S. E., Spitler, J. D., Hellström, G. (2016). Deep boreholes for ground source heat pump systems—Scandinavian experience and future prospects. In *ASHRAE Winter Meeting*. pp. 23-27. Orlando, USA.
- Giordano, N., Lamarche, L., Raymond, J. (2021). Evaluation of subsurface heat capacity through oscillatory thermal response tests. *Energies*, 14(18), 5791.
<https://doi.org/10.3390/en14185791>
- Globensky, Y. (1987). Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent. Mémoire 85-02. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, p.70. Quebec. Canada.
- GSHP (2011). Closed-Closed-loop Vertical Borehole Vertical Borehole Vertical Borehole Design. In *Design, Installation et Materials Standard Issue 1.0*. Ground Source Heat Pump Association, National Energy Centre, Milton Keynes, UK.

- Gwadera, M., Larwa, B., Kupiec, K. (2017). Undisturbed ground temperature-Different methods of determination. *Sustainability*, 9(11), 2055.
- Hakala, P., Martinkauppi, A., Martinkauppi, I., Leppaharju, N., Korhonen, K. (2014). Evaluation of the Distributed Thermal Response Test (DTRT) Nupurinkartano as a case study. Report of Investigation 211. Geological Survey of Finland. Espoo. Finland.
http://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_211.pdf. Consulté le 2022-10-21.
- Hakala, P., Vallin, S., Arola, T., Martinkauppi, I. (2022). Novel use of the enhanced thermal response test in crystalline bedrock. *Renewable Energy*, 182, pp.467-482.
- Hamm, S. G., Anderson, A., Blankenship, D., Boyd, L. W., Brown, E. A., Frone, Z., Winick, J. (2021). Geothermal Energy RetD: An Overview of the US Department of Energy's Geothermal Technologies Office. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(10), 100801.
- Harrison, B., Taylor, D., Tingate, P., Sandiford, M. (2012). Heat flow modelling and thermal history of the onshore Gippsland Basin: upside potential for unconventional gas and geothermal resources. *Eastern Australasian Basins Symposium IV*, Brisbane, Australia, p.15.
- Hellström, G. (1991). Ground heat storage: Thermal analysis of duct storage systems. Doctoral dissertation, p.277. University of Lund, Sweden.
- Holmes, T. R. H., Owe, M., De Jeu, R. A. M., Kooi, H. (2008). Estimating the soil temperature profile from a single depth observation: A simple empirical heat flow solution. *Water Resources Research*, 44(2), p.9.
- Holzbecher, E. (2005). Inversion of temperature time series from near-surface porous sediments. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2(4), pp.343-348.
- Horton, R., Wierenga, P. J., Nielsen, D. R. (1983). Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil Science Society of America Journal*, 47(1), pp.25-32.
- Huber H., et Arslan, U. (2012). Geothermal field tests with forced groundwater flow. Proceedings of the Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. SGP-TR-194, Stanford University, Stanford. UK.
- Huber, H., Arslan, U., Smith, C. (2015). The influence of the Darcy velocity of groundwater flow on the effective thermal conductivity. In *World Geothermal Congress*, p. 10.
- IEA ECES ANNEX 21: Thermal Response Test (TRT), (2013). Subtask 1 Final Report. Swedish Energy Agency, grant No. 30786-1. Stockholm, Swedish.
Available at:
http://media.geoenergicentrum.se/2017/11/IEA_ECES_2013_Annex21_FinalReport.pdf

- Javed, S., Spitler, J.D., Fahlén, P. (2011). An Experimental Investigation of the Accuracy of Thermal Response Tests Used to Measure Ground Thermal Properties. ASHRAE Transactions. pp.13-21.
- Javed, S., et Spitler, J. (2017). Accuracy of borehole thermal resistance calculation methods for grouted single U-tube ground heat exchangers. Applied Energy, 187, pp.790-806.
- Javidan, M., Asgari, M., Gholinia, M., Nozari, M., Asgari, A., Ganji, D. D. (2022). Thermal energy storage inside the chamber with a brick wall using the phase change process of paraffinic materials: A numerical simulation. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 12(3), 100329.
- Jaziri, N., Raymond, J., Giordano, N., Molson, J. (2019). Long-term temperature evaluation of a ground-coupled heat pump system subject to groundwater flow. Energies, 13(1), 96.
- Kang, P. K., Le Borgne, T., Dentz, M., Bour, O., et Juanes, R. (2015). Impact of velocity correlation and distribution on transport in fractured media: Field evidence and theoretical model. Water Resources Research, 51(2), pp.940-959.
- Kavanaugh, S. (2010). Determining thermal resistance. ASHRAE Journal, 52(8), pp.72-76.
- Kavanaugh, S (2016). Methods for determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Field. RESEARCH SUMMARY - ASHRAE 1118. pp.1-4.
Available at <http://www.geokiss.com/tech-notes/TCTestingSum.pdf>
- Khaleghi, K., et Livescu, S. (2022). A review of vertical closed-loop geothermal heating and cooling systems with an Emphasis on the importance of the subsurface. Journal of Petroleum Science and Engineering, 11113. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111137>
- Klepikova, M. V., Le Borgne, T., Bour, O., Davy, P. (2011). A methodology for using borehole temperature-depth profiles under ambient, single and cross-borehole pumping conditions to estimate fracture hydraulic properties. Journal of Hydrology, 407(1-4), pp.145-152.
- Klepikova, M. (2013). Imaging of fractured rock properties from flow and heat transport: field experiments and inverse modelling. Doctoral dissertation, p.235, Rennes 1, France.
- Klepikova, M. V., Le Borgne, T., Bour, O., Dentz, M., Hochreutener, R., Lavenant, N. (2016). Heat as a tracer for understanding transport processes in fractured media: Theory and field assessment from multiscale thermal push-pull tracer tests. Water Resources Research, 52(7), pp.5442-5457.
- Klepikova, M., Brixel, B., Dentz, M., & Roubinet, D. (2020). New insights in the characterization of sparse fracture systems obtained from Distributed Temperature Sensing data acquired during thermal experiments. In AGU Meeting Vol. 2020, pp. H067-08.

- Kluitenberg, G. J., Ham, J. M., Bristow, K. L. (1993). Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity. *Soil Science Society of America Journal*, 57(6), pp.1444-1451.
- Kurevija, T. et Vulin, D. (2010). Determining Of Undisturbed Ground Temperature As The Part Of Shallow Geothermal Resources Assessment, *The Mining-Geological-Petroleum Bulletin*, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Vol.22, p.27-36
- Kurevija, T., Strpić, K., Koščak-Kolin, S. (2018). Applying Petroleum Pressure Buildup Well Test Procedure on Thermal Response Test—A Novel Method for Analyzing Temperature Recovery Period. *Energies*. pp.366-386.
- Kusuda, T., et Achenbach, P. R. (1965). Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States. *ASHRAE Trans.*, 71, pp.61-74.
- Kutzner, S., Heberle, F., Brüggemann, D. (2022). Thermo-Economic Analysis of Near-Surface Geothermal Energy Considering Heat and Cold Supply within a Low-Temperature District Heating Network. *Process*, 10(2), 421.
- Lamarche, L., Raymond, J., Pambou, K.C. H. (2017). Evaluation of the internal and borehole resistances during thermal response tests and impact on ground heat exchanger design. *Energies*, 11(1), p.38.
- Lamarche, L. (2019). Horizontal ground heat exchangers modelling. *Applied thermal engineering*, 155, pp.534-545.
- Lanini S., et Nguyen D. (2009). Caractérisation de l'hétérogénéité verticale des propriétés thermophysiques du sous-sol par test de réponse thermique. Internal Report, p4. *Projet SOLARGEOTHERM*. Bureau de recherches géologiques et minières, Montpellier, France.
- Langlois, A. (2010). Pompes à chaleur géothermiques utilisant des banques thermiques à matériau à changement de phase. *Mémoire de Maîtrise*, p.168. École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- Lee, C. K., et Lam, H. N. (2012). A modified multi-ground-layer model for borehole ground heat exchangers with an inhomogeneous groundwater flow. *Energy*, 47(1), pp.378-387.
- Lehr, C., et Sass, I. (2014). Thermo-optical parameter acquisition and characterization of geologic properties: a 400-m deep BHE in a karstic alpine marble aquifer. *Environmental Earth Sciences*, 72, pp.1403-1419.
- Lehr, C. (2015). Characterization of Geologic and Geophysical Environments Using GRT Data. Scope of Enhanced Data Interpretation. *Proceedings World Geothermal Congress*, Melbourne, Australia.

- Li, Z., Wang, C., Fu, Q. (2022). Effects of groundwater flow on thermal response test of deep borehole heat exchanger. *Geothermics*, 106, 102570.
- Liebel, H. T. (2012). Influence of groundwater on measurements of thermal properties in fractured aquifers. Doctoral dissertation, p.196, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Liu, X., Polsky, Y., Qian, D., McDonald, J. (2018). Analysis of cost reduction potential of vertical bore ground heat exchanger. Final Report No. ORNL/TM-2018/756. pp.1-63. Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, USA. <https://doi.org/10.2172/1474649>
- Liu, X., Spitler, J. D., Qu, M., Shi, L. (2021). Recent developments in the design of vertical borehole ground heat exchangers for cost reduction and thermal energy storage. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(10), 100803.
- Liu, J., Wang, F., Cai, W., Wang, Z., Li, C. (2020). Numerical investigation on the effects of geological parameters and layered subsurface on the thermal performance of medium-deep borehole heat exchanger. *Renewable energy*, 149, pp.384-399.
- Loveridge, F., Holmes, G., Powrie, W., Roberts, T. (2013). Thermal response testing through the Chalk aquifer in London, UK. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 166(2), pp.197-210.
- Low, J. E., Loveridge, F. A., Powrie, W., Nicholson, D. (2015). A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications. *Acta geotechnica*, 10, pp.209-218.
- Majorowicz, J., et Minea, V. (2012). Geothermal energy potential in the St-Lawrence River area, Québec. *Geothermics*, 43, pp.25-36.
- Marcotte, D., et Pasquier, P. (2008). On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. *Renewable energy*, 33(11), pp.2407-2415.
- Mareschal, J. C., Jaupart, C., Gariépy, C., Cheng, L. Z., Guillou-Frottier, L., Bienfait, G., Lapointe, R. (2000). Heat flow and deep thermal structure near the southeastern edge of the Canadian Shield. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 37(2-3), pp.399-414.
- Márquez, V., M., I., Raymond, J., Blessent, D., Philippe, M., Simon, N., Bour, O., Lamarche, L. (2018). Distributed thermal response tests using a heating cable and fiber optic temperature sensing. *Energies*, 11(11), 3059.
- Márquez, M. I. V., Raymond, J., Blessent, D., Philippe, M. (2019). Terrestrial heat flow evaluation from thermal response tests combined with temperature profiling. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 113, pp.22-30.

- Martos, J., Montero, Á., Torres, J., Soret, J., Martínez, G., García-Olcina, R. (2011). Novel wireless sensor system for dynamic characterization of borehole heat exchangers. *Sensors*, 11(7), pp.7082-7094.
- Mielke, P., Bär, K., Sass, I. (2017). Determining the relationship of thermal conductivity and compressional wave velocity of common rock types as a basis for reservoir characterization. *Journal of Applied Geophysics*, 140, pp.135-144.
- Miranda, M. M., Giordano, N., Raymond, J., Pereira, A. J., Dezayes, C. (2020). Thermophysical properties of surficial rocks: a tool to characterize geothermal resources of remote northern regions. *Geothermal Energy*, 8(1), pp.1-27.
- Miranda, M. M., Márquez, M. I. V., Raymond, J., Dezayes, C. (2021). A numerical approach to infer terrestrial heat flux from shallow temperature profiles in remote northern regions. *Geothermics*, 93, 102064. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102064>.
- Mogensen, P. (1983). Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages. Document-Swedish Council for Building Research, (16), 652-657.
- Naranjo-Mendoza, C., Wright, A. J., Oyinlola, M. A., Greenough, R. M. (2018). A comparison of analytical and numerical model predictions of shallow soil temperature variation with experimental measurements. *Geothermics*, 76, pp.38-49.
- Nasr, M., Raymond, J., Malo, M., Gloaguen, E. (2018). Geothermal potential of the St. Lawrence Lowlands sedimentary basin from well log analysis. *Geothermics*, 75, pp.68-80.
- Nassar, I. N., et Horton, R. (1990). Determination of soil apparent thermal diffusivity from multiharmonic temperature analysis for nonuniform soils. *Soil Science*, 149(3), pp.125-130.
- Nebballi, R., et Makhoulf, S. (2007). Détermination de la distribution du champ de températures dans le sol, par un modèle semi-analytique. Conditions aux limites pour les besoins de simulation d'une serre de culture. *Revue des énergies renouvelables CER*, 7, pp.255-258.
- Nelder, J. A., et Mead, R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, 7(4), pp.308-313. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>
- Nusier, O., et Abu-Hamdeh, N. (2003). Laboratory techniques to evaluate thermal conductivity for some soils. *Heat and mass transfer*, 39(2), pp.119-123.
- Oberdorfer, P. (2014). Heat Transport Phenomena in Shallow Geothermal Boreholes: Development of a Numerical Model and a Novel Extension for the Thermal Response Test Method by Applying Oscillating Excitations. Doctoral dissertation, p.117. Göttingen, Georg-August Universität. Deutschland.

- Pambou, K., C., H., Raymond, J., Lamarche, L. (2019). Improving thermal response tests with wireline temperature logs to evaluate ground thermal conductivity profiles and groundwater fluxes. *Heat and Mass Transfer*, 55, pp.1829-1843.
- Pambou, C. H. K., Raymond, J., Miranda, M. M., Giordano, N. (2022). Estimation of in situ heat capacity and thermal diffusivity from undisturbed ground temperature profile measured in ground heat exchangers. *Geosciences*, 12(5), 180.
- Pahud, R. (2001). Étude pilote du stockage diffusif des bâtiments du Centre D4 de la Suva Root à Lucerne: études de 2 tests de réponse thermique et intégration du stockage diffusif dans le système. Internal report, p.32. Office Fédéral de l'Énergie, Lausanne, Suisse.
- Pahud, D. (2001b). Two response tests of two «identical» boreholes drilled to a depth of 160 m near Luzern. In proceedings of the workshop «Test de réponse géothermique», EPFL Lausanne, 25-26 October 2001, pp.37-47.
- Pasquier, P., Nguyen, A., Eppner, F., Marcotte, D., P., Baudron. (2016). 10-Standing column wells. In S. J. Rees (Ed.), *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Woodhead Publishing. pp.269-294
- Pasquier, P., et Marcotte, D. (2020). Robust identification of volumetric heat capacity and analysis of thermal response tests by Bayesian inference with correlated residuals. *Applied Energy*, 261, 114394, pp.1-18.
- Pasquier, P., et Lamarche, L. (2022). Analytic expressions for the moving infinite line source model. *Geothermics*, 103, p.102413.
- Pehme, P. E., Greenhouse, J. P., Parker, B. L. (2007). The Active Line Source Temperature Logging Technique and Its Application in Fractured Rock Hydrogeology Active Line Source Logging. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 12(4), pp.307-322.
- Pehme, P. E., Parker, B. L., Cherry, J. A., Molson, J. W., Greenhouse, J. P. (2013). Enhanced detection of hydraulically active fractures by temperature profiling in lined heated bedrock boreholes. *Journal of Hydrology*, 484, pp.1-15.
- Piechowski, M. (1996). A ground coupled heat pump system with energy storage. Doctoral dissertation, p.264, University of Melbourne, Australia.
- Pishkariahmadabad, M., Ayed, H., Xia, W. F., Aryanfar, Y., Almutlaq, A. M., Bouallegue, B. (2021). Thermo-economic analysis of working fluids for a ground source heat pump for domestic uses. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101330.

- Popov, Y. A., Pribnow, D. F., Sass, J. H., Williams, C. F., Burkhardt, H. (1999). Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. *Geothermics*, 28(2), pp.253-276.
- Popov, Y., Beardsmore, G., Clauser, C., Roy, S. (2016). ISRM suggested methods for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, pp.4179-4207.
- Popov, E., Romushkevich, R., Popov, Y. (2017). Measurements of the rock thermal properties on the standard core plugs as a necessary stage of the thermalphysic investigations of the hydrocarbon fields. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*, 2, pp.56-70.
- Project GEOPLASMA-CE. (2017). Joint report on chosen approaches and methods for calibration. D.T3.5.1 version 1, Interreg, Central Europ.
Available at <http://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE.html>.
- Radioti, G., Sartor, K., Charlier, R., Dewallef, P., Nguyen, F. (2017). Effect of undisturbed ground temperature on the design of closed-loop geothermal systems: A case study in a semi-urban environment. *Applied energy*, 200, pp.89-105.
- Rajaobelison, M., Raymond, J., Malo, M., Dezayes, C., Larmagnat, S. (2022). Understanding heat transfer along extensional faults: The case of the Ambilobe and Ambanja geothermal systems of Madagascar. *Geothermics*, 104, 102455.
- Raymond, J. (2010). Geothermal system optimization in mining environments. Doctoral dissertation, p.238, Université Laval, Québec, Canada.
- Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L. (2011). Borehole temperature evolution during thermal response tests. *Geothermics*, 40(1), pp.69-78.
- Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L., Lefebvre, R. (2011). Numerical analysis of thermal response tests with a groundwater flow and heat transfer model. *Renewable Energy*, 36(1), pp.315-324.
- Raymond J., Therien R., Gosselin L., Lefebvre R. (2011a). A review of thermal response test analysis using pumping test concepts. *Ground Water*, pp.932-945.
- Raymond, J., et Lamarche, L. (2013). Simulation of thermal response tests in a layered subsurface. *Applied energy*, 109, pp.293-301.
- Raymond, J., Lamarche, L., Malo, M. (2015). Field demonstration of a first thermal response test with a low power source. *Applied energy*, 147, pp.30-39.

- Raymond, J., Lamarche, L., Malo, M. (2016). Extending thermal response test assessments with inverse numerical modeling of temperature profiles measured in ground heat exchangers. *Renewable Energy*, 99, pp.614-621.
- Raymond, J., Ballard, J., Pambou, K., C., H., Kwemo, P. (2017). Field assessment of a ground heat exchanger performance with a reduced borehole diameter. In *Proceedings of the 70th Canadian Geotechnical Conference and the 12th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference*, Ottawa. ON. Canada. 1-4 October. p.6
- Raymond, J., Sirois, C., Nasr, M., Malo, M. (2017). Evaluating the geothermal heat pump potential from a thermostratigraphic assessment of rock samples in the St. Lawrence Lowlands, Canada. *Environmental Earth Sciences*, 76(2), 83.
- Raymond, J. (2018). Colloquium 2016: Assessment of subsurface thermal conductivity for geothermal applications. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(9), pp.1209-1229.
- Raymond, J., Bédard, K., Comeau, F. A., Gloaguen, E., Comeau, G., Millet, E., Foy, S. (2019). A workflow for bedrock thermal conductivity map to help designing geothermal heat pump systems in the St. Lawrence Lowlands, Québec, Canada. *Science and Technology for the Built Environment*, 25(8), pp.963-979.
- Read, T., O. Bour, V. F. Bense, T. Le Borgne, P. Goderniaux, M. Klepikova, R. Hochreutener. N. Lavenant and V. Boschero (2013). Characterizing groundwater flow and heat transport in fractured rock using fiber-optic distributed temperature sensing, *Geophys. Res. Lett.*, 40, pp.2055–2059, doi:10.1002/grl.50397.
- Rees S., J., (2016). *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Woodhead Publishing. p.480. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03840-3>
- Robert, F., et Gosselin, L. (2014). New methodology to design ground coupled heat pump systems based on total cost minimization. *Applied Thermal Engineering*, 62(2), pp.481-491.
- Robert, S., Pasquier, P., Nguyen, A. (2022). Impact of layered heterogeneity on thermal response test interpretation performed on a standing column well operated without bleed. *Geothermics*, 101, 102353.
- Rohner, E., Rybach, L., Schärli, U. (2005). A new, small, wireless instrument to determine ground thermal conductivity in situ for borehole heat exchanger design. In *Proceedings World Geothermal Congress*. Antalya, Turkey.
- Rouleau, J., Gosselin, L., Raymond, J. (2016). New concept of combined hydro-thermal response tests (H/TRT) for ground heat exchangers. *Geothermics*, 62, pp.103-114.
<https://corpus.ulaval.ca/server/api/core/bitstreams/5a0546d4-4518-4c53-975b-1a8a01300e4e/content>

- Sakata, Y., Katsura, T., Nagano, K., Ishizuka, M. (2017). Field analysis of stepwise effective thermal conductivity along a borehole heat exchanger under artificial conditions of groundwater flow. *Hydrology*, 4(2), pp.21-41.
- Sakata, Y., Katsura, T., Serageldin, A. A., Nagano, K., Ooe, M. (2021). Evaluating variability of ground thermal conductivity within a steep site by history matching underground distributed temperatures from thermal response tests. *Energies*, 14(7), 1872.
- Signorelli, S., et Kohl, T. (2004). Regional ground surface temperature mapping from meteorological data. *Global and Planetary Change*, 40(3-4), pp.267-284.
- Simon, F. (2016). Développement d'une approche nouvelle pour les tests de réponse thermique en géothermie. Mémoire de Maîtrise, p.171. École de technologie supérieure. Montréal, Canada.
- Soldo, V., Boban, L., Borović, S.(2016). Vertical distribution of shallow ground thermal properties in different geological settings in Croatia, *Renewable Energy* (99), pp.1202-1212 (
- Skarphagen, H., Banks, D., Frengstad, B. S., Gether, H. (2019). Design considerations for borehole thermal energy storage (BTES): A review with emphasis on convective heat transfer. *Geofluids*, 26, 4961781. <https://doi.org/10.1155/2019/4961781>
- Spitler, J. D., et Gehlin, S. E. (2015). Thermal response testing for ground source heat pump systems-An historical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, pp.1125-1137.
- Stallman, R. W. (1965). Steady one-dimensional fluid flow in a semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature. *Journal of geophysical Research*, 70(12), pp.2821-2827.
- Sundberg J., Back P-E., Ländell M., Sundberg A. (2009). Modelling of temperature in deep boreholes and evaluation of geothermal heat flow at Forsmark and Laxemar. SKB Internal Report, GEO INNOVA AB, Stockholm, Sweden
- Taniguchi, M. (1993). Evaluation of vertical groundwater fluxes and thermal properties of aquifers based on transient temperature-depth profiles. *Water Resources Research*, 29(7), pp.2021-2026.
- Tong, B., Gao, Z., Horton, R., Wang, L. (2017). Soil apparent thermal diffusivity estimated by conduction and by conduction–convection heat transfer models. *Journal of Hydrometeorology*, 18(1), pp.109-118.
- Verdoya, M., Chiozzi, P., Pasquale, V. (2007). Thermal log analysis for recognition of ground surface temperature change and water movements. *Climate of the Past*, 3(2), pp.315-324.

- Verdoya, M., Imitazione G., Chiozzi P., Armadillo E., Pasqua C. (2015). Interpretation of Thermal Response Tests in Borehole Heat Exchangers Affected by Advection. Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia.
- Vidal, J., Genter, A. Chopin, F. (2017) Permeable fracture zones in the hard rocks of the geothermal reservoir at Rittershoffen, France. *Journal of Geophysical Research*. 122, pp.4864-4887
- Wagner, R., et Clauser, C. (2005). Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity. *Journal of geophysics and engineering*, 2(4), pp.349-356.
- Wagner, V., Bayer, P., Kübert, M., Blum, P. (2012). Numerical sensitivity study of thermal response tests. *Renewable Energy*, 41, pp.245-253.
- Wagner, V., Bayer, P., Bisch, G., Kübert, M., Blum, P. (2014). Hydraulic characterization of aquifers by thermal response testing: Validation by large-scale tank and field experiments. *Water Resources Research*, 50(1), pp.71-85.
- Wang, J., Lee, W. F., Ling, P. P. (2020). Estimation of thermal diffusivity for greenhouse soil temperature simulation. *Applied Sciences*, 10(2), 653.
- Waples, D. W., et Waples, J. S. (2004). A review and evaluation of specific heat capacities of rocks, minerals, and subsurface fluids. Part 1: Minerals and nonporous rocks. *Natural resources research*, 13(2), pp.97-122.
- Waples, D. W., et Waples, J. S. (2004). A review and evaluation of specific heat capacities of rocks, minerals, and subsurface fluids. Part 2: Minerals and nonporous rocks. *Natural resources research*, 13(2), pp.123-130.
- Williams, G. P., et Gold, L. W. (1976). Ground Temperatures. Internal Report. National Research Council Canada, CBD-180, 100, p.101.
- Xing, L. U. (2014). Estimations of undisturbed ground temperatures using numerical and analytical modeling. Doctoral dissertation, p.405. Oklahoma State University. Stillwater, USA.
- Yang, H., Cui, P., Fang, Z. (2010). Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. *Applied energy*, 87(1), pp.16-27.
- Yoshioka, M., Takakura, S., Uchida, Y. (2018). Estimation of groundwater flow from temperature monitoring in a borehole heat exchanger during a thermal response test. *Hydrogeology Journal*, 26(3), pp.853-867.

- Zervantonakis I., et Reuss, M. (2006). Quality requirements of a thermal response test. Proceedings of the 10th International Conference on Thermal Energy Storage, Pomonoma, USA.
- Zhang, B., Gu, K., Shi, B., Liu, C., Bayer, P., Wei, G., Yang, L. (2020). Actively heated fiber optics based thermal response test: A field demonstration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110336.
- Zhou, Z., Roubinet, D., Tartakovsky, D. M. (2021). Thermal experiments for fractured rock characterization: theoretical analysis and inverse modeling. *Water Resources Research*, 57(12), p.17. WR030608.
- Zschocke, A. (2005). Correction of non-equilibrated temperature logs and implications for geothermal investigations. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2(4), pp.364-371.

6 ANNEXE I

Cette section présente la vérification du maillage numérique, son impact et la validation du choix de la profondeur pour la condition frontière à la base des modèles numériques (chapitre 4).

6.1 Évaluation de l'impact du maillage et identification du maillage optimal

L'enjeu était d'identifier le maillage optimal pour obtenir des résultats de bonne résolution en se basant sur la valeur de la fonction objective (solver). L'impact de la variation du maillage sur la valeur des paramètres et de la fonction objective a été vérifié afin de minimiser l'incertitude dans les principaux résultats (Tableaux 3-5 ; Figures 8 et 9).

Les valeurs des températures observées et la valeur de la fonction objective (solver) ont été restitués dans les Tableaux 6.1 à 6.5 qui restituent l'impact sur la distribution des températures en considérant deux profondeurs situées respectivement dans la zone affectée respectivement par les effets de la température de surface (10m) et celle qui ne l'est pas (100m) mais soumise aux effets du gradient géothermique.

Tableau 6.1 : Évaluation de l'impact du type maillage sur la valeur de la température à 10m et 100 m de profondeur (Modèle 1D).

Type de maillage	Nombre d'éléments	Température (°C)		Valeur de la fonction objective (solver)
		Profondeur (10m)	Profondeur (100m)	
Extrêmement grossier	15	7.685	6.645	12.753
Normal	27	6.575	6.645	3.327
Extrêmement fin	100	6.565	6.645	2.319

Tableau 6.2 : Évaluation de l'impact de la taille des éléments sur la valeur de la température à 10m et 100 m de profondeur (Modèle 1D).

Taille des éléments du maillage (m)	Température (°C)		Valeur de la fonction objective (solver)
	Profondeur (10m)	Profondeur (100m)	
10	6.550	6.620	2.631
7	6.570	6.620	0.454
3	6.560	6.620	0.0742

Tableau 6.3 : Évaluation de l'impact du type de maillage sur la valeur de la fonction objective et la température qui a été évaluée à 1000 m de profondeur (Modèle 1D)

Type de maillage	Nombre d'éléments	T (°C)	Valeur de la fonction objective (solver)
Très grossier	15	19.985	1468.62
Grossier	19	19.992	685.71
Normal	27	20.004	192.31
Fin	50	20.001	9.97
Extrêmement fin	100	20.000	0.78

Pour le modèle 2D, l'impact du raffinement du maillage a été évalué autour de deux profondeurs critiques (Tableau 4.4, 4.5).

Tableau 6.4 : Évaluation de l'impact du type maillage uniforme sur la valeur de la température à 10m et 100 m de profondeur (Modèle 2D).

Type de maillage	Nombre d'éléments	Température (°C)	
		Profondeur (10m)	Profondeur (100m)
Extrêmement grossier	75	6.657	7.961
Normal	222	6.672	7.969
Extrêmement fin	5053	6.684	7.972

Table 6.5 : Impact du raffinement de maillage sur la limite supérieure du modèle et au niveau zones fracturées (Modèle 2D).

Type de maillage	Nombre d'éléments	Température (°C)	
		Profondeur (10m)	Profondeur (100m)
Extrêmement grossier	135	6.681	7.426
Normal	484	6.682	7.627
Extrêmement fin	1572	6.685	7.797

Tous les contrôles réalisés ont permis d'observer que le maillage extrêmement fin, avec un écart de 10 à 20% de différence de temps de simulation, fournissait un résultat acceptable par rapport aux autres types de maillages disponibles.

6.2 Profondeur de la frontière basale

Le choix de la distance à laquelle imposer la condition frontière basale a été également vérifiée en se basant sur les variations relatives de température, en positionnant le flux de chaleur terrestre à différente profondeur, tout en s'assurant que l'indépendance du maillage a été

respectée pour la profondeur cible. Cette vérification a été réalisée pour des profondeurs comprises entre 100 et 1000 m (Tableau 7.6). La température a été évaluée à la base du modèle à la profondeur correspondante proposée pour imposer le flux de chaleur terrestre, en considérant le maillage optimal pour le modèle.

Tableau 6.6 : Choix de la profondeur du flux de chaleur (maillage extrêmement fin)

Profondeur (m) proposée pour la base du modèle	T (°C)	Différence relative (%)
100	6.62	1.09
200	8.00	7.49×10^{-03}
300	9.50	5.42×10^{-06}
400	11.00	9.88×10^{-10}
450	11.75	5.09×10^{-12}
500	12.5	0
550	13.25	0
600	13.25	0
700	15.50	0
800	17.00	0
900	18.50	0
1000	20.00	0

Il a été observé que la différence relative pour la température évaluée à partir du moment où la frontière est à 500m de profondeur devenait négligeable. Cette profondeur a donc été sélectionnée comme une valeur raisonnable pour positionner la base du modèle.