

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE  
M. Ing.

PAR  
Toufik Amin TALABOULMA

TEST DE RÉPONSE THERMIQUE (TRT) PAR CÂBLES CHAUFFANTS DANS UN  
ÉCHANGEUR DE CHALEUR GÉOTHERMIQUE A EXPANSION DIRECTE (DX)

MONTRÉAL, LE 25 NOVEMBRE 2013

©Tous droits réservés, Toufik Amin Talaboulma, 2013

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis Lamarche, directeur de mémoire  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Stanislaw Kajl, codirecteur de mémoire  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Christian Belleau, président du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Rousse, membre du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

LE 15 NOVEMBRE 2013

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

J'adresse mes sincères remerciements, à mon directeur de recherche le professeur Louis Lamarche pour son soutien et d'avoir dirigé ce travail me faisant ainsi bénéficier de ses conseils judicieux et de son implication dans le domaine de la géothermie. De plus, le professeur Lamarche a été le premier à m'accueillir chaleureusement dès ma première session d'études au Québec, il a témoigné de sa confiance à mon égard en me permettant de prendre part à ce projet expérimental novateur et en m'accordant la liberté dans ma recherche.

Je désire remercier mon codirecteur de recherche, le professeur Stanislaw Kajl pour ses conseils, son soutien et l'attention apportée à mon travail.

Je remercie Jasmin Raymond, pour ses conseils scientifiques et le partage de son expertise, grâce à qui j'ai réalisé l'expérimentation et poursuivi mes activités de recherche jusqu'au dépôt de ce mémoire.

J'aimerais remercier les professeurs Christian Belleau et Daniel Rousse pour avoir accepté de siéger au sein du jury, et pour avoir démontré de l'intérêt envers mes activités de recherche.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont supporté et encouragé au cours de ces années de travail, tout particulièrement mes parents Bahia et Arezki, ma sœur Imen et mon frère Walid. Je remercie aussi ma femme Maya, pour m'avoir soutenu et encouragé durant toutes les périodes difficiles.



# TEST DE RÉPONSE THERMIQUE (TRT) PAR CÂBLES CHAUFFANTS DANS UN ÉCHANGEUR DE CHALEUR GÉOTHERMIQUE A EXPANSION DIRECTE (DX)

Toufik Amin TALABOULMA

## RÉSUMÉ

La conception d'un système géothermique dépend des propriétés thermiques du sous-sol. Ces propriétés sont la conductivité thermique, diffusivité thermique et la capacité thermique. Ces propriétés peuvent varier selon les zones géographiques et sont donc calculées à partir d'un test de réponse thermique.

La méthode d'essai conventionnelle est cependant très coûteuse, car elle nécessite la mobilisation d'un équipement lourd. La manipulation de l'équipement sur le terrain est également laborieuse. Les réservoirs d'eau et les canalisations doivent être manipulés avec précaution pour éviter les fuites. La tuyauterie doit être bien isolée afin de minimiser le transfert de chaleur vers l'environnement extérieur.

Une nouvelle méthode d'expérimentation alternative qui est plus facile à exécuter, pour conduire les tests de réponse thermique sur le terrain (TRT) in situ, utilise un câble chauffant introduit verticalement dans le puits pour mesurer la température du fluide à différentes profondeurs. Pour évaluer la conductivité thermique du sous-sol le modèle de la ligne source est utilisé en combinaison avec le principe de superposition des courbes durant la période de restitution thermique. L'analyse du test de réponse thermique est aussi réalisée avec un modèle numérique tridimensionnel qui prend en considération l'état hétérogène du sous-sol ainsi que les fluctuations de l'injection de chaleur et de l'épaisseur du tube.

**Mots-clés :** Géothermique, pompe à chaleur, conductivité thermique, test de réponse thermique, câble chauffant, modèle de la ligne -source.



# TEST DE RÉPONSE THERMIQUE (TRT) PAR CÂBLES CHAUFFANTS DANS UN ÉCHANGEUR DE CHALEUR GÉOTHERMIQUE A EXPANSION DIRECTE (DX)

Toufik Amin TALABOULMA

## ABSTRACT

The design of a geothermal system depends on the thermal properties of the subsurface. These properties are the thermal conductivity, thermal diffusivity and the heat capacity. These properties can vary for different geographic locations and are therefore calculated from a thermal response test.

The conventional test method is however very expensive because it requires the mobilization of heavy equipment. Handling equipment in the field is also laborious. Water tanks and piping must be handled carefully to avoid leaks. The piping should be well insulated to minimize heat transfer to the external environment.

A new alternative testing method that are easier to run, to lead the thermal response tests (TRT) in situ, using a heating cables inserted vertically into the wells to measure the fluid temperature at different depths. To evaluate the thermal conductivity of the subsurface the line source model is used in combination with the principle of superposition of the curves during the thermal recovery period. The analysis of the thermal response test is also performed with a three-dimensional numerical model that considers the heterogeneous state of the basement so that the fluctuations of the heat injection and the thickness of the pipe.

**Key words:** Geothermal, heat pump, thermal conductivity, thermal response test, heating cable, line-source model.



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 GÉNÉRALITÉS .....	5
1.1 Systèmes de pompes à chaleur géothermique.....	5
1.2 Échangeur géothermique vertical en boucle fermée.....	6
1.3 La résistance et la conductivité thermique du sol .....	9
1.4 Essai de réponse thermique.....	13
CHAPITRE 2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	15
2.1 Introduction.....	15
2.2 Les méthodes de TRT .....	15
2.2.1 La méthode avec des sondes .....	15
2.2.2 La méthode expérimentale des déblais de forage .....	16
2.2.3 La méthode d'identification du sol et de la roche.....	17
2.2.4 La méthode des essais sur le terrain.....	18
2.3 Les modèles analytiques appliqués aux TRT.....	21
2.3.1 Le modèle de la ligne source .....	22
2.3.2 Le modèle de la source cylindrique .....	24
2.4 Les modèles numériques appliqués aux TRT .....	27
2.4.1 Modèles numériques unidimensionnels.....	27
2.4.2 Modèles numériques bidimensionnels.....	28
2.4.3 Modèles numériques tridimensionnels .....	30
2.5 Mise en contexte.....	33
CHAPITRE 3 DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DU MONTAGE EXPÉRIMENTAL.....	35
3.1 Introduction.....	35
3.2 Dispositif expérimental.....	35
3.3 Instrumentation .....	38
3.3.1 Mesure de la température.....	38
3.3.2 Mesure de la tension électrique.....	39
3.3.3 Système d'acquisition de données .....	40
3.4 Déroulement des expériences .....	41
3.5 Problèmes rencontrés lors de l'analyse expérimentale .....	41
3.6 Déroulement de l'analyse expérimentale.....	42
3.6.1 Cas d'injection de chaleur sans interruption.....	43
3.6.2 Cas d'injection de chaleur avec interruption .....	47
3.7 Déroulement de l'analyse analytique.....	50
CHAPITRE 4 DEVELOPPEMENT DU MODELE NUMERIQUE.....	53
4.1 Le modèle numérique 3D dans COMSOL Multyphysics®.....	53

4.2	La méthodologie du modèle numérique .....	54
4.3	La méthodologie de L'estimation de la conductivité thermique du sous-sol .....	58
CHAPITRE 5 RESULTATS ET DISCUTION .....		63
5.1	Introduction.....	63
5.2	Vue d'ensemble des résultats et méthodes d'évaluation de la conductivité thermique	67
5.2.1	Résultats pour une injection de chaleur constante .....	68
5.2.2	Résultats pour une injection de chaleur constante avec interruption .....	80
5.2.3	Distribution de la conductivité thermique du sous-sol .....	88
CHAPITRE 6 ANALYSE D'ERREUR DE L'ESSAI DE RÉPONSE THERMIQUE .....		91
6.1	Introduction.....	91
6.2	Équation de la ligne source infinie.....	92
6.3	Méthode .....	94
6.4	Résultats.....	95
6.4.1	Erreurs de mesure .....	95
6.4.1.1	La température du fluide.....	96
6.4.1.2	La puissance fournie .....	96
6.4.1.3	Le temps.....	96
6.4.2	Erreurs de paramètres .....	96
6.4.2.1	La longueur active de l'échangeur de chaleur géothermique (H).....	97
6.4.2.2	La capacité thermique du sol (C).....	97
6.4.2.3	Le rayon de forage ( $r_o$ ).....	97
6.4.3	Propagation des erreurs (combinaison).....	98
6.4.3.1	L'erreur du flux de chaleur.....	98
6.4.4	Erreur des paramètres d'intérêt (combinaison) .....	99
6.4.5	La sensibilité des paramètres .....	100
6.5	Comparaison des résultats.....	102
CONCLUSION.....		105
RECOMMANDATIONS .....		107
BIBLIOGRAPHIE.....		109

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Les propriétés thermiques du sol .....18
Tableau 3.1	Température non perturbée du sous-sol à différentes profondeurs pour un TRT d'une durée de 50 h.....43
Tableau 3.2	Température non perturbée du sous-sol à différentes profondeurs pour un TRT d'une durée de 74 h.....44
Tableau 3.3	Température non perturbée du sous-sol à différentes profondeurs pour un TRT d'une durée de 100h avec une interruption de 8h. ....47
Tableau 4.1	Les caractéristiques géométriques et thermiques du modèle numérique. .54
Tableau 5.1	Évaluation de la conductivité thermique pour Test de 50h et 74h Section T5_L7. ....66
Tableau 5.2	Comparaison des résultats de la conductivité thermique des deux méthodes. ....89
Tableau 6.1	Les différents paramètres et les estimateurs dans l'analyse de la LS des résultats d'un TRT, indiquant le type d'erreur : 1-erreur de mesure, 2-erreur d'évaluation de paramètre, 3-erreur de combinaison, 4-erreur du modèle.....93
Tableau 6.2	Valeurs de référence pour les erreurs des différentes variables et paramètres mesurés utilisés pour le calcul des erreurs combinées. ....98
Tableau 6.3	Paramètres du scénario de base utilisés pour l'analyse factorielle. ....100



## LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Applications des échangeurs de chaleur géothermiques en mode climatisation (à gauche) et en mode chauffage (à droite). Tiré de (Gehlin, 1998a).....	6
Figure 1.2	Les deux configurations de base pour un échangeur de chaleur géothermique : tube en U (à gauche) et coaxial (à droite). Tiré de (Gehlin, 1998a).....	7
Figure 1.3	Le profil de température dans le sol. Tiré de (Gehlin, 1998a).....	9
Figure 1.4	Résistance thermique du forage.....	10
Figure 1.5	Conductivité thermique des sous-sols et de la roche incluant différents degrés de saturation. ....	12
Figure 1.6	Diffusivité thermique des sous-sols et de la roche incluant différents degrés de saturation. ....	12
Figure 1.7	Essai de réponse thermique.....	14
Figure 2.1	Illustration de la cellule pour déterminer la conductivité thermique du sous-sol. Tiré de (AUSTIN III, 1998).....	17
Figure 2.2	Unité de test de réponse thermique.....	19
Figure 3.1	Dispositif expérimental.....	35
Figure 3.2	Câble chauffant à isolation minérale (MIC) .....	36
Figure 3.3	Unité de test de réponse thermique avec câble chauffant.....	37
Figure 3.4	Positionnement des thermocouples dans le puits.....	39
Figure 3.5	Carte d'acquisition 32 sorties NI- modèle SCXI-1100. ....	40
Figure 3.6	Positionnement des thermocouples pris en considération dans le puits.....	42
Figure 3.7	Évolution de la température du fluide a différentes profondeurs pour une injection de chaleur de 63 W/m durant 50 h.....	44
Figure 3.8	Évolution de la température du fluide a différentes profondeurs pour une injection de chaleur de 63 W/m durant 74 h.....	45

Figure 3.9	La température du fluide en fonction de $\ln(\text{temps})$ . Pour la période chauffage et de restitution thermique.....	46
Figure 3.10	Évolution de la température du fluide à différentes profondeurs pour une injection de chaleur de 63 W/m durant 100 h avec une interruption de 8 h.....	48
Figure 3.11	La température du fluide en fonction de $\ln(\text{temps corrigé})$ . Pour toutes les périodes d'un test avec interruption. ....	50
Figure 3.12	Organigramme de l'analyse analytique par la méthode de superposition des courbes. ....	52
Figure 4.1	Modèle 2D (vertical) de l'échangeur géothermique avec le système d'injection d'énergie.....	53
Figure 4.2	Modelé numérique 2D. ....	55
Figure 4.3	Modelé numérique 3D. ....	56
Figure 4.4	Maillage du modèle numérique 3D.....	57
Figure 4.5	Température moyenne du fluide : modèle numérique et données enregistrées au niveau du thermocouple T5_V2.....	59
Figure 4.6	Température moyenne du fluide du modèle numérique en fonction de $\ln(t/t_{th})$ .....	60
Figure 4.7	Distribution thermique de la température du puits après 50h d'injection de chaleur.....	61
Figure 5.1	Sensibilité de la conductivité thermique à des petites perturbations. Test 50h Section T5_V3. ....	64
Figure 5.2	Essai expérimental de sensibilité de la pente aux perturbations. Test 50h Section T5_L7.....	65
Figure 5.3	Essai expérimental de sensibilité de la pente aux perturbations. Test 74h Section T5_L7.....	66
Figure 5.4	Température du fluide pour une injection de chaleur de 50 h Section T5_V3. ....	69
Figure 5.5	Température du fluide pour une injection de chaleur de 74 h Section T5_V3. ....	69

Figure 5.6	SectionT5_V3 : Température du fluide mesurée et Températures calculées pour chaque méthode. Test 50h.....	70
Figure 5.7	SectionT5_V3 : Température du fluide mesurée et Températures calculées pour chaque méthode. Test 74h.....	71
Figure 5.8	Différence entre la température du fluide mesurée et la température calculée pour chaque méthode. Test 50h Section T5_V3.....	72
Figure 5.9	Différence entre la température du fluide mesurée et la température calculée pour chaque méthode. Test 74h Section T5_V3.....	72
Figure 5.10	La conductivité thermique estimée avec les différentes méthodes. Le dernier point est fixé, le premier point varie. Test 50H. ....	73
Figure 5.11	La conductivité thermique estimée avec les différentes méthodes. Le dernier point est fixé, le premier point varie. Test 74H. ....	74
Figure 5.12	Estimation de la conductivité thermique par le modèle LS1 Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 50H.....	75
Figure 5.13	Estimation de la conductivité thermique par le modèle LS2 Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 50H. ....	75
Figure 5.14	Estimation de la conductivité thermique par le modèle CS Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 50H.....	76
Figure 5.15	Estimation de la conductivité thermique par le modèle NUM Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 50H.....	76
Figure 5.16	Estimation de la conductivité thermique par le modèle LS1 Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 74H.....	77
Figure 5.17	Estimation de la conductivité thermique par le modèle LS2 Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 74H.....	77
Figure 5.18	Estimation de la conductivité thermique par le modèle CS Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 74H.....	78
Figure 5.19	Estimation de la conductivité thermique par le modèle NUM Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 74H.....	78
Figure 5.20	la conductivité thermique estimée avec les différentes méthodes. Le premier point est fixé, le dernier point varie avec les données enregistrées. Test 50h Section T5_V3. ....	79

## XVIII

Figure 5.21	la conductivité thermique estimée avec les différentes méthodes. Le premier point est fixé, le dernier point varie avec les données enregistrées. Test 74h Section T5_V3. ....	80
Figure 5.22	Température du fluide pour une injection de chaleur de 100h avec interruption. Section T5_V3. ....	81
Figure 5.23	SectionT5_V3 : Température du fluide mesurée et Températures calculées pour chaque méthode. Période de coupure.....	82
Figure 5.24	SectionT5_V3 : Température du fluide mesurée et Températures calculées pour chaque méthode. Période de restitution. ....	82
Figure 5.25	Différence entre la température du fluide mesurée et la température calculée pour chaque méthode. Test 100h Section T5_V3.....	83
Figure 5.26	La conductivité thermique estimée avec les différentes méthodes. Le dernier point est fixé, le premier point varie. ....	84
Figure 5.27	Estimation de la conductivité thermique par le modèle LS1 Le premier point est fixé aux heures précisées dans la légende, le dernier point varie. Test 100H.....	85
Figure 5.28	Estimation de la conductivité thermique par le modèle LS2 Le premier point est fixé aux heures précisées dans la légende, le dernier point varie. Test 100H.....	85
Figure 5.29	Estimation de la conductivité thermique par le modèle CS Le premier point est fixé aux heures précisées dans la légende, le dernier point varie. Test 100H.....	86
Figure 5.30	Estimation de la conductivité thermique par le modèle CS Le premier point est fixé aux heures précisées dans la légende, le dernier point varie. Test 100H.....	86
Figure 5.31	La conductivité thermique estimée avec les différentes méthodes. Le premier point est fixé, le dernier point varie avec les données enregistrées. ....	87
Figure 5.32	La distribution de la conductivité thermique dans chaque section du forage évaluée par (LS1, LS2, CS, NUM).....	88
Figure 6.1	Résultats de l'analyse factorielle pour déterminer la sensibilité des paramètres.....	102

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

BHE	Borehole Heat Exchanger
BTES	Borehole Thermal Energy Storage
CSA	Canadian Standards Association
CS	Valeurs issues de la résolution avec le modèle de la source cylindrique
CTT	Centre de Technologie Thermique
DX	Direct Expansion
GES	Gaz à Effet de Serre
GHE	Ground Heat Exchanger
GSHP	Ground Source Heat Pump
IGSHPA	International Ground Source Heat Pump Association
LS1	Valeurs issues en appliquant la méthode la pente sur la température mesurée
LS2	Valeurs issues de la résolution avec le modèle de la ligne source
MCS	Modèle de la Source Cylindrique
MES	Valeurs mesurées dans le puits
MIC	Mineral Insulated Cable
MLS	Modèle de la Ligne Source
MN	Modèle Numérique
NUM	Valeurs issues des simulations numériques avec COMSOL
PEHD	Polyéthylène Haute Densité
TAPEP	Two-Step Parameter Estimation Procedure
TRT	Thermal Response Test
UTES	Underground Thermal Energy Storage



## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

### SYMBOLES :

$C_p$	chaleur massique (J/kg·K)
$D$	diamètre (m)
$G$	la fonction de la source cylindrique
$h$	coefficient de convection thermique (W/m <sup>2</sup> ·K)
$H$	profondeur du puits (m)
$k$	conductivité thermique (W/m·K)
$L$	longueur du câble (m)
$m$	la pente (K)
$N$	nombre de points total
$Nu_D$	nombre de Nusselt
$n_h$	nombre de points au début de la période de restitution.
$\dot{Q}$	flux de chaleur (W/m)
$R$	résistance thermique (m·K/W)
$R_e$	resistance électrique (Ω)
$r$	rayon (m)
$T$	température (°C)
$t$	temps (h)
$U$	tension électrique (V)

### LETTRES GREQUES :

$\alpha$	diffusivité thermique (m <sup>2</sup> /s)
$\gamma$	constante d'Euler
$\rho$	masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )

### INDICES EXPOSANTS :

$o$	non perturbé
$b$	paroi du puits

<i>eq</i>	équivalent
<i>f</i>	fluide
<i>g</i>	coulis
<i>h</i>	chauffage
<i>i</i>	interne / a l'itération
<i>o</i>	externe
<i>p</i>	tuyau
<i>T</i>	totale
<i>s</i>	sous-sol

## INTRODUCTION

Les systèmes énergétiques utilisant des sources renouvelables d'énergie jouent un rôle important pour atteindre un avenir durable puisque le secteur de l'énergie est l'une des sources d'émission de gaz à effet de serre (GES) les plus importantes (Hedenus, Azar et Lindgren, 2005). Les technologies apportant un rendement élevé combiné avec un impact environnemental réduit sont fortement souhaitables.

Les systèmes de puits géothermiques pour le stockage de l'énergie thermique (Borehole Thermal Energy Storage) (BTES) et/ou pour l'extraction de la chaleur ou le froid avec un système de pompe à chaleur (Ground Source Heat Pump) (GSHP) sont maintenant bien établis. Leur utilisation pourrait réduire sensiblement la consommation des combustibles fossiles ainsi que l'émission de gaz à effet de serre (IEA, 2012).

C'est pour cela que ces systèmes sont une alternative intéressante dans le secteur de l'énergie comparés à d'autres systèmes de chauffage et de climatisation conventionnels.

La connaissance de la géologie locale est essentielle pour un bon dimensionnement des systèmes (BTES). Plus la puissance du système est importante, plus on a à gagner sur une évaluation appropriée de la conductivité ainsi que de la résistance thermique du sous-sol, une mauvaise évaluation (sous-évaluation) entraînera l'incapacité du système à répondre à la demande énergétique totale du bâtiment, alors qu'une (surévaluation) entraînera des coûts supplémentaires de forage et d'installation à cause du surdimensionnement du système. Plusieurs études ont donné des valeurs plus élevées de conductivité thermique après des mesures sur le terrain par des tests de réponse thermiques (Thermal Response Test) (TRT), que des évaluations de laboratoire sur les échantillons de sol (Carlsson, 1978; Ericsson, 1985; Gehlin, 1998a).

Une des possibilités d'optimisation du dimensionnement et de la conception d'un système (BTES) se situe en améliorant l'estimation des propriétés thermiques du sous-sol.

## **Problématique**

La conception d'un système géothermique dépend des propriétés thermiques du sous-sol. Ces propriétés sont la conductivité thermique, la température non perturbée, la diffusivité thermique, la capacité thermique. Ces propriétés peuvent varier pour différentes localisations géographiques et sont par conséquent calculées à partir d'un essai de réponse thermique (Javed, 2010).

En estimant ces propriétés, les limitations du transfert de chaleur au sol sont déterminées et sont employées pour déterminer la quantité de forages requis pour une certaine demande énergétique du bâtiment. Ces systèmes sont souvent surdimensionnés, donc plus de puits sont forés que nécessaire. Eklöf et Gehlin (1996) ont montré qu'une bonne évaluation des propriétés thermiques du sous-sol est importante pour l'efficacité thermique de ce type de systèmes et de ses performances économiques. De nombreuses méthodes ont été développées pour évaluer les données expérimentales obtenues lors d'un essai de réponse thermique (Nakos, 2011).

La méthode de test conventionnelle est cependant très chère parce qu'elle exige la mobilisation d'un équipement lourd. La manipulation de l'équipement sur le terrain est également laborieuse. Des réservoirs d'eau et de la tuyauterie doivent être manipulés avec soin pour éviter des fuites. La tuyauterie devrait être bien isolée pour réduire au minimum le transfert de chaleur avec l'environnement extérieur.

## **Objectif de l'étude**

L'objectif général de cette étude est de développer une méthode d'expérimentation alternative qui est plus facile à exécuter, pour conduire les tests de réponse thermique. La méthode est basée sur le travail de (Pehme, Greenhouse et Parker, 2007a; 2007b), qui ont mesuré les propriétés thermiques du sous-sol en utilisant des câbles chauffants insérés dans les forages remplis d'eau. Cette méthode a été adaptée pour les échangeurs de chaleur géothermiques (Borehole Heat Exchanger) (BHE) par (Raymond et al., 2010).

Cette étude fait partie d'un projet de recherche visant à utiliser cette nouvelle méthode pour déterminer la conductivité thermique du sous-sol pour les systèmes (BTES), plus particulièrement pour les échangeurs de chaleur des systèmes à expansion directe (Direct Expansion) (DX), afin d'améliorer et optimiser ces systèmes. Le but était de développer des mesures et une méthode d'évaluation, et amener cette connaissance, de sorte que la méthode si possible devienne une routine dans la conception de plus grands systèmes de stockage de l'énergie thermique (BTES). Pour atteindre cet objectif, le projet comporte un volet expérimental et un volet d'analyse analytique et une modélisation numérique.

### **Organisation du mémoire**

Ce mémoire est divisé en 6 chapitres. Le Chapitre 1 présente des généralités sur les composantes des échangeurs géothermiques et une compréhension des paramètres nécessaires à l'étude. Le Chapitre 2 porte sur la revue de littérature en détaillant les méthodes de test de réponse thermique et présente les modèles analytiques et numériques utilisés pour l'analyse des résultats obtenue durant l'expérience. Le chapitre 3 traite de la description et du fonctionnement du dispositif expérimental alors que le chapitre 4 traitera du développement du modèle expérimental par simulation numérique à l'aide de l'outil COMSOL multiphysics®. Dans le chapitre 5 sont présentés les résultats expérimentaux et un comparatif entre les différents modèles analytiques et numériques utilisés. Finalement, le Chapitre 6 détaille l'analyse d'erreur et l'étude de sensibilité des paramètres.



## **CHAPITRE 1**

### **GÉNÉRALITÉS**

#### **1.1 Systèmes de pompes à chaleur géothermique**

Les systèmes de pompes à chaleur géothermiques sont maintenant bien établis pour fournir le chauffage ou la climatisation dans les bâtiments commerciaux et résidentiels. Ces systèmes sont l'application géothermique la plus répandue avec environ 3 millions d'installations au début de 2010 selon l'agence internationale de l'énergie.

Un système (GSHP) comprend une unité conventionnelle de pompe à chaleur et un groupe d'échangeurs de chaleur sous forme de puits forés dans le sol (BHE), qui sont reliés à la pompe comme le montre la Figure 1.1. Les améliorations des (GSHP) sont actuellement concentrées sur l'optimisation du système et la réduction des coûts d'installations.

La longueur des puits géothermiques (Ground Heat Exchanger) (GHE) est cruciale pour une conception optimale et un coût bas. D'ailleurs, pour la conception de plus grands systèmes de (BHE) il est nécessaire de déterminer certains paramètres tels que l'efficacité du transfert de chaleur, la capacité du forage, la taille et la configuration aussi bien que les propriétés du coulis. Ainsi, la conductivité thermique du sous-sol et la résistance thermique du puits exigent d'être déterminées pour la conception du (BHE).

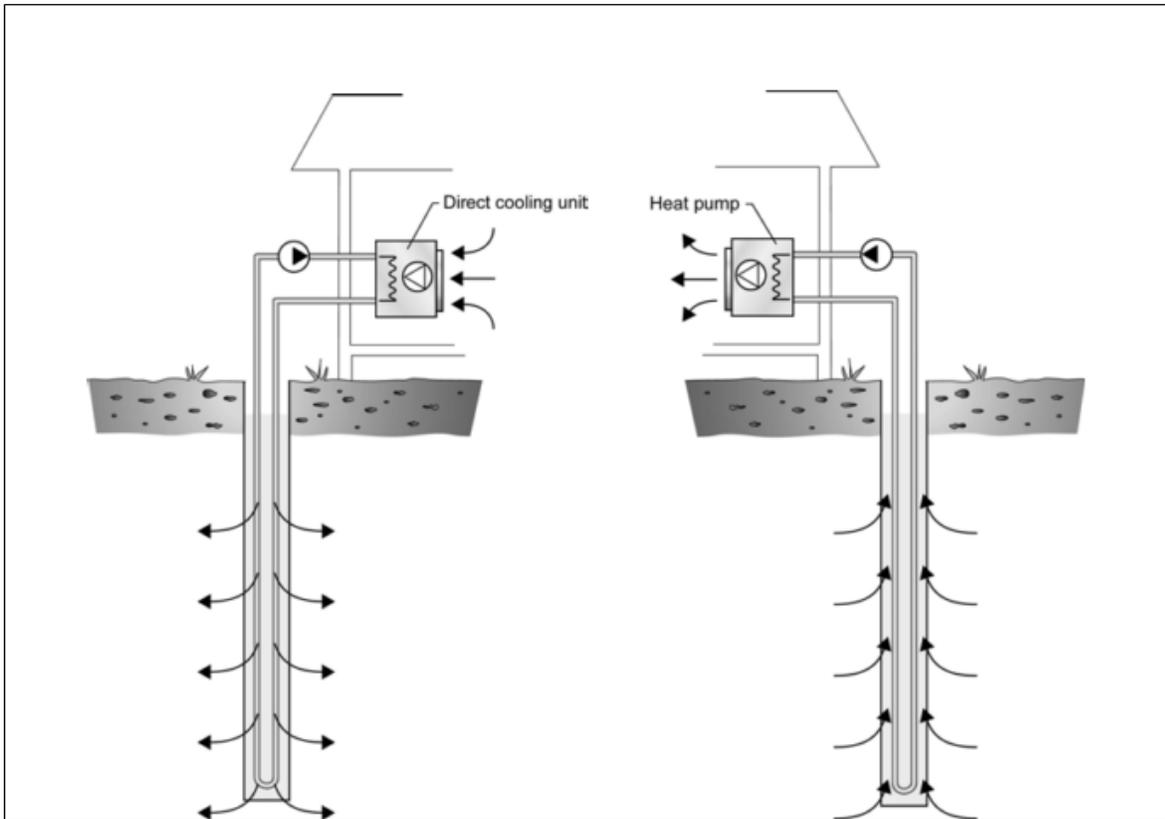


Figure 1.1 Applications des échangeurs de chaleur géothermiques en mode climatisation (à gauche) et en mode chauffage (à droite). Tiré de (Gehlin, 1998a)

## 1.2 Échangeur géothermique vertical en boucle fermée

Un échangeur géothermique avec des puits verticaux en boucle fermée se compose d'un ou plusieurs puits forés dans le sol dans lesquels sont introduits des collecteurs sous différentes configurations (Figure 1.2), un tube dans un autre pour le type coaxial, ou un ou plusieurs tubes en U reliés en série ou en parallèle au niveau des têtes de puits.

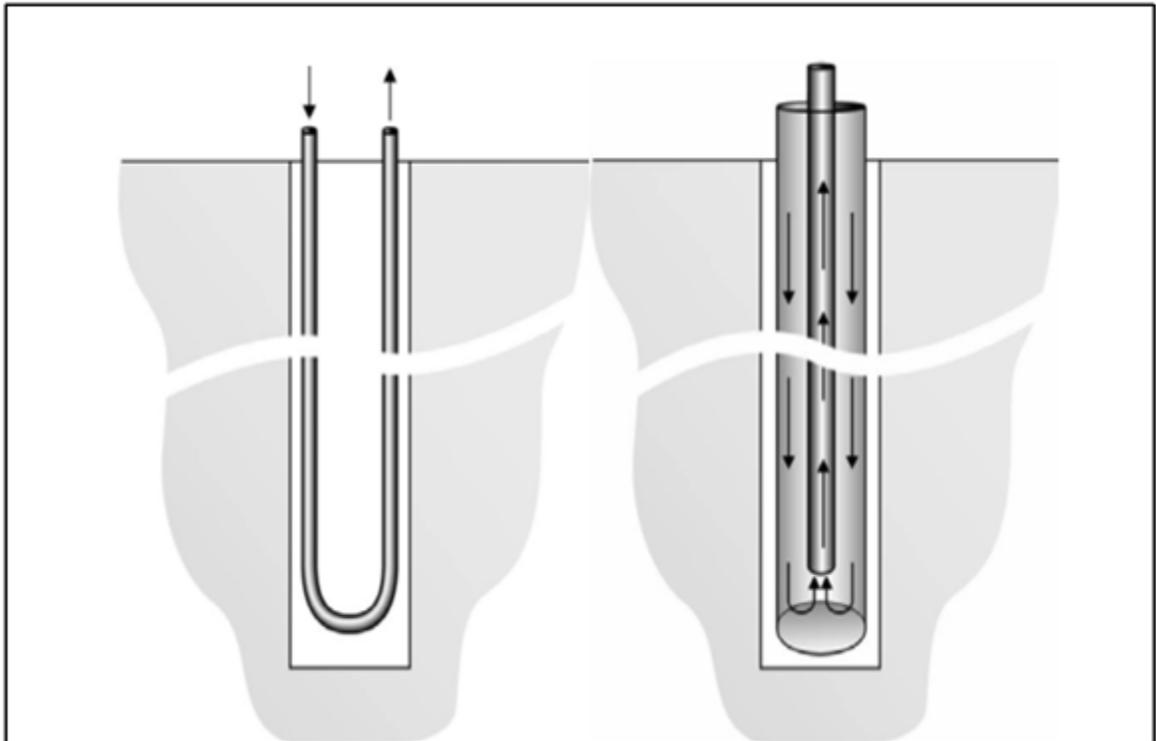


Figure 1.2 Les deux configurations de base pour un échangeur de chaleur géothermique : tube en U (à gauche) et coaxial (à droite). Tiré de (Gehlin, 1998a)

Pour des systèmes conventionnels les tubes en U sont faits à partir d'un plastique polyéthylène haute densité (PEHD) à usage géothermique et conforme à la norme CSA B137.1 au Canada, tandis que pour les systèmes à expansion directe, les tubes en U sont constitués d'un tube en cuivre mou (*appelé la ligne de vapeur*) et d'un autre tube en cuivre mou (*appelé la ligne de liquide*). Les deux tubes sont soudés ensemble à l'une de leurs extrémités pour former ainsi un tube en U. C'est de ce type d'échangeur géothermique dont il est question dans ce mémoire.

Les puits sont forés selon un diamètre et une profondeur typiques variant respectivement entre 0,09 et 0,15 m et entre 30 et 200 m (Gehlin, 2002). À l'intérieur des tubes en U circule un fluide caloporteur pour assurer le transport d'énergie thermique. Le fluide caloporteur pour les systèmes conventionnels est généralement une solution antigel avec certains pourcentages, assurant un état liquide à des températures d'opération du système sous 0 °C,

alors que pour les systèmes à expansion directe ou à boucle secondaire le fluide caloporteur est un réfrigérant.

Lors de l'introduction du tube en U dans le puits, il est conseillé d'utiliser des entretoises à différents intervalles tout au long des tubes dans le but de s'assurer une même distance de séparation et pour que les tubes en U soient le plus près possible du sol. Ceci permet également de réduire l'effet de court-circuit thermique entre les tuyaux dans un puits.

L'espace entre les tuyaux et la paroi d'un puits est comblé par un matériau de remblayage. Des coulis faits de bentonite sont utilisés afin de réduire l'écoulement d'eau à travers le forage puisque la bentonite est une argile dont la perméabilité est faible. L'Association canadienne de normalisation (Canadian Standards Association) (CSA) exige que l'écoulement d'eau à travers le forage soit réduit pour empêcher l'infiltration d'eau de surface contaminée et assurer qu'il n'y a pas de mélange d'eau souterraine entre différents aquifères traversés par le forage. Les mélanges doivent être réalisables et injectés à l'aide d'une trémie à partir de la base du puits pendant l'installation avec peu de rétrécissement pendant l'arrangement.

Du sable est mélangé à la bentonite et l'eau pour augmenter la conductivité thermique du coulis. Cette dernière varie en fonction de la proportion de sable utilisée suivant une plage de 0,7 à environ 2,0 W/m·K.

Il est commun de laisser le puits non remblayé lorsque le niveau de la nappe phréatique est suffisamment près de la surface du sol particulièrement en suède, mais pas en Amérique du Nord (Gehlin, 2002).

### 1.3 La résistance et la conductivité thermique du sol

Un échangeur géothermique bénéficie de l'inertie thermique du sous-sol pour le chauffage et la climatisation des bâtiments. Une évaluation de la température du sous-sol est nécessaire pour le dimensionnement de l'échangeur. La température du sous-sol non perturbée augmente avec la profondeur due au gradient géothermique et n'est pas influencée par la température de l'air à la surface Figure 1.3.

Le gradient géothermique varie à la surface de la terre, et est en moyenne de 0,5 à 3,0 °C par 100 mètres. La variation saisonnière de la température du sol due au changement saisonnier atteint seulement une profondeur de 15 m (Ericsson, 1985; Mogensen, 1983).

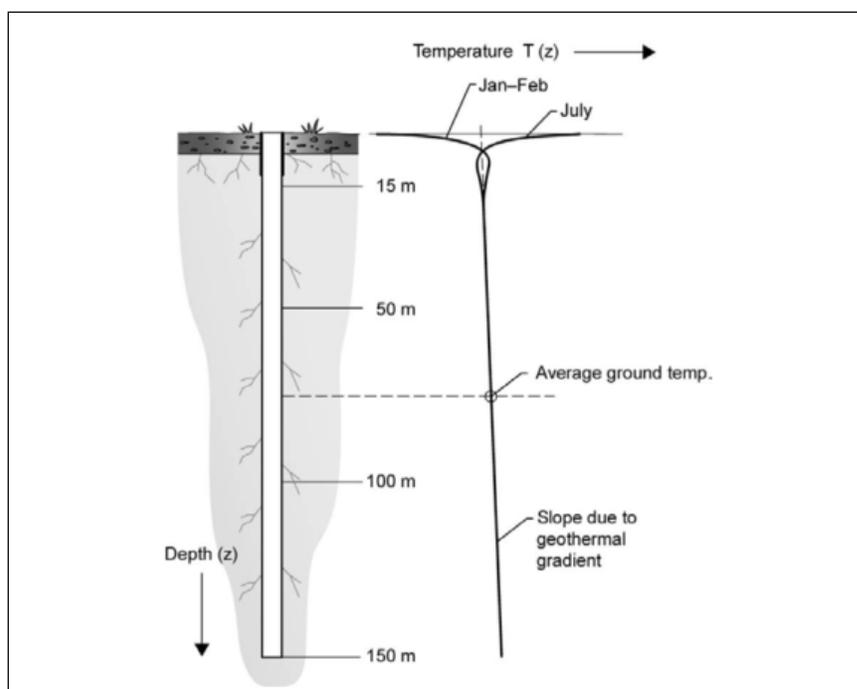


Figure 1.3 Le profil de température dans le sol.  
Tiré de (Gehlin, 1998a)

La résistance thermique unitaire totale du sous-sol ( $R_T$ ) contient la résistance thermique du sous-sol et la résistance thermique du puits, de sorte qu'elle puisse être définie comme une somme de deux résistances.

$$R_T = R_s + R_b \quad (1-1)$$

La résistance thermique du puits comprend la résistance thermique de convection dans le fluide circulant à l'intérieur du tube en U ( $R_f$ ), la résistance thermique de conduction des tuyaux ( $R_p$ ) aussi bien que la résistance thermique du coulis ( $R_g$ ). La résistance thermique du puits peut être définie comme l'addition de ces trois composants.

$$R_b = R_f + R_p + R_g \quad (1-2)$$

La base de la résistance thermique est spécifiée sur la Figure 1.4.

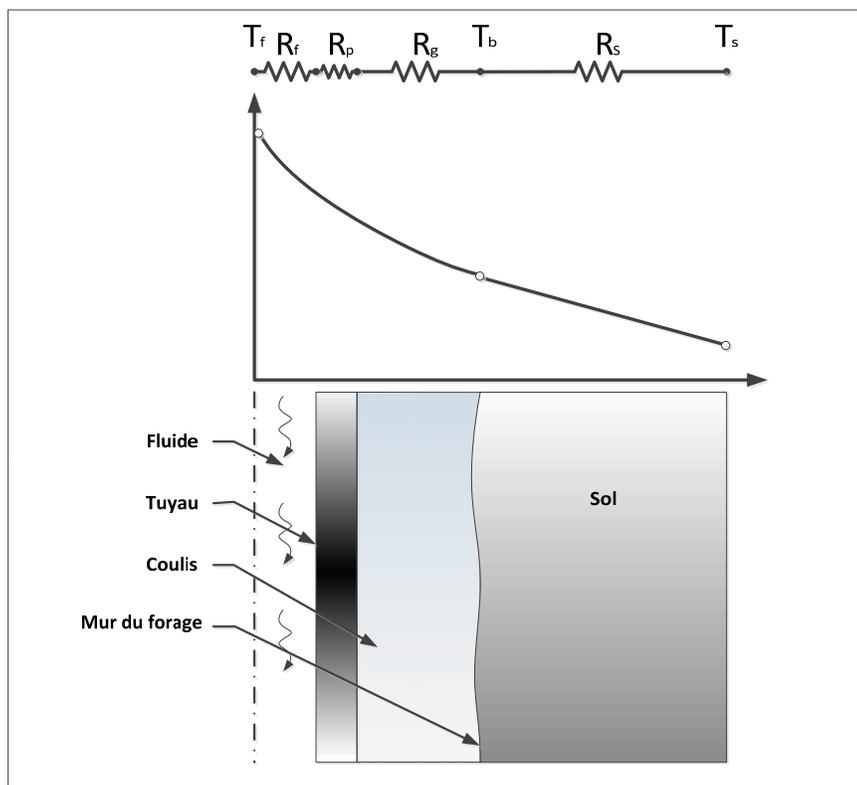


Figure 1.4 Résistance thermique du forage.

La différence de température entre le fluide dans le tuyau  $T_f$  et la paroi du forage  $T_b$  est reliée à la résistance thermique du forage  $R_b$  ainsi qu'au taux de transfert de chaleur par unité de longueur du puits  $\dot{Q}$  (W/m) :

$$T_f - T_b = R_b \dot{Q} \quad (1-3)$$

Le taux de transfert de chaleur est proportionnel à la différence de température entre le fluide caloporteur et la paroi du puits. Ainsi, la résistance thermique du puits dépend de la disposition des tuyaux et des propriétés thermiques des matériaux impliqués. Une faible résistance thermique du puits est souhaitable pour le design.

La conductivité thermique du sol est la capacité de la roche à transférer la chaleur sous l'influence d'un gradient de température. Dans le cas d'un système géothermique, ce gradient de température provient de la paroi du forage.

La chaleur spécifique volumétrique du sol  $C_{p_s}$  est la capacité du sol à emmagasiner de l'énergie thermique. La diffusivité thermique du sous-sol  $\alpha_s$  est un paramètre combiné défini comme le rapport entre la capacité du sol à conduire la chaleur et à l'emmagasiner.

Une chaleur spécifique du sol élevée permet de conserver l'énergie dans le sol à proximité de l'échangeur géothermique, tandis qu'une conductivité thermique élevée permet une réponse rapide du transfert de chaleur entre les puits et le sol. Une diffusivité thermique élevée engendre un plus grand rayon d'influence thermique dans le sol entourant un échangeur géothermique. Les Figures 1.5 et 1.6 présentent des valeurs de la conductivité et de la diffusivité thermique de quelques types de sol.

$$k_s = \rho_s C_{p_s} \alpha_s \quad (1-4)$$

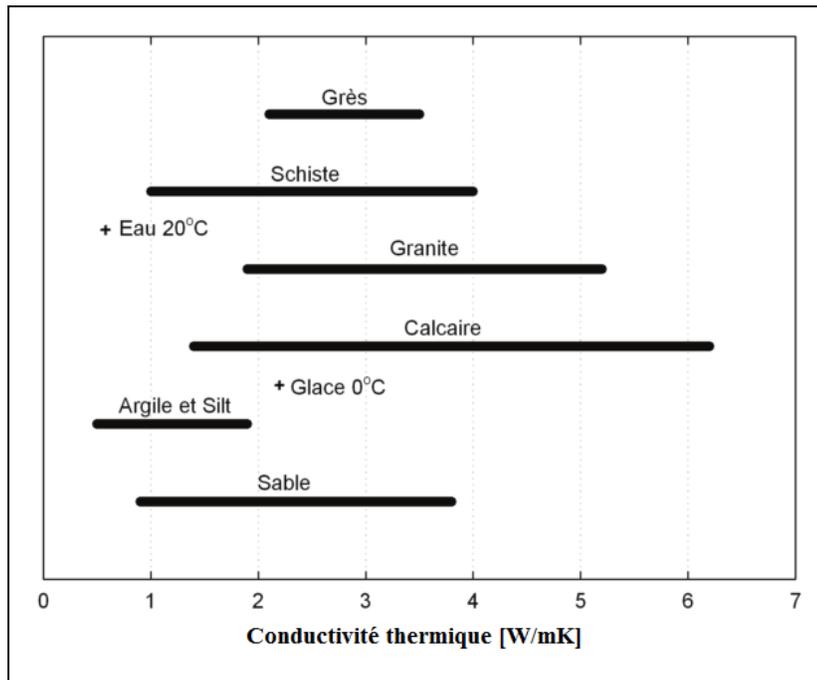


Figure 1.5 Conductivité thermique des sous-sols et de la roche incluant différents degrés de saturation.

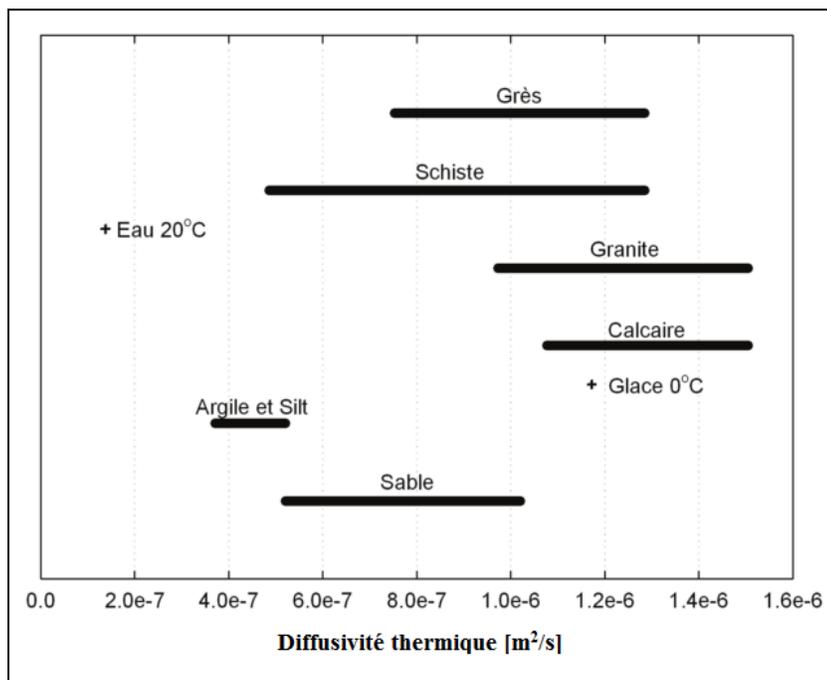


Figure 1.6 Diffusivité thermique des sous-sols et de la roche incluant différents degrés de saturation.

Selon le forage, il y a différents matériaux utilisés pour remplir l'espace entre les tubes et la paroi du forage, tel que la bentonite. Ces matériaux ont habituellement une bonne conductivité thermique. Cependant, les eaux souterraines, qui ont une basse conductivité thermique, sont habituellement employées comme matériel mélangé au ciment.

Malgré sa basse conductivité thermique, le transfert de chaleur entre l'échangeur de chaleur et le sol environnant est augmenté par une convection naturelle. Selon les matériaux géologiques (sable, gravier) ou des ruptures dans les roches, l'écoulement d'eaux souterraines peut être approprié dans la conception du forage.

#### **1.4 Essai de réponse thermique**

L'essai de réponse thermique ou habituellement appelé test de réponse thermique (TRT) est largement utilisé pour déterminer les propriétés thermiques du sous-sol aussi bien que les performances du transfert de chaleur entre le sous-sol et le forage. La Figure 1.7 montre le principe de l'essai de réponse thermique. Mogensen (1983) fut le premier qui a appliqué cette méthode pour déterminer la conductivité thermique du sous-sol et la résistance thermique du forage in situ.

Le principe est basé sur l'extraction ou l'injection constante d'un flux de chaleur au moyen d'un fluide caloporteur qui circule dans le circuit de puits géothermiques. Les données de la température du fluide à l'entrée et à la sortie du circuit sont mesurées et enregistrées.

Le procédé de transfert de chaleur est décrit par un modèle mathématique et ceci est comparé aux données expérimentales de la température en fonction du temps. Dans le modèle mathématique, les valeurs de la conductivité thermique du sous-sol et de la résistance thermique de puits doivent être initialement assumées. Bien que le (TRT) conventionnel ne soit pas un système précis, il a été largement appliqué pour la conception optimale des échangeurs de chaleurs géothermiques.

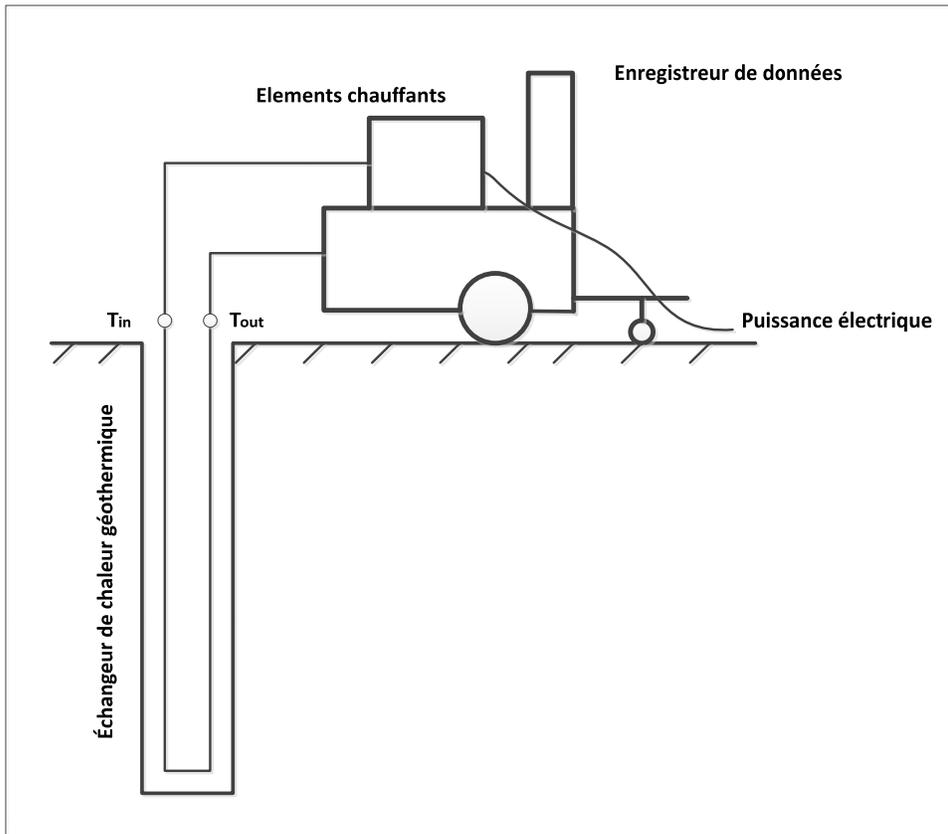


Figure 1.7 Essai de réponse thermique.

## **CHAPITRE 2**

### **REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

#### **2.1 Introduction**

La revue de la littérature exposée dans ce chapitre présente quelques-uns des travaux marquants sur les tests de réponse thermique pour les puits géothermiques. Dans un premier temps seront présentées les différentes méthodes utilisées pour déterminer les propriétés du sous-sol. Ensuite les modèles analytiques et numériques utilisés pour estimer ces propriétés thermiques en utilisant les résultats des tests de réponse thermique.

#### **2.2 Les méthodes de TRT**

Il existe plusieurs méthodes pour estimer la conductivité thermique du sous-sol qui pourraient être appliquées aux puits géothermiques. Cela inclut l'identification du sol et de la roche, l'essai expérimental des déblais de forage, les tests avec des sondes, les essais sur le terrain.

##### **2.2.1 La méthode avec des sondes**

L'idée d'employer les sondes de mesure est présente depuis quelque temps, selon Choudhary (1976), l'échantillonnage sur le terrain et l'utilisation d'une sonde pourrait réduire l'erreur de mesure de la conductivité thermique du sous-sol. Ce concept a été proposé en 1833 pour la première fois par un physicien allemand appelé Schleiremachen. Et ce n'est qu'aux environs de 1950 que les sondes ont été développées au point d'être utilisables pour tester les puits forés.

La construction générale d'une sonde se compose d'un réchauffeur interne et au moins d'une sonde de température incorporée, le tout réglé dans un isolant en céramique. Tous ces composants sont alors emballés par une gaine en métal d'acier inoxydable.

La plupart des sondes utilisées pour ce type d'application sont d'environ 6 à 12 pouces de long. Ces types de sondes sont habituellement placés dans un échantillon de petite taille dans un seau plein de sol foré. La sonde au milieu du seau chauffe le sol. La sonde mesure alors la réponse de la température de l'injection de chaleur. Quelques nouveaux modèles de sonde incorporent le réchauffeur et la sonde de température dans la même sonde. Basés sur la mesure de la température au milieu de la sonde et de l'injection de chaleur mesurée, les résultats sont employés dans les modèles tels que la ligne source pour déterminer la conductivité thermique du sol.

### **2.2.2 La méthode expérimentale des déblais de forage**

Une méthode employée pour déterminer la conductivité thermique de la roche a été approchée du point de vue que la conductivité peut être déterminée à partir des déblais de forage. Sass, Lachenbruch et Munroe (1971) ont énoncé à ce moment-là qu'il est difficile de déterminer la conductivité thermique par des méthodes standards en raison de l'absence des noyaux ou des échantillons émergents du forage. Les seuls échantillons disponibles étaient les déblais de forage. Sass a commencé son procédé en rassemblant les déblais dans une cellule en plastique avec une spatule pour emballer les particules à l'intérieur de la cellule. La cellule en plastique est alors pesée (sec). L'eau est ajoutée dans la cellule en plastique qui est alors encore pesée (humide). La différence dans le poids peut être employée pour trouver la fraction du volume d'eau. Après, la cellule est placée dans un appareillage pour déterminer la conductivité thermique efficace Figure 2.1.

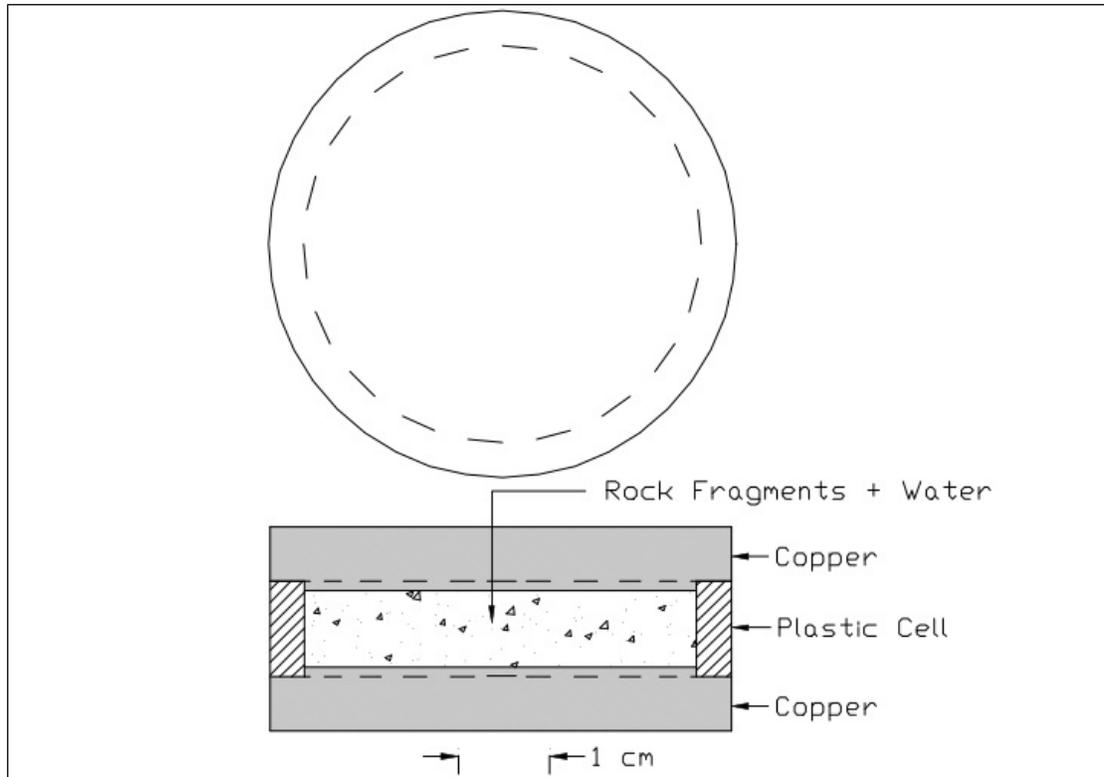


Figure 2.1 Illustration de la cellule pour déterminer la conductivité thermique du sous-sol. Tiré de (AUSTIN III, 1998)

### 2.2.3 La méthode d'identification du sol et de la roche

Une technique pour déterminer les propriétés thermiques de sous-sol est décrite par le manuel d'analyse de sol et de roche de l'IGSHPA (International Ground Source Heat Pump Association). Le manuel contient des procédures pour déterminer le type de sol et le type de roche présents à un endroit du projet. Le procédé commence en classifiant le sol par inspection visuelle. Les étapes à venir peuvent être suivies à partir de l'organigramme représenté dans le manuel de campagne d'analyse de sol et de roche (EPRI 1989). Une fois que le type de sol a été déterminé, le manuel de référence offre les valeurs montrées dans le Tableau 2.1 pour les différents types de sol.

Tableau 2.1 Les propriétés thermiques du sol

Classe de texture thermique	Conductivité thermique		Diffusivité thermique	
	$W/m \cdot K$	$Btu/hr \cdot ft \cdot ^\circ F$	$cm^2/sec$	$ft^2/day$
Sable (ou gravier)	0.77	0.44	0.0045	0.42
Vase	1.67	0.96	-	-
Argile	1.11	0.64	0.0054	0.50
Terre grasse	0.91	0.52	0.0049	0.46
Sable saturé	2.5	1.44	0.0093	0.86
Vase ou Argile saturés	1.67	0.96	0.0066	0.61

Alternativement, si la terre fondamentale à l'emplacement contient également diverses formations de roche, il est alors nécessaire de classifier les types de roche dans huit catégories différentes basées sur plusieurs différents éléments. Les huit catégories se nomment les groupes pétrologiques. La Figure 1.5 vue dans le chapitre précédent montre les valeurs de conductivité thermique pour chaque type de roche. Quoique l'hétérogénéité et les propriétés des matériaux rendent difficile l'estimation à partir d'une identification pétrographique, et comme ça reste une méthode utilisée pour inférer, le concepteur est encore laissé avec un large éventail de conductivités thermiques et pour être prudent, la nécessité choisit une valeur basse.

#### 2.2.4 La méthode des essais sur le terrain

Une unité de TRT typique se compose d'une pompe, des valves de purge, d'un élément de chauffage électrique, des sondes de température, d'un débitmètre, et d'un enregistreur de données (Figure 2.2). Quelques unités contiennent également une pompe à chaleur pour effectuer l'essai dans un mode de refroidissement, mais elles ne sont pas employées couramment.

Les unités d'essai viennent dans diverses tailles, s'étendant de celle d'une valise à une remorque. Des descriptions plus détaillées des unités de TRT peuvent être trouvées dans l'étude par AUSTIN III (1998) et Gehlin (2002) et plusieurs exemples récents des expériences de TRT et leurs analyses ont été rapportées (Katzenbach et al., 2008; Lim, Lee et Lee, 2007; Roth et al., 2004; Sanner et al., 2005; Sanner et al., 2007; Sharqawy et al., 2009). Des études additionnelles ont indiqué des méthodes alternatives pour la mesure sur le terrain de la conductivité thermique du sous-sol, tel que l'évaluation des propriétés avec le profil de température (Rohner, Rybach et Schärli, 2005), (Raymond et al., 2010) ont réalisé des essais avec des câbles chauffants.

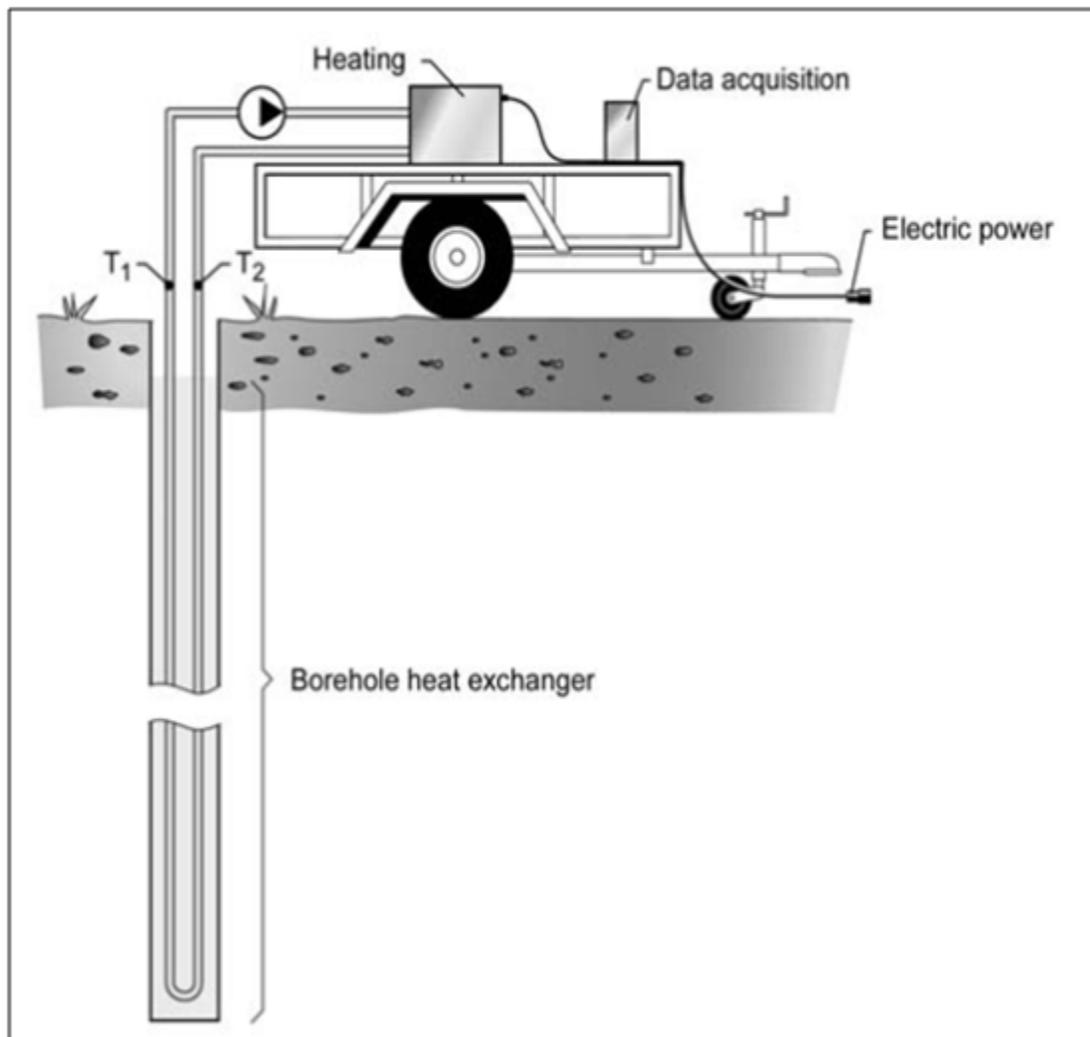


Figure 2.2 Unité de test de réponse thermique.

Des directives récentes pour la procédure de test, trouvées dans les travaux fait par Sanner et al. (2005), sont brièvement récapitulées. Avant de commencer l'essai, la température non perturbée du sol est mesurée suivant deux méthodes. La première méthode consiste à enregistrer le profil de température vertical dans le puits. Pour la deuxième méthode, l'eau est injectée dans l'échangeur de chaleur durant 10 à 20 min sans injection de la chaleur et la température de l'eau est mesurée avec l'unité de TRT, pour permettre à la température mesurée d'atteindre une valeur constante assumée comme température moyenne du sol. La première méthode semble plus fiable que la deuxième parce que, pour ce dernier, la chaleur produite par le travail mécanique de la pompe peut être transférée à l'eau dans les tuyaux et présenter ainsi un biais dans la température mesurée (Gehlin et Nordell, 2003).

Les bulles d'air dans l'échangeur de chaleur doivent être purgées avant de commencer l'essai, afin de réduire le transfert de chaleur. Le débit volumétrique de l'eau circulant dans les tuyaux doit être assez grand pour que l'écoulement demeure turbulent pour réduire au minimum la résistance thermique due à l'advection du liquide et pour être représentatif des états d'écoulement régnant dans la pompe à chaleur quand le système est en fonction.

Une fois que la température du sol a été mesurée et que l'air emprisonné dans les tuyaux purgés, l'essai commence par l'injection de la chaleur dans l'échangeur de chaleur pour perturber la température du sol. Une pratique commune est d'isoler n'importe quel tuyau se trouvant sur la surface au sol pour empêcher le transfert de chaleur externe entre l'échangeur de chaleur et le moteur de la pompe ou l'air. Même avec l'isolation, on ne peut pas éliminer le transfert de chaleur externe et il est donc préférable de mesurer la température de l'air à l'intérieur et en dehors de l'unité pour quantifier le changement de la température de l'air. Pendant l'essai, un approvisionnement régulier de puissance peut aider à réduire au minimum des fluctuations dans l'injection de la chaleur, bien qu'on élimine rarement ces fluctuations.

Le taux constant recommandé pour un essai d'injection de chaleur est dans la gamme de 30 à 80 W par mètre, et le taux d'injection de chaleur peut être ramené à une moyenne au cours de la période entière d'essai ou pendant des intervalles de temps choisis si des taux variables

d'injection de la chaleur sont employés. L'intervalle d'enregistrement recommandé pendant l'essai entier de la température et du débit est de 10 minutes tout au plus.

La durée typique d'un essai constant d'injection de la chaleur est entre 30 et 60 h, mais il n'y a aucune directive prescrite pour la durée d'essai. On propose ici que la durée des TRT doit être suffisamment longue pour permettre à la perturbation de la température d'atteindre un rayon spécifique d'influence. La durée d'essai peut être augmentée pour mesurer le rétablissement de la température du fluide après que l'injection de chaleur soit arrêtée. Dans ce cas, la circulation du fluide est maintenue dans l'échangeur une fois que l'injection de la chaleur s'arrête, et la température est mesurée jusqu'à ce qu'elle approche la température initiale du sol. Le débit est contrôlé pendant le rétablissement pour calculer les taux d'injection de chaleur et pour vérifier si le transfert de chaleur externe affecte la température, comme pendant un essai de circulation employé pour mesurer la température du sol non perturbée.

### **2.3 Les modèles analytiques appliqués aux TRT**

Plusieurs différents modèles ont été utilisés pour estimer la performance des échangeurs de chaleur géothermiques. Spécifiquement, nous sommes intéressés d'imposer une injection de chaleur d'une courte durée et de déterminer les propriétés thermiques du sous-sol.

Les modèles analytiques tels que la ligne source et la source de cylindre adoptent la solution analytique du problème de transfert de chaleur entre le forage et la région infinie voisine. Ils exigent plusieurs hypothèses de simplification concernant la géométrie du forage et des tuyaux de l'échangeur de chaleur. Pour l'évaluation des essais de réponse thermique, le flux de chaleur injecté ou extrait du forage peut être représenté comme une source de chaleur infiniment longue avec une influence négligeable sur la direction axiale du forage. Dans le sol en dehors du forage il est commun de supposer que le processus thermique dépend seulement de la distance radiale à partir de l'axe de forage.

### 2.3.1 Le modèle de la ligne source

Ce modèle est basé sur l'approximation du forage comme ligne source, en assumant les effets de fin négligeables. Le sol agit en tant que milieu qui rejette la chaleur et qui a une température initiale assumée uniforme et constante  $T_0$ .

Le modèle original a été développé la première fois par Kelvin et s'appelle parfois la ligne source théorique de Kelvin. Ingersoll, Zobel et Ingersoll (1948) ont appliqué le modèle aux échangeurs de chaleur géothermiques. Mogensen (1983) va plus loin avec leurs résultats en appliquant le modèle pour estimer la conductivité thermique du sous-sol.

L'équation de la température du sol en fonction du temps ( $t$ ) et le rayon ( $r$ ) autour d'une ligne source avec une injection constante de chaleur  $\dot{Q}$  (Carslaw et Jaeger, 1959b)

$$T(r, t) - T_0 = \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2-1)$$

$$\int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = E_1 \left( r^2 / 4\alpha t \right) \quad (2-2)$$

Où  $E_1$  est l'exponentielle intégrale. Pour de grandes valeurs du paramètre  $\alpha t / r^2$ , elle peut être approximée avec la relation simple suivante :

$$E_1 \left( \frac{r^2}{4\alpha t} \right) = \ln \left( \frac{4\alpha t}{r^2} \right) - \gamma \quad (2-3)$$

Où  $\gamma = 0.5772 \dots$  est le nombre d'Euler.

La température moyenne du fluide est évaluée en prenant la température de la ligne source au rayon du forage ( $r = r_b$ ) et en ajoutant l'effet de la résistance thermique de forage ( $R_b$ ) entre le fluide et le mur de forage. Ainsi, la température du fluide en fonction du temps peut être écrite :

$$T_f(t) = \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \left( \ln \left( \frac{4\alpha t}{r^2} \right) - \gamma \right) + \dot{Q}R_b + T_0 \quad (2-4)$$

Après le rassemblement des termes et le réarrangement de l'équation en une forme utilisable, il devient facile d'évaluer la conductivité thermique du sous-sol pour un temps donné, avec un taux constant d'injection de chaleur, et une différence de température. L'équation résultant de cette évaluation.

$$\Delta T(t) = T_f(t) - T_0 = \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \left( \ln \left( \frac{4\alpha}{r^2} \right) - \gamma \right) + \dot{Q}R_b + \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \ln t \quad (2-5)$$

On note que les deux premiers termes de l'équation ( $\frac{\dot{Q}}{4\pi k} \left( \ln \left( \frac{4\alpha}{r^2} \right) - \gamma \right)$  et  $\dot{Q}R_b$ ) sont constantes tant que le taux d'injection de la chaleur est constant. La seule variable dans l'équation est le  $\ln t$ . L'équation est alors réduite à la forme la plus simple en prenant les constantes et le  $\ln t$  dans une forme linéaire générale.

$$y = ax + b \quad (2-6)$$

Ou,

$y = \Delta T$	La différence de température;
$b$	La somme des deux constantes de l'équation;
$a = \frac{\dot{Q}}{4\pi k}$	La pente;
$x = \ln t$	Le logarithme naturel du temps.

Après obtention des données expérimentales du  $\Delta T$ , du temps, et du taux d'injection de chaleur, un tracé simple de la température en fonction du logarithme naturel du temps rapportera la pente. Cette pente est égale à  $a$  et la conductivité thermique peut alors être déterminée.

### 2.3.2 Le modèle de la source cylindrique

Le modèle a été pour la première fois mis en application par (Carslaw et Jaeger, 1959b) et présenté par (Ingersoll, 1954; Ingersoll, Zobel et Ingersoll, 1948). La description ici se fonde principalement sur le travail de (Deerman, 1990; Kavanaugh, 1985). Le modèle a été développé en utilisant un cylindre fini dans un milieu infini qui a des propriétés constantes. Le modèle de source cylindrique commence par la solution analytique bidimensionnelle de l'équation de conduction de chaleur :

$$\Delta T(r, t) = T(r, t) - T_0 = \frac{\dot{Q}}{k} G(r^*, t^*) \quad (2-7)$$

Où  $G(r^*, t^*)$  est la fonction de la source cylindrique comme décrite par (Ingersoll, 1954)

$$G(r^*, t^*) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} f(\beta) d\beta \quad (2-8)$$

$$f(\beta) = (e^{-\beta^2 t^*} - 1) \frac{[J_0(r^* \beta) Y_1(\beta) - Y_0(r^* \beta) J_1(\beta)]}{\beta^2 [J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)]} \quad (2-9)$$

Où  $J_0, J_1, Y_0, Y_1$  sont les fonctions de Bessel de premier et second ordre.

Les variables dépendantes dans la fonction de la source cylindrique sont données comme :

$$t^* = \frac{\alpha t}{r^2} \quad (2-10)$$

$$r^* = \frac{r}{r_b} \quad (2-11)$$

Le terme  $t^*$  dans l'équation 2.10 est connu comme le nombre de Fourier. L'équation 2.7 est basée sur un flux de chaleur injecté constant. Aux fins de l'expérimentation et du fait que les applications n'opèrent pas en mode constant d'injection de chaleur, l'équation 2.7 peut être modifiée pour s'ajuster à une injection décomposée.

Afin d'adapter le modèle de la source cylindrique à un forage avec une configuration de tuyaux en U, un diamètre équivalent a été suggéré pour corriger cette erreur. Le diamètre des deux tubes peut être représenté par une approximation d'un diamètre équivalent pour le diamètre du tube donné (Bose, 1984).

$$D_{eq} = \sqrt{2} D_p \quad (2-12)$$

Ce diamètre équivalent de l'équation 2.12 rapporte le diamètre d'un tuyau simple, qui approxime le transfert de chaleur à partir de deux tuyaux dans un forage cylindrique. Les deux tuyaux sont représentés comme un cylindre simple avec le diamètre  $D_{eq}$ . Si on assume que les propriétés du coulis sont identiques aux propriétés du sol, la température au bord du tuyau équivalente peut être estimée en utilisant  $G(1, t^*)$ . La résistance entre le fluide et le bord du tuyau équivalent doit être estimée. La structure interne se compose de la résistance de conductivité du tuyau et de la résistance de convection due au mouvement liquide à l'intérieur du tuyau. La résistance du tuyau peut être représentée par :

$$R_p = \frac{r_0 \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2k_p} \quad (2-13)$$

La conductivité du tuyau  $k_p$  est exigée dans l'équation 2-13.

La résistance de convection peut être représentée aussi par :

$$R_{conv} = \frac{1}{h_i \frac{r_o}{r_i}} \quad (2-14)$$

Le coefficient de convection  $h_i$  dans l'équation 2.14 est déterminé des deux équations suivantes qui traitent le transfert de chaleur interne d'un fluide dans des conduites. L'équation 2.15 est le coefficient de convection pour l'écoulement turbulent.

$$h_i = Nu_{D_i} \frac{k_f}{D_i} \quad (2-15)$$

Le nombre de Nusselt (Nu) est donné par (Dittus et Boelter, 1930) en fonction du nombre de Prandtl et du Reynold. L'équation de Nusselt est donnée comme :

$$Nu_{D_i} = 0.023 Re_{D_i}^{4/5} Pr^n \quad (2-16)$$

Le coefficient de puissance  $n$  de Prandtl dépend de la direction du champ de température. Pour le chauffage ( $T_{surface \text{ du tuyau}} > T_{moyenne \text{ du fluide}}$ ),  $n = 0.4$ . Pour la climatisation ( $T_{surface \text{ du tuyau}} < T_{moyenne \text{ du fluide}}$ ),  $n = 0.3$ .

Après le calcul du coefficient de convection dans l'équation 2.15, les équations 2.14 et 2.13 peuvent être combinées dans un coefficient de transfert de chaleur équivalent au transfert de chaleur total à partir du fluide à la paroi extérieure de tuyau. Kavanaugh (1991) représente la résistance équivalente du tuyau comme suite:

$$h_{eq} = \frac{1}{R_p + R_{conv}} \quad (2-17)$$

Comme présenté, le modèle de la source cylindrique ne représente pas les propriétés thermiques de coulis, mais elles pourraient être tenues en compte. Kavanaugh propose une approche essai erreur pour déterminer la conductivité du sous-sol d'un ensemble de données expérimental. Ceci ne satisfait pas complètement, car il est long et se fonde sur le jugement d'utilisateur quant à ce qui est la meilleure solution.

## **2.4 Les modèles numériques appliqués aux TRT**

Des approches plus prometteuses pour améliorer les possibilités prédictives du TRT peuvent être trouvées dans des procédures d'évaluation de paramètre utilisées par les outils numériques.

L'avantage principal de ces modèles est qu'ils permettent une description plus précise du système. En conséquence, elles n'ont pas besoin des approximations dans les équations gouvernantes même si dans certains cas, elles exigent des approximations qui sont moins graves que ceux des modèles analytiques.

### **2.4.1 Modèles numériques unidimensionnels**

Une description dans l'espace unidimensionnel est adoptée pour décrire la réponse thermique dans les systèmes de stockage souterrain de l'énergie thermique (Underground Thermal Energy Storage) (UTES) a été validé par (Shonder et Beck, 2000a; 2000b).La solution des

différences finies de l'équation de Fourier est obtenue dans le sol, et le transfert de chaleur du fluide dans les tuyaux est considéré comme un phénomène stationnaire. La présence du coulis et la disposition géométrique des tuyaux sont modelées comme un simple rayon efficace.

Sous cette approche, l'équation de Fourier est résolue en supposant que le champ de température est constant le long de l'axe  $z$  et aussi qu'il est invariable sur l'axe de rotation spatiale. Les valeurs prévues de la conductivité thermique du coulis et du sol et de la résistance de forage étaient en bon accord avec les mesures indépendantes (Shonder et Beck, 1998) et avec des valeurs obtenues par le modèle de la ligne source (MLS) et le modèle de la source cylindrique (MCS) (Shonder et Beck, 2000b).

Les principaux bénéfices de cette approche sont que le modèle emploie les données mesurées sur le terrain avec la puissance fournie plutôt qu'une valeur moyenne ; d'ailleurs, la méthode fournit des évaluations statistiques des intervalles de confiance pour les paramètres inconnus.

Un modèle numérique de différence finie unidimensionnelle a été également présenté par (Gehlin et Hellstrom, 2003), qui ont comparé cette approche à trois approches différentes de modélisation analytique pour aider le procédé d'évaluation du TRT. Leurs conclusions ont confirmé que le modèle de la ligne source (MLS) est le modèle le plus rapide et le plus simple qui garantit une bonne approximation si au moins 50 h de mesures est sont considérées. En ce qui concerne le modèle numérique, ils ont observé que, comme prévu, l'approche unidimensionnelle ne peut pas capturer la réponse thermique à court terme du système.

#### **2.4.2 Modèles numériques bidimensionnels**

Plusieurs approches sont disponibles en littérature, pour laquelle la dépendance spatiale du champ de la température est décrite par l'adoption de deux systèmes de coordonnées. La

plupart de ces méthodes adoptent une approche en « tranche horizontale » ou une approche en « tranche verticale ».

Dans l'approche en tranche verticale, l'équation de diffusion de la chaleur est invariable sous la rotation spatiale au tour de l'axe  $z$  d'échangeur de chaleur géothermique vertical, et donc, seulement les dépendances de  $z$  et de  $r$  dans l'équation de Fourier sont considérées. Sous l'approche de tranche horizontale, les dépendances de  $r$  et de  $\theta$  du champ de température sont représentées, mais les effets axiaux sont négligés. Les deux approches représentent des approximations de l'échangeur de chaleur géothermique (BHE). Si les configurations du tube en U sont considérées ; l'approche en tranche verticale décrit correctement le comportement de BHE si la configuration en tube coaxial est modélisée.

Wagner et Clauser (2005) ont couplé un procédé d'évaluation des paramètres avec un modèle thermique bidimensionnel transitoire sous l'approche en tranche verticale dans le but de récupérer la conductivité thermique de sol et la capacité de chaleur par volume unitaire. Dans cette méthode, le minimum de la fonction objective, représenté par la différence carrée entre les données prévues et calculées, est exécuté en adoptant un ensemble de données simulées et en détectant graphiquement la valeur minimum.

L'approche de tranche verticale a été également considérée par (Zanchini, Lazzari et Priarone, 2010) en décrivant un échangeur de chaleur géothermique (BHE) coaxial en se concentrant sur l'effet du court-circuit thermique et sur la performance de l'échangeur de chaleur.

Un pseudo modèle bidimensionnel a été considéré par Fujii et al. (2009), qui ont appliqué le (MCS) aux couches inférieures sur lesquelles la terre a été verticalement subdivisée. Une approche semblable, basée sur un TRT distribué a été exécutée à l'aide des sondes de température en fibre optique, a été également discutée par (Acuña, 2010).

Austin, Yavuzturk et Spitler (2000) ont adopté une approche de modélisation bidimensionnelle sous l'approche horizontale de tranche en intégrant l'équation aux dérivées partielles avec la méthode numérique de volumes finis. L'approche bidimensionnelle, également considérée dans (Yavuzturk, Spitler et Rees, 1999), consiste en une approximation de l'échangeur de chaleur géothermique (BHE) sur un plan orthogonal. En considérant une distribution dissymétrique entre les deux tuyaux du tube en U, la résistance de convection du fluide est incorporée à la résistance du tuyau, et on assume qu'un flux thermique variable dans le temps entre par la paroi du tuyau. Cette approximation est obtenue en négligeant la dépendance axiale du champ de température et en simplifiant la résistance du forage en une résistance thermique équivalente.

Austin, Yavuzturk et Spitler (2000) ont validé cette méthodologie dans le but d'estimer simultanément les conductivités thermiques du sol et du coulis en comparant les résultats d'une expérience de laboratoire aux valeurs indépendamment mesurées. Les problèmes impliqués dans l'évaluation des paramètres autres que la conductivité thermique du sous-sol et du coulis ont été discutés. D'ailleurs, une analyse de sensibilité a été également présentée pour déterminer l'influence des valeurs des paramètres utilisées comme entrées dans le procédé d'évaluation sur la valeur prévue de la conductivité thermique du sous-sol. En particulier, les répercussions sur les valeurs prévues de la conductivité thermique du sous-sol des incertitudes dans la température non perturbée du sous-sol, la chaleur spécifique volumétrique, l'espacement entre les tubes, et le rayon de forage ont été considérés. L'effet de la longueur de l'essai était également pris en considération. L'incertitude prévue était dans la gamme de 9.6%-11.2%.

### **2.4.3 Modèles numériques tridimensionnels**

Les modèles tridimensionnels des échangeurs de chaleur souterrains (GHE) sont disponibles dans la littérature ouverte de TRT et ont été employés la plupart du temps pour produire des données synthétiques de TRT, et tout récemment ces modèles ajoutés aux méthodes

d'évaluation des paramètres appliquées aux données expérimentales sous une approche inverse de problème.

Marcotte et Pasquier (2008) ont établi un modèle tridimensionnel d'un échangeur de chaleur souterrain (GHE) dans l'environnement de COMSOL Multyphysics® ils n'ont pas intégré l'équation de transport d'énergie pour le fluide dans le tube en U, mais ils ont modelé le domaine liquide en tant plein et en résolvant l'équation de Fourier en introduisant un tenseur liquide anisotrope de conductivité thermique.

D'ailleurs, dans leur modèle, la résistance de convection du fluide a été négligée. Les résultats principaux de ce modèle étaient une nouvelle définition de la température moyenne du fluide à utiliser dans le procédé habituel d'évaluation basé sur l'approche de la ligne source, qui grâce à cette amélioration, a permis une meilleure évaluation de la résistance thermique de forage.

Signorelli et al. (2007) ont développé un modèle tridimensionnel de GHE dans l'environnement de FRACTure® qui peut exactement simuler le transport thermique advectif dans le tube en U en utilisant les éléments unidimensionnels de tube entourés par les éléments de matrice tridimensionnels. Ils ont mis en application ce modèle pour produire des données synthétiques de TRT qui ont permis une évaluation des effets hétérogènes du sous-sol et du mouvement d'eaux souterraines sur le procédé habituel d'évaluation basé sur l'approche de la ligne source. Les résultats du modèle ont été couplés avec des données expérimentales de TRT en ajustant la conductivité thermique du sol.

Lamarche, Kaji et Beauchamp (2010) ont mis en application un modèle tridimensionnel complet dans l'environnement de COMSOL Multyphysics® dans lequel le flux de fluide dans le tube a été modelé comme problème unidimensionnel en utilisant les équations classiques. La réponse thermique de ce modèle a été traitée en discutant en particulier l'évaluation de la résistance de forage.

Bozzoli et al. (2011) ont présenté un procédé en deux étapes d'évaluation de paramètre (Two-Step Parameter Estimation Procedure) (TSPEP) basé sur un modèle tridimensionnel numérique du système géothermique. Le procédé a été appliqué aux données simulées et expérimentales d'un essai standard de TRT pour évaluer les conductivités thermiques du sous-sol et du coulis ainsi que la chaleur spécifique volumétrique.

L'algorithme de (TSPEP) se compose essentiellement de deux procédures séquentielles à appliquer aux données pour deux intervalles de temps différents. Spécifiquement, dans le régime transitoire, le procédé d'évaluation de paramètre permet l'évaluation de la conductivité thermique du coulis ainsi que la chaleur spécifique volumétrique. Ces valeurs sont alors employées comme valeurs d'entrée dans la deuxième étape, dans laquelle le procédé d'évaluation de paramètre est appliqué au régime permanent pour récupérer la conductivité thermique du sous-sol et la chaleur spécifique.

Pour améliorer l'exactitude du procédé, d'autres itérations de ces deux étapes ont été employées. La séparation du temps dans l'évaluation des propriétés du sous-sol et de du coulis découple partiellement les deux problèmes, rendant l'évaluation de ces quatre paramètres faisable. Le choix des intervalles de temps dans lesquels les deux étapes sont appliquées, reste un choix crucial pour cette stratégie d'évaluation de multi paramètre.

Une analyse de sensibilité préventive s'est avérée la bonne stratégie pour aider le procédé d'évaluation de paramètre, ajoutée à une l'analyse d'erreurs entre les données calculées et celles enregistrées expérimentalement. Les résultats rapportés par (Bozzoli et al., 2011) ont confirmé ce que (Austin, Yavuzturk et Spitler, 2000) ont précisé ; c.-à-d., cette modélisation tridimensionnelle appliquée à un TRT peut surmonter les problèmes liés à l'évaluation simultanée de la conductivité thermique du sous-sol et la chaleur spécifique volumétrique.

## 2.5 Mise en contexte

La revue de littérature réalisée dans ce chapitre porte sur l'état des connaissances des tests de réponse thermique. Dans un premier temps, un état des connaissances concernant les méthodes expérimentales pour l'évaluation des propriétés thermiques du sous-sol leurs fonctionnements et particularités. Cette première partie visait à bien établir les méthodes et démarches scientifiques menées pour la détermination de la conductivité thermique du sous-sol. Étant donné que le puits géothermique pour un système à expansion directe été déjà installé, l'essai sur terrain a été choisi pour le déroulement des expériences en utilisant des câbles chauffants sachant que peu de publications et de résultats scientifiques sont disponibles utilisant cette nouvelle méthode. Le présent mémoire vise donc à contribuer à l'avancement des connaissances pour ce type de système ainsi que pour cette nouvelle méthode.

La deuxième partie de la revue présente l'évolution des modèles analytiques qui supposent une injection de chaleur constante de courte durée dans les échangeurs de chaleur pour déterminer les propriétés thermiques du sous-sol. Ces mêmes méthodes ont été utilisées dans cette étude pour évaluer la conductivité thermique du sous-sol et aussi pour faire une simulation pour générer des résultats analytiques de la température moyenne du fluide durant l'essai.

La dernière section se rapporte à une revue sur l'état de l'art actuel concernant la modélisation numérique des systèmes géothermiques et de l'évaluation des paramètres. À partir de là le modèle numérique utilisé dans l'étude a été réalisé, au début comme modèle bidimensionnel qui présente une description très précise du système en prenant en compte l'épaisseur du tuyau et ensuite avec un modèle tridimensionnel qui considère l'hétérogénéité du sous-sol.



## CHAPITRE 3

### DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DU MONTAGE EXPÉRIMENTAL

#### 3.1 Introduction

Le but de la recherche consiste à acquérir des résultats expérimentaux de TRT sur des puits géothermiques à expansion directe afin de déterminer la conductivité thermique du sous-sol et contribuer à l'amélioration de l'état des connaissances globales sur ce type de système énergétique, ainsi que développer, des modèles de simulation. La réalisation de tests expérimentaux constitue donc une part importante du présent travail puisque ces résultats permettront de valider les modèles de simulation développés. La méthodologie expérimentale et les différents essais effectués y sont également présentés.

#### 3.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental illustré à la Figure 3.1 comprend essentiellement un puits géothermique à expansion directe foré verticalement à une profondeur de 30 m dans le sol sur le terrain adjacent au bâtiment du Centre de Technologie Thermique (CTT) de l'École de technologie supérieure ainsi qu'un câble chauffant introduit dans une partie (*la ligne de vapeur*) du tuyau en U de cuivre sur toute sa longueur.



Figure 3.1 Dispositif expérimental

Le câble utilisé est un câble chauffant à isolation minérale (Mineral Insulated Cable) (MIC), (Figure 3.2), inséré dans la ligne vapeur de la boucle géothermique. L'isolation du conducteur se fait par oxyde de magnésium (MgO) avec une gaine extérieure en Incoloy 825 qui résiste à la corrosion tout en fournissant une rigidité et une protection mécanique qui a facilité l'introduction à l'intérieur du tube en cuivre en plus d'avoir un point de mise à la terre. Le câble (MIC) comporte une section chauffante de 30 m ainsi qu'une section froide de 2 m et offre une puissance uniforme sur toute sa longueur de 63 W/m grâce à une résistance en série qui a permis l'installation dans le tube de se faire sans la réduction des performances.

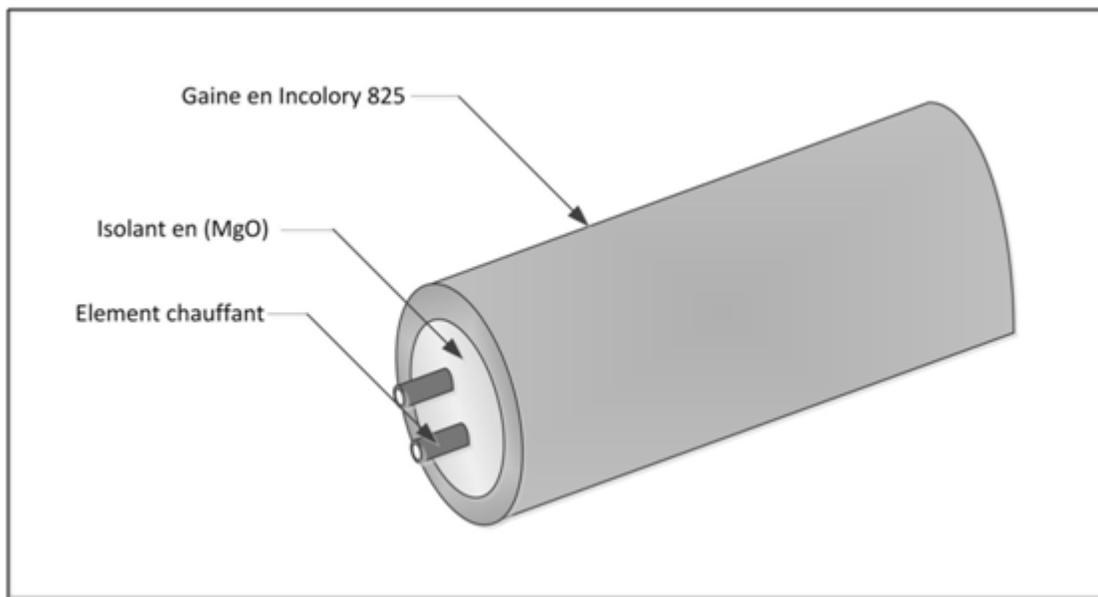


Figure 3.2 Câble chauffant à isolation minérale (MIC)

Des thermocouples sont placés le long du puits de part (Ligne vapeur) et d'autre (Ligne liquide) pour mesurer la température à des profondeurs fixes. Les données expérimentales recueillies à partir des thermocouples se font à l'aide d'un système d'acquisition de données relié à un ordinateur personnel dans les laboratoires du CTT.

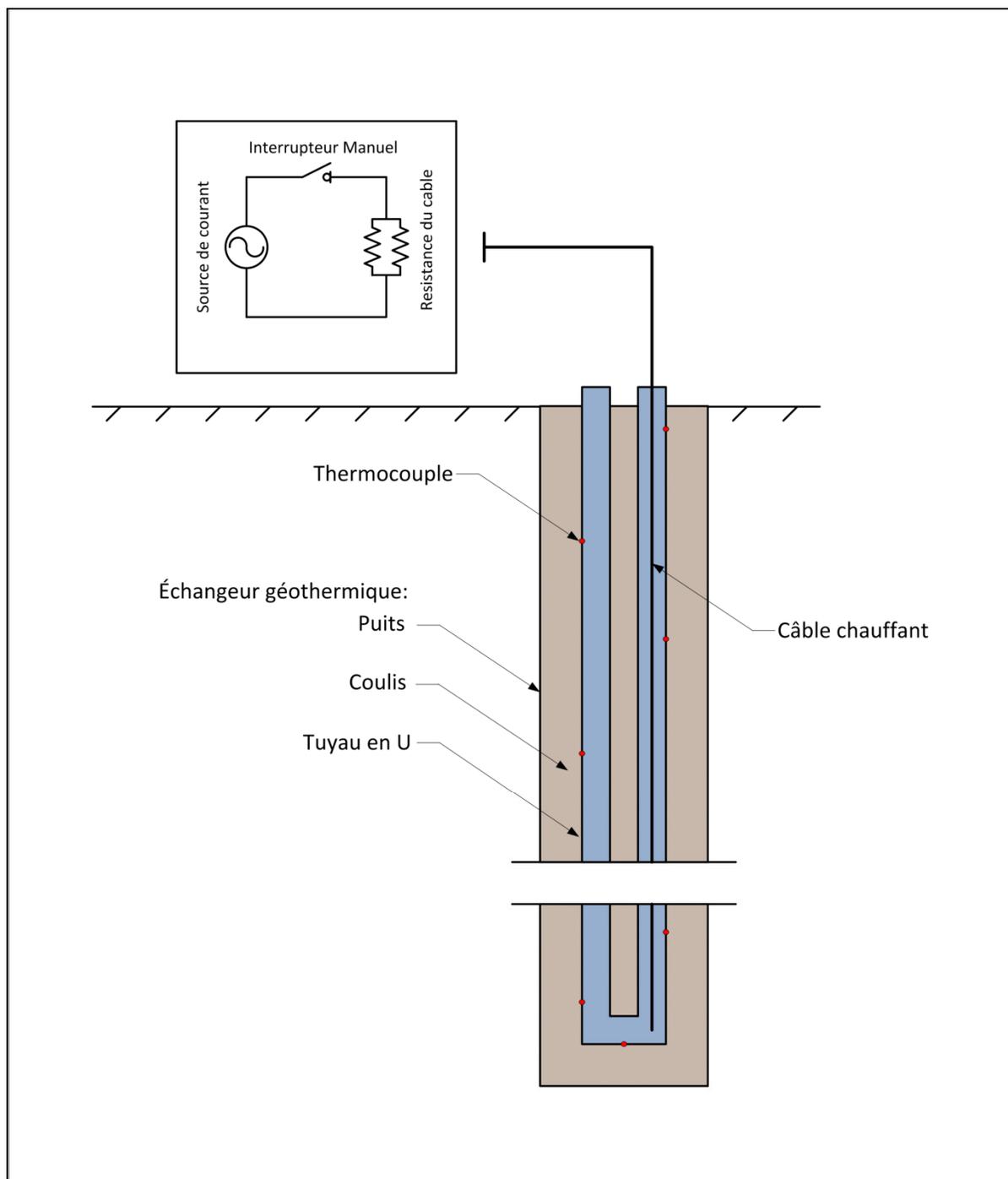


Figure 3.3 Unité de test de réponse thermique avec câble chauffant.

La tension électrique induite dans le câble chauffant a été mesurée et enregistrée avec un enregistreur de données équipé d'un voltmètre.

La dissipation thermique par unité de longueur de câble est calculée à partir des mesures de tension en utilisant la loi du Joule et d'ohm. La résistance électrique du câble est mesurée avec un ohmmètre. L'injection de chaleur en fonction du temps est alors ramenée à une moyenne pour la période entière de chauffage.

La basse tension a été employée pour cette étude, car les essais ont été effectués sur un forage relativement court.

Un commutateur manuel a été installé sur le circuit de câble chauffant pour démarrer l'injection de la chaleur.

### **3.3 Instrumentation**

L'instrumentation utilisée pour mesurer les paramètres nécessaires à la réalisation des expériences. Les mesures effectuées concernent les données suivantes :

- Température du fluide à différentes profondeurs du puits ( $T_f$ );
- La tension électrique induite dans le câble chauffant ( $U$ ).

#### **3.3.1 Mesure de la température**

Les mesures de température sont obtenues à partir de thermocouples de type K. La plage d'utilisation de ces thermocouples (0°C à 1370°C) couvre largement la plage de températures de fonctionnement du TRT. Ces thermocouples sont au nombre de 9. La Figure 3.4 montre leurs positionnements. Les incertitudes résultantes en fonction de la température sont traitées dans le chapitre qui traite de l'analyse de l'erreur.



Figure 3.4 Positionnement des thermocouples dans le puits.

### 3.3.2 Mesure de la tension électrique

Pour la mesure de la tension électrique utile pour le calcul de la puissance fournie, un lecteur de puissance est utilisé (AEMC instruments : 8230 PowerPad Jr.) avec une précision relative de  $\pm 0.5\%$ , qui enregistre la tension délivrée au câble.

### 3.3.3 Système d'acquisition de données

L'ensemble des thermocouples est relié à un système d'acquisition de données composé d'une carte d'acquisition 32 sorties de marque National Instrument-USA modèle SCXI-1100 connecté à un ordinateur équipé du logiciel Labview, permet de recueillir automatiquement les données provenant des thermocouples. Les valeurs mesurées peuvent être enregistrées dans des fichiers texte, qui sont ensuite convertis en fichiers Excel où ils seront préparés à l'exploitation.

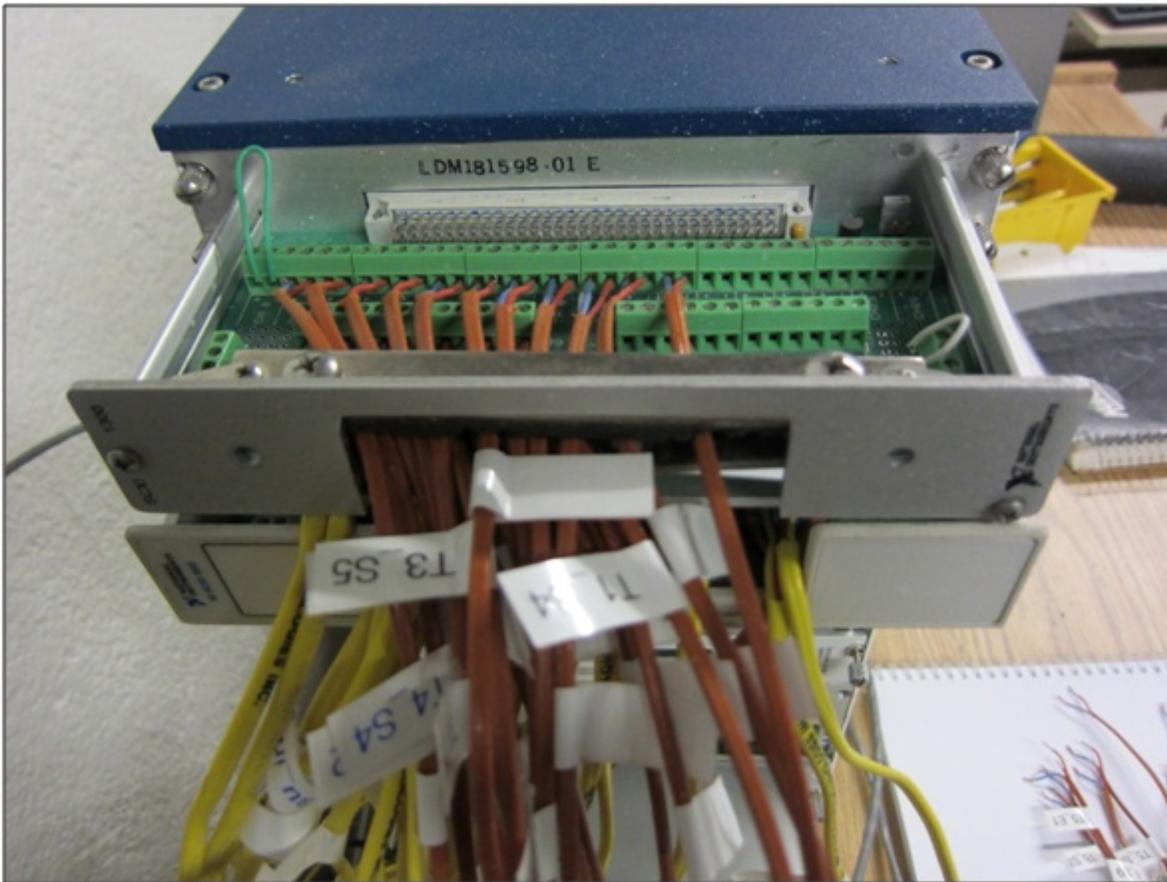


Figure 3.5 Carte d'acquisition 32 sorties NI- modèle SCXI-1100.

### 3.4 Déroulement des expériences

L'essai commence par une première période d'enregistrement de la température sans aucun chauffage pour déterminer la température du sous-sol non perturbé pour chaque section, suivie par une période d'injection de chaleur. Le courant électrique est transmis au câble pour chauffer l'antigel dans le tuyau à la puissance requise. La température de l'antigel à l'intérieur de la tuyauterie de l'échangeur est mesurée, mais son analyse est difficile en raison de la forme concentrique du front thermique qui se forme autour du câble qui se tient dans un cylindre d'un très petit diamètre. Le tuyau ralentit la progression du front thermique, et augmente le gradient thermique de telle sorte qu'un petit mouvement du câble situé dans une zone de gradient concentrique peut provoquer un bruit important.

La prochaine et dernière étape du TRT est d'arrêter l'injection de chaleur et de mesurer le rétablissement de la température dans l'échangeur de chaleur. La température peut être mesurée jusqu'à ce qu'elle soit suffisamment près de la température non perturbée du sol. Des mesures sont conduites dans chaque tube de l'échangeur de chaleur pour une profondeur indiquée. La température à l'intérieur de l'échangeur de chaleur s'homogénéise rapidement au cours de la période de rétablissement. Le signal enregistré de la température est par conséquent lisse même si le câble se déplace et la température peut être analysée facilement pour déterminer les propriétés thermiques du sous-sol en utilisant les modèles analytiques ou numériques.

### 3.5 Problèmes rencontrés lors de l'analyse expérimentale

Durant l'analyse des données expérimentales, pour celle de la température en particulier quelques thermocouples ont donné des résultats de conductivité thermique négative ou des valeurs trop élevées ainsi que des fluctuations majeures. Donc, seuls les thermocouples qui ont donné des résultats cohérents ont été gardés, trois sur le tuyau où le câble est introduit (*la ligne de vapeur*) et deux sur l'autre tuyau (*la ligne de liquide*). La Figure 3.7 montre le positionnement des thermocouples qui ont été pris en considération pour l'analyse.

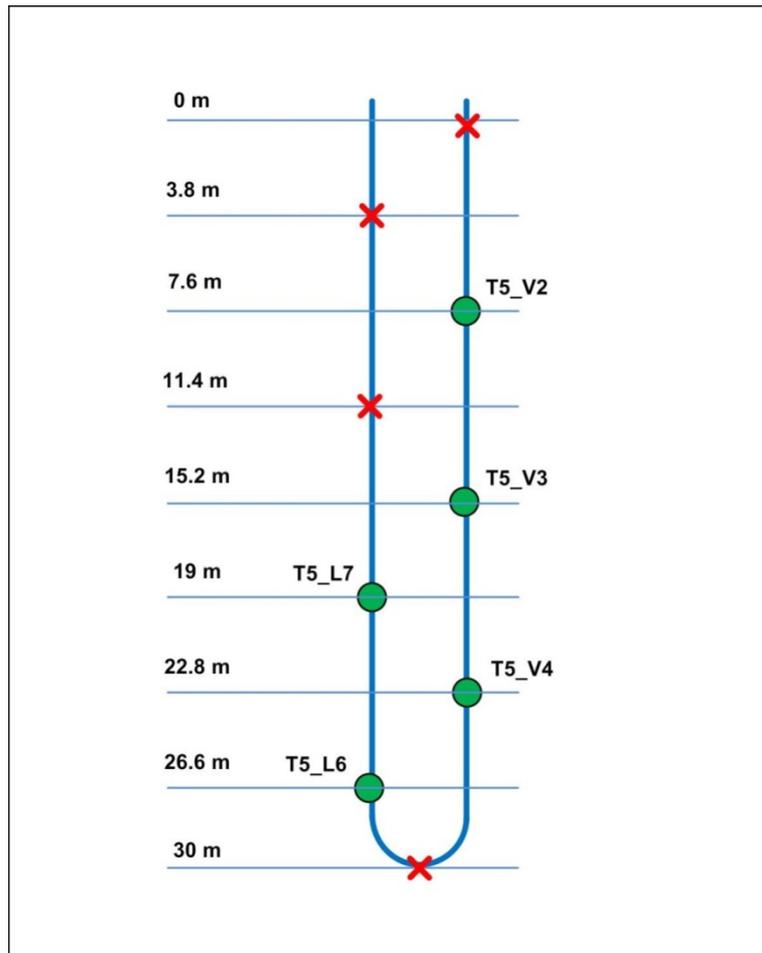


Figure 3.6 Positionnement des thermocouples pris en considération dans le puits.

### 3.6 Déroulement de l'analyse expérimentale

Dans ce travail trois essais ont été réalisés, deux avec une injection constante de chaleur constante sans interruption de 50 h et de 74 h et un dernier essai de 100 h avec une interruption de 8 h durant la période de chauffage.

### 3.6.1 Cas d'injection de chaleur sans interruption

Les deux premiers cas étudiés supposent une puissance thermique constante de 63W/m au cours d'une période de chauffage de 50 et 74 heures comme le montrent les Figures 4.8 et Figure 4.9 pour différentes profondeurs. Les températures du sol non perturbé enregistrées avant l'injection de chaleur sont résumées dans les Tableau 3.1 et Tableau 3.2, respectivement.

Tableau 3.1 Température non perturbée du sous-sol à différentes profondeurs pour un TRT d'une durée de 50 h

<b>Nom du Thermocouple</b>	<b>Localisation physique</b>	<b>Température non perturbée du sous-sol (°C)</b>
T <sub>5_V2</sub>	Ligne vapeur de la boucle #5 à 7.6 m de la surface du sol	16.7
T <sub>5_V3</sub>	Ligne vapeur de la boucle #5 à 15.2 m de la surface du sol	14.5
T <sub>5_L7</sub>	Ligne liquide de la boucle #5 à 19 m de la surface du sol	15.2
T <sub>5_V4</sub>	Ligne vapeur de la boucle #5 à 22.8 m de la surface du sol	15.6
T <sub>5_L6</sub>	Ligne liquide de la boucle #5 à 26.6 m de la surface du sol	14.7

L'évolution de la température du fluide à différentes profondeurs pour une injection de chaleur de 63 W/m pour une durée de 50H et 74H est présentée dans les Figures 3.7 et 3.8, respectivement.

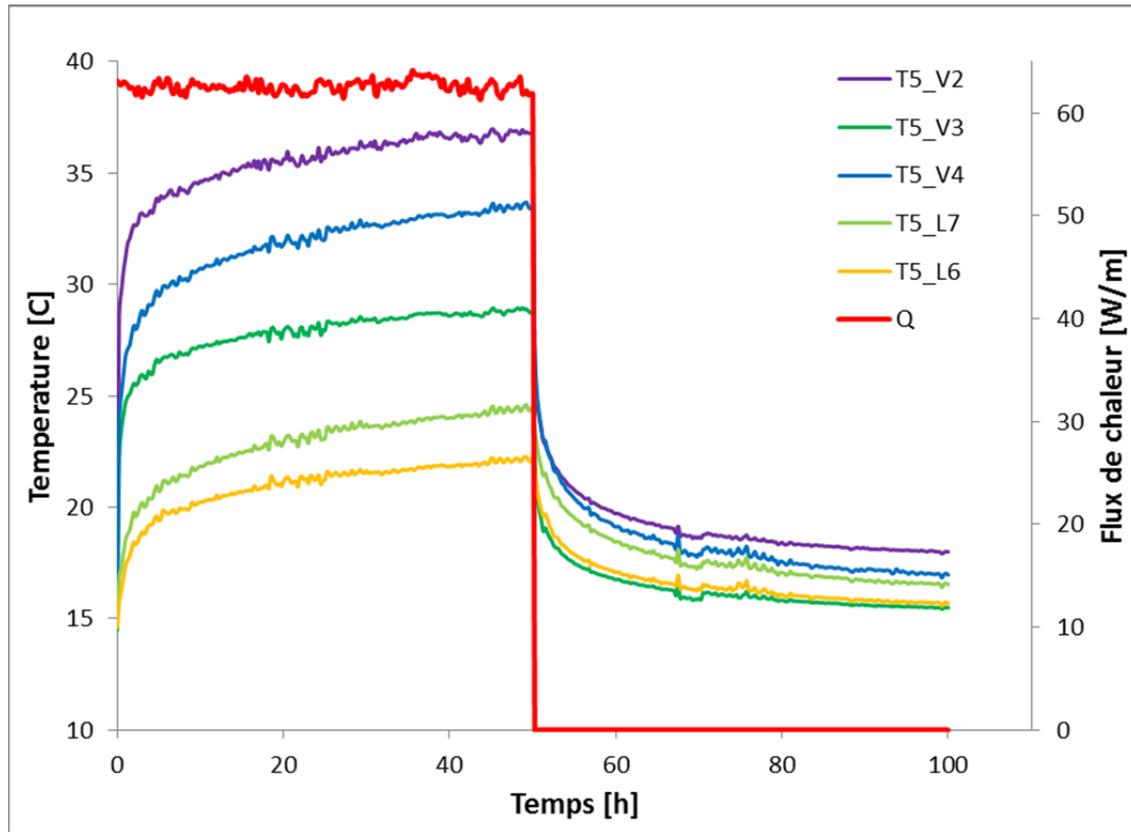


Figure 3.7 Évolution de la température du fluide a différentes profondeurs pour une injection de chaleur de 63 W/m durant 50 h.

Tableau 3.2 Température non perturbée du sous-sol à différentes profondeurs pour un TRT d'une durée de 74 h

Nom du Thermocouple	Localisation physique	Température non perturbée du sous-sol (°C)
T <sub>5_V2</sub>	Ligne vapeur de la boucle #5 à 7.6 m de la surface du sol	15.9
T <sub>5_V3</sub>	Ligne vapeur de la boucle #5 à 15.2 m de la surface du sol	14.6
T <sub>5_L7</sub>	Ligne liquide de la boucle #5 à 19 m de la surface du sol	15.3
T <sub>5_V4</sub>	Ligne vapeur de la boucle #5 à 22.8 m de la surface du sol	15.6
T <sub>5_L6</sub>	Ligne liquide de la boucle #5 à 26.6 m de la surface du sol	14.8

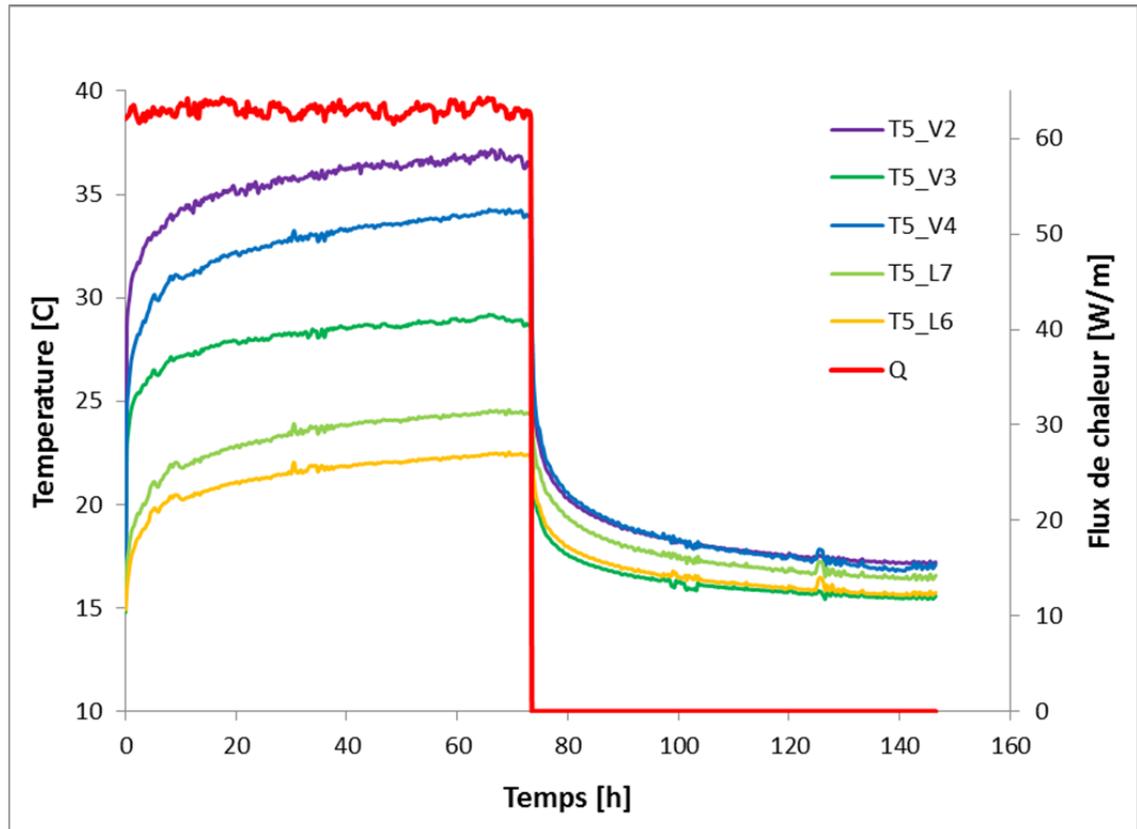


Figure 3.8 Évolution de la température du fluide a différentes profondeurs pour une injection de chaleur de 63 W/m durant 74 h.

Tout d'abord, la température mesurée et moyennée sur 15 min est représentée en fonction du logarithme naturel du temps  $\ln(t)$  pour la période de chauffage et en fonction du logarithme naturel du temps ajusté  $\ln\left(\frac{t}{t-t_h}\right)$  pour la période de restitution thermique.

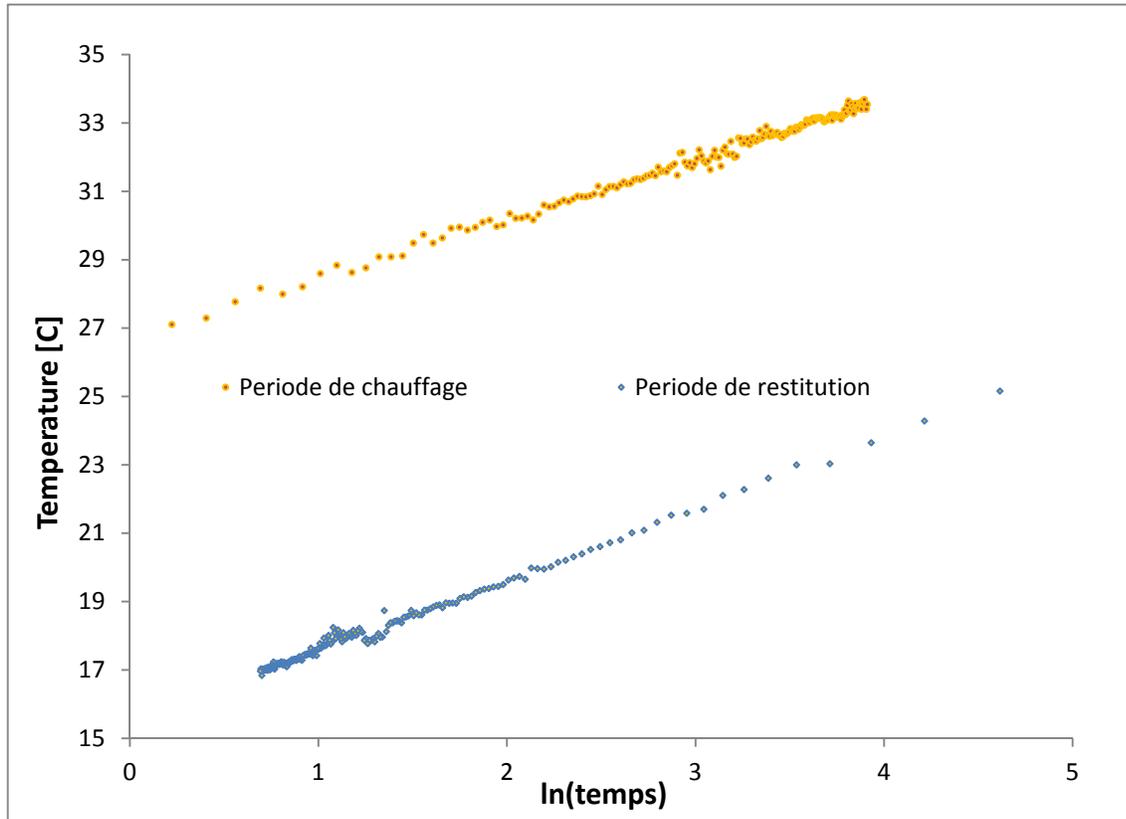


Figure 3.9 La température du fluide en fonction de  $\ln(\text{temps})$ .  
Pour la période chauffage et de restitution thermique.

Comme mentionnée précédemment, la pente de la courbe de chaque période est liée à la conductivité thermique, par conséquent, compte tenu de l'inclinaison de la droite et en prenant  $\dot{Q}$  comme moyenne du flux de chaleur injectée, la conductivité thermique est calculée dans chaque section avec la méthode de la pente.

$$k = \frac{\dot{Q}}{4\pi \cdot \text{pente}} \quad (3-1)$$

Et le flux thermique injecté  $\dot{Q}$  est calculé comme la moyenne du flux de chaleur injecté au cours de la période de chauffage.

### 3.6.2 Cas d'injection de chaleur avec interruption

Ce cas suppose une puissance thermique constante de 63W/m au cours d'une période de chauffage de 100 heures avec une coupure après 41 heures de chauffage pour une durée de 8 heures comme la montre les Figure 3.7 pour différentes profondeurs. Les températures du sol non perturbé enregistrées avant l'injection de chaleur sont résumées dans le Tableau 3.3

Tableau 3.3 Température non perturbée du sous-sol à différentes profondeurs pour un TRT d'une durée de 100h avec une interruption de 8h.

<b>Nom du Thermocouple</b>	<b>Localisation physique</b>	<b>Température non perturbée du sous-sol (°C)</b>
T <sub>5_V2</sub>	Ligne vapeur de la boucle #5 à 7.6 m de la surface du sol	18.3
T <sub>5_V3</sub>	Ligne vapeur de la boucle #5 à 15.2 m de la surface du sol	14.8
T <sub>5_L7</sub>	Ligne liquide de la boucle #5 à 19 m de la surface du sol	15.4
T <sub>5_V4</sub>	Ligne vapeur de la boucle #5 à 22.8 m de la surface du sol	15.9
T <sub>5_L6</sub>	Ligne liquide de la boucle #5 à 26.6 m de la surface du sol	15

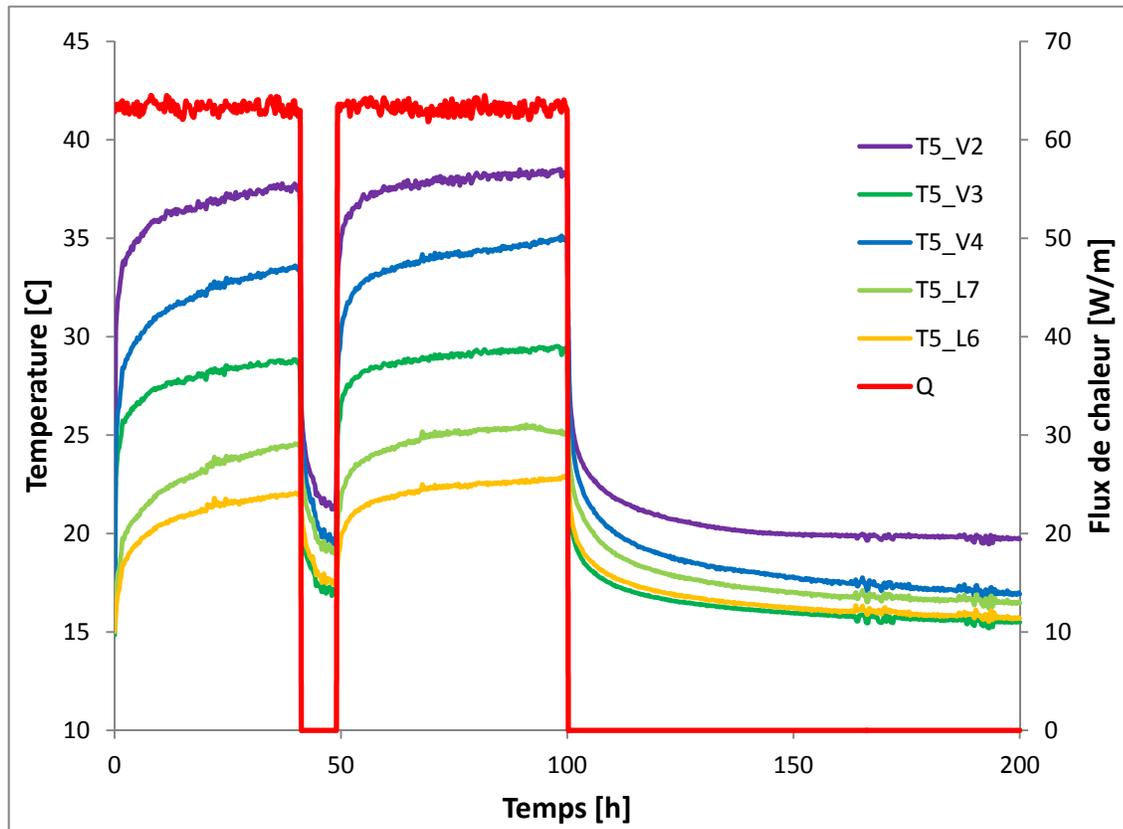


Figure 3.10 Évolution de la température du fluide à différentes profondeurs pour une injection de chaleur de 63 W/m durant 100 h avec une interruption de 8 h.

Comme pour le test avec une injection constante, la température mesurée et moyennée sur 15 min, mais en ce qui concerne la représentation en fonction du logarithme naturel du temps un temps ajusté doit être calculé pour chaque période du test.

Birsoy et Summers (1980) ont développé une technique analytique relativement simple qui permet d'utiliser les données obtenues à partir de test hydrologique de pompage dans des puits de façon intermittente et à différents débits.

En appliquant cette méthode sur le test de réponse thermique avec interruption, on obtient les temps ajustés pour chaque période :

Pour la période de chauffage de 0 à 41 heures

$$\beta_1(t) = t \quad (3-2)$$

Pour la période d'interruption de 41 à 49 heures

$$\beta_2(t) = \frac{t}{t - t_{h1}} \quad (3-3)$$

Pour la période de reprise de chauffage de 49 à 100 heures

$$\beta_3(t) = \frac{t}{(t - t_{h1})} \cdot (t - t_r) \quad (3-4)$$

Pour la période de restitution de 100 à 200 heures

$$\beta_3(t) = \frac{t}{(t - t_{h1})} \cdot \frac{(t - t_r)}{(t - t_{h2})} \quad (3-5)$$

Avec :

$t_{h1}$  Temps de chauffage jusqu'à l'interruption;

$t_r$  Temps de la reprise de chauffage;

$t_{h2}$  Temps de chauffage jusqu'à la restitution.

Un tracé de la température en fonction du logarithme naturel des temps ajustés pour la période de chauffage et celle de la période de reprise est possible, ainsi que le tracé de la température en fonction du logarithme des temps ajustés de la période de coupure et de la période de restitution comme le montre la Figure 3.11.

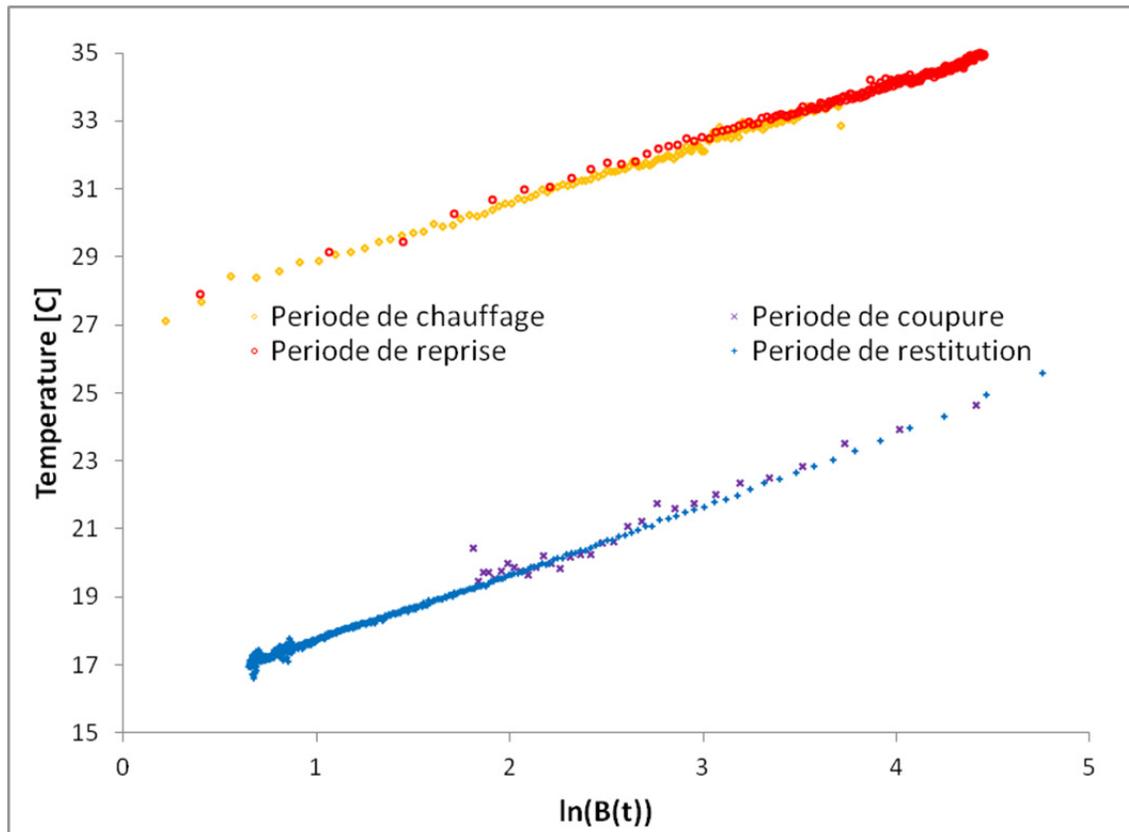


Figure 3.11 La température du fluide en fonction de  $\ln(\text{temps corrigé})$ .  
Pour toutes les périodes d'un test avec interruption.

Les pentes des courbes de la période de chauffage et de reprise et celles de la période de coupure et de restitution sont liées à la conductivité thermique, par conséquent, compte tenu de l'inclinaison de la droite et en prenant  $\dot{Q}$  comme moyenne du flux de chaleur injectée pour chaque période d'injection de chaleur, la conductivité thermique est calculée dans chaque section avec la méthode la pente par l'Equation 3-1.

### 3.7 Déroulement de l'analyse analytique

Le modèle de la ligne source (MLS) et celui de la source cylindrique (MSC) ont été programmés dans l'interface du logiciel MATLAB, pour évaluer la conductivité thermique du sous-sol où la méthode de superposition des courbes a été adoptée suivant l'organigramme présenté dans la Figure 3.12.

Premièrement, le flux de chaleur pour les périodes de chauffage est supposé constant et égal à la moyenne du flux sur toute cette période. La température moyenne du fluide est calculée avec les deux méthodes (MLS et MCS) et elle est comparée avec la température enregistrée expérimentalement. Une fonction objective de l'erreur entre la température calculée et la température enregistrée est calculée pour l'optimisation sur la période de restitution thermique en faisant varier la conductivité thermique et la capacité thermique du sous-sol

$$Erreur = \sum_{n=n_h}^N (T_{mesurée} - T_{calculée})^2 \quad (3-6)$$

Avec :

$N$	Le nombre total des points enregistrés;
$n_h$	Le nombre de points au début de la période de restitution;
$T_{mesurée}$	La température enregistrée expérimentalement au nième point;
$T_{calculée}$	La température calculée par le MLS ou MSC au nième point.

Une fois la différence entre les températures calculée pour chaque point d'enregistrement, une erreur est estimée pour toute la période de restitution comme le montre l'Équation 3-6. Cette opération est répétée pour chaque valeur de conductivité thermique du sous-sol jusqu'à atteindre une erreur minimum qui peut varier entre 0,1 et 0,01 °C.

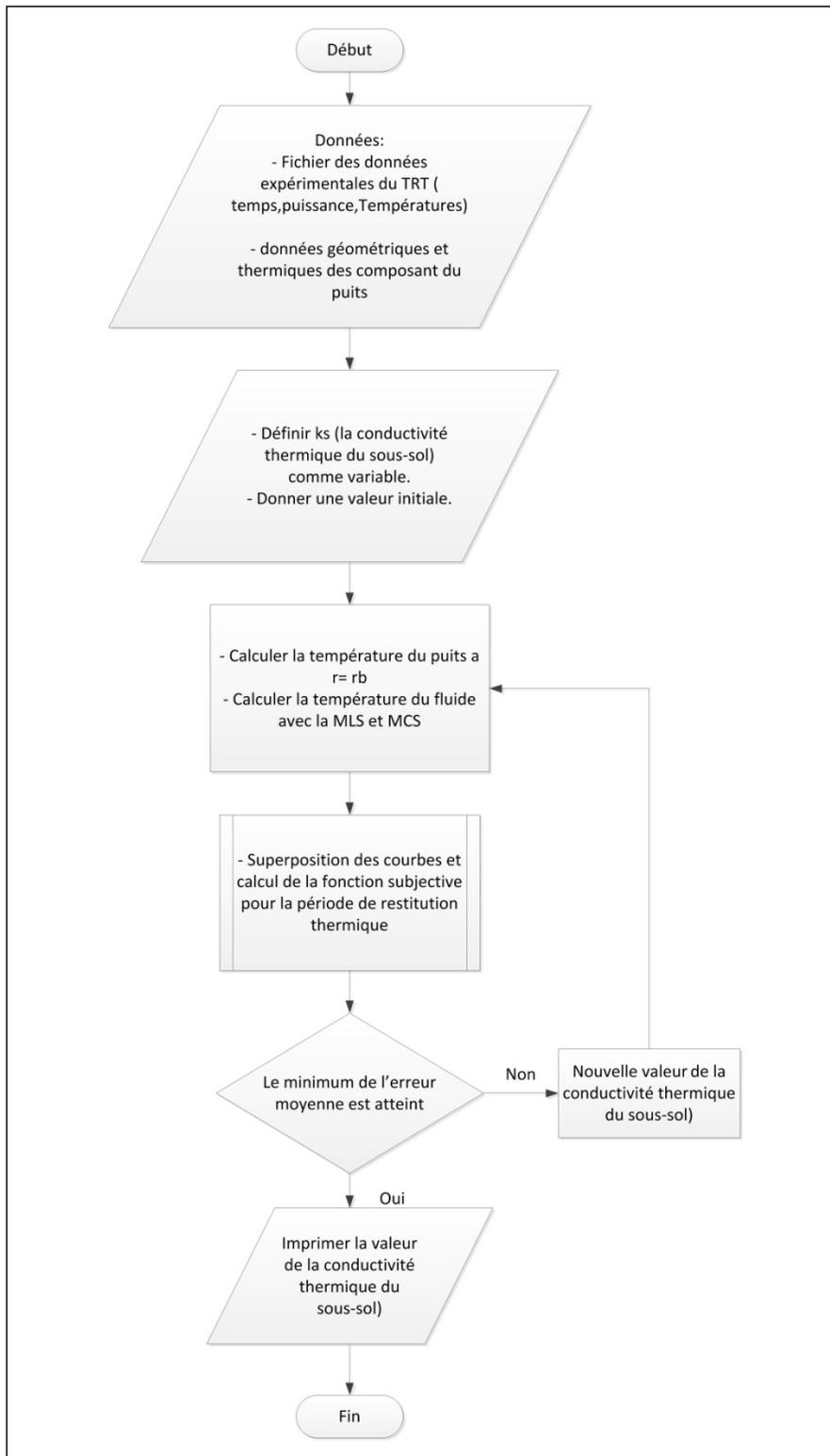


Figure 3.12 Organigramme de l'analyse analytique par la méthode de superposition des courbes.

## CHAPITRE 4

### DEVELOPPEMENT DU MODELE NUMERIQUE

#### 4.1 Le modèle numérique 3D dans COMSOL Multiphysics®

Une simulation tridimensionnelle du comportement thermique du système géothermique à expansion directe pendant le TRT est effectuée en adoptant la méthode d'éléments finis appliquée dans l'environnement de COMSOL Multiphysics® pour comparer avec les résultats expérimentaux. L'échangeur géothermique et le système d'injection d'énergie considérés dans l'analyse actuelle sont schématisés avec une coupe verticale comme le montre la Figure 4.1.

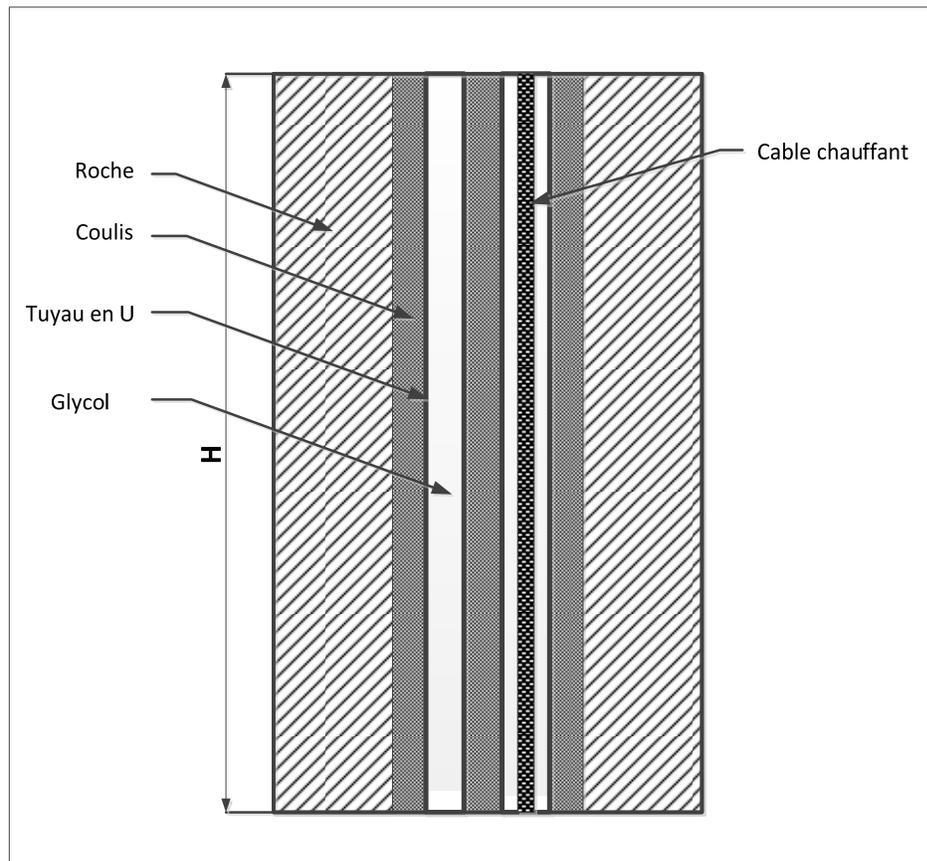


Figure 4.1 Modèle 2D (vertical) de l'échangeur géothermique avec le système d'injection d'énergie.

Le système se compose d'un forage dans le sol avec un tuyau en U rempli d'un fluide caloporteur, le tuyau est immergé dans une matière d'agrégation, dans ce cas-ci, un coulis, et pour finir un câble chauffant à l'intérieur de la ligne vapeur. Les tubes ont été modelés aussi, mais l'épaisseur de la paroi du forage a été négligée pour des raisons de simplification. Des caractéristiques géométriques et thermiques du modèle numérique sont données dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Les caractéristiques géométriques et thermiques du modèle numérique.

<b>Paramètre</b>	<b>valeur</b>
Hauteur du puits	30 [m]
Rayon du puits	0.038[m]
Diamètre du tuyau 1	0.00635[m]
Diamètre du tuyau 2	0.00475[m]
Épaisseur des tuyaux	0.0012446[m]
Distance entre le centre des deux tuyaux	0.01267[m]
La conductivité thermique du sol	Variable
La conductivité thermique du coulis	1.7[W/m·K]
La conductivité thermique du fluide	Varie avec la température
La conductivité thermique des tuyaux	400[W/m·K]
La capacité thermique du sol	Varie avec la profondeur
La capacité thermique du coulis	2.5e06[J/m <sup>3</sup> ·K]
La capacité thermique du fluide	Varie avec la température
La capacité thermique des tuyaux	2.5e06[J/m <sup>3</sup> ·K]

## 4.2 La méthodologie du modèle numérique

Le modèle numérique exige moins d'approximation que les modèles analytiques. Cependant, en raison de son détail, il exige quelques approximations additionnelles.

Au début un modèle 2D a été réalisé, le système montre un plan de symétrie ce qui réduit considérablement le nombre d'éléments utilisés, et on le considère pratiquement illimité dans la direction radiale comme le montre la Figure 4.2.

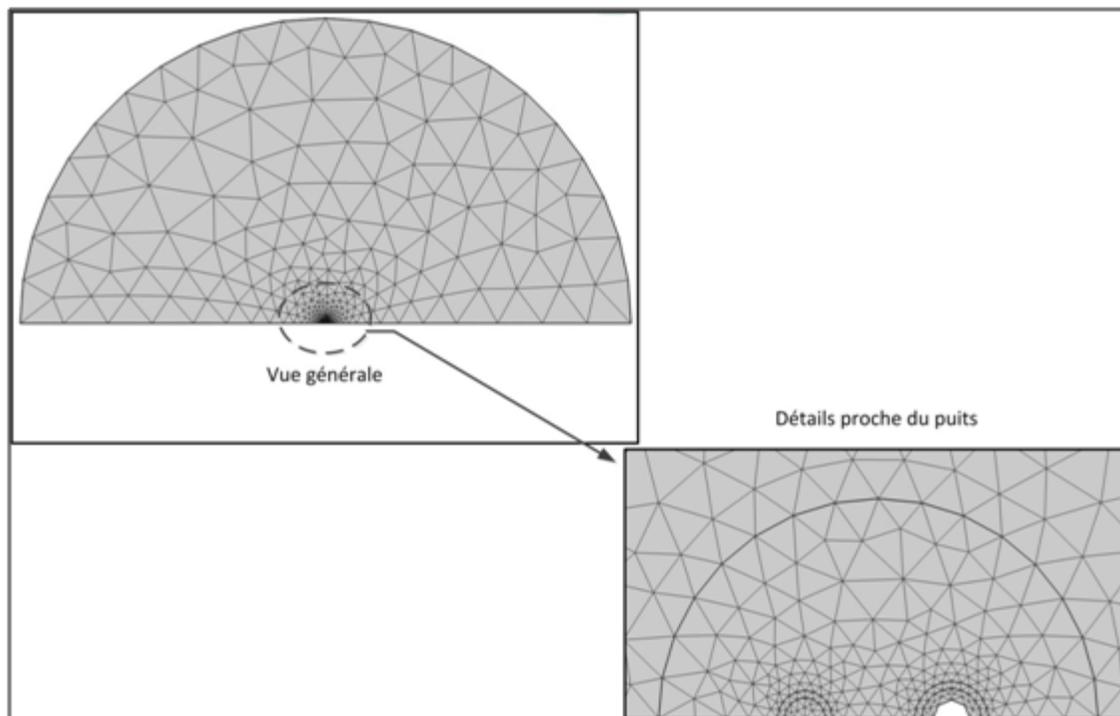


Figure 4.2 Modelé numérique 2D.

Le passage au modèle 3D c'est fait avec une extrusion du modèle 2D dans la direction axiale sur toute la profondeur du puits, l'état initial est imposé tel que toutes les températures sont égales à la température du sol non perturbée, qui est imposée aux autres frontières externes verticales, alors que dans la direction axiale, il est limité par deux surfaces adiabatiques placées à  $z = 0$  (surface du sol) et à  $z = H$  (profondeur simulée de l'échangeur) en plus du plan de symétrie. Aussi les effets axiaux sont négligés, ça reste une approximation raisonnable vu que le modèle n'est employé que pour obtenir la température du fluide que durant quelques jours seulement, c.-à-d. la durée typique d'un essai thermique. Les résultats présentés dans (Lamarche, Kajl et Beauchamp, 2010) indiquent que les effets axiaux pourraient jouer un rôle seulement après une période beaucoup plus longue que celle d'un TRT. C'est pour mettre en évidence l'aspect non homogène du sous-sol que le modèle a été transformé en 3D et divisé en plusieurs couches sur la profondeur correspondant à l'emplacement de chaque thermocouple. Le système géothermique modelé dans l'environnement de COMSOL Multiphysics® est rapporté dans la Figure 4.3.

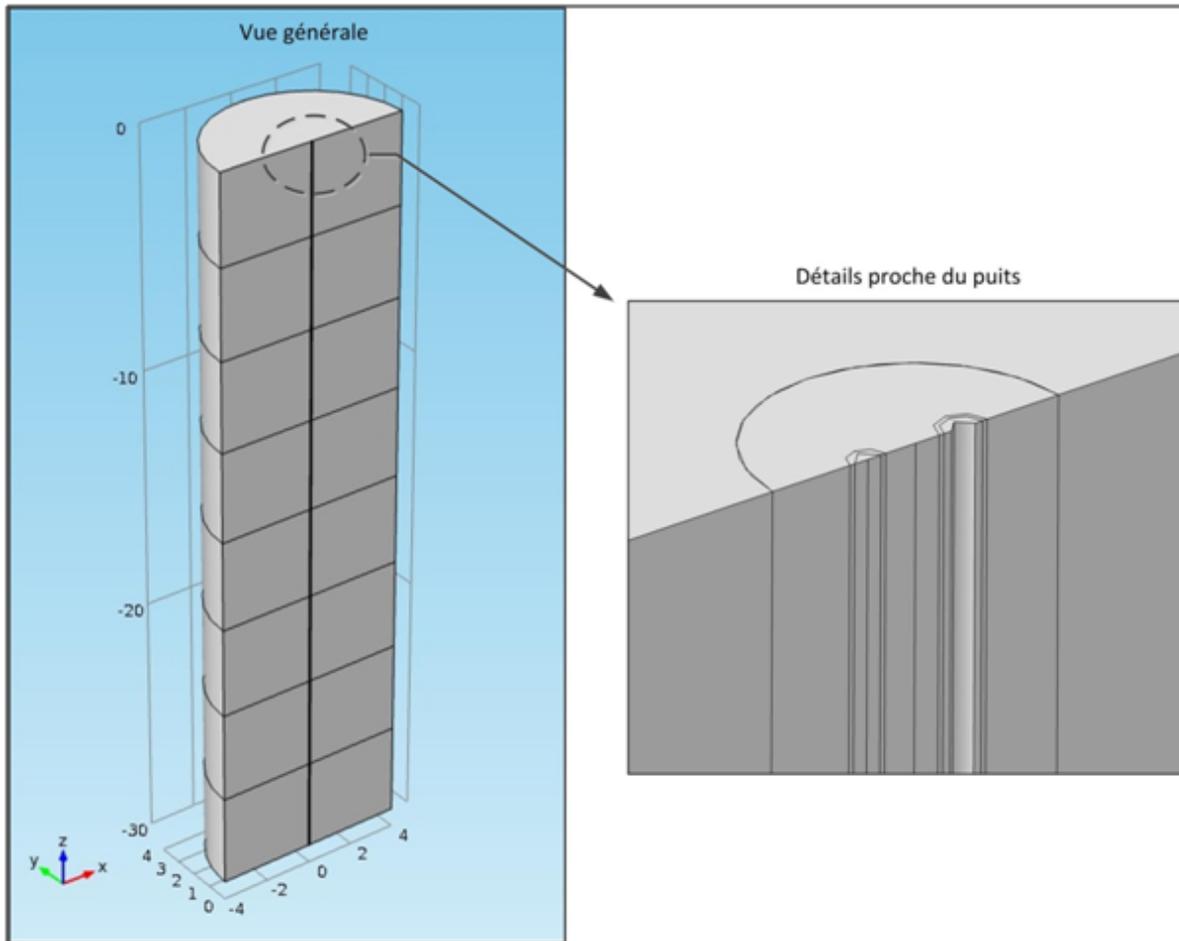


Figure 4.3 Modelé numérique 3D.

Le transfert de chaleur transitoire par conduction est décrit par l'équation de Fourier :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \Delta T \quad (4-1)$$

Pour le problème schématisé sur la Figure 4.1, l'Équation 4-1 a été résolue dans chaque domaine (sol, coulis tubes et fluide) avec l'état initial :

$$T(r, z, 0) = T_0 \quad (4-2)$$

L'état de continuité de la température et du flux thermique à l'interface entre les différents domaines, complète les données du problème.

La géométrie entière a été discrétisée au moyen de 52304 éléments de prisme obtenus en discrétisant d'abord la section radiale du domaine avec les éléments triangulaires, et en répétant ensuite la maille le long de la direction axiale, suivant les indications de la Figure 4.4.

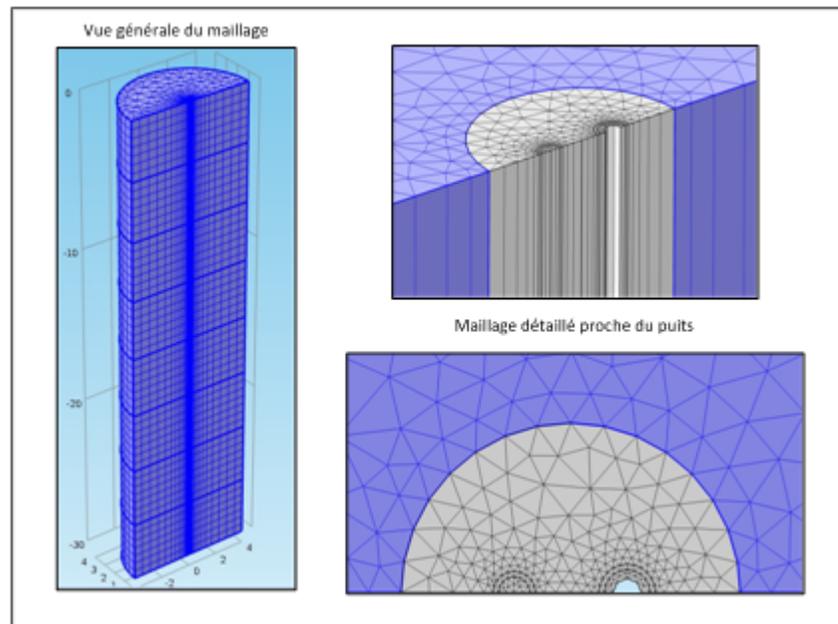


Figure 4.4 Maillage du modèle numérique 3D.

Le réseau de maillage du modèle numérique est de telles sortes que l'espacement du réseau augmente graduellement dans la direction radiale avec l'augmentation du rayon. Cette disposition permet un maillage fin dans le secteur immédiat du forage et un maillage brut dans le secteur entourant le forage.

Le maillage adopté s'est avéré suffisant pour atteindre la convergence des résultats, bien que pour des raisons de temps l'analyse de sensibilité du maillage n'a pas été traitée dans ce travail.

Le modèle emploie un intervalle de temps implicite de quinze minutes. Ce pas de temps est choisi pour être identique que l'intervalle de mesure dans le système d'acquisition de données. On utilise aussi les données de puissance enregistrées comme valeurs pour l'injection de chaleur.

### 4.3 La méthodologie de l'estimation de la conductivité thermique du sous-sol

Une procédure générale appropriée pour estimer des paramètres inconnus a été utilisée, par la comparaison entre les résultats expérimentaux et le modèle numérique correspondant basé sur la minimisation des moindres carrés.

Si on note  $T_{mes}(t)$  (la température mesurée au temps  $t$ ) les données de la température mesurées à chaque section du sous-sol et avec  $T_{num}(t)$  la température qui correspond à l'estimation obtenue à partir de la solution du problème direct en employant comme injection de chaleur les données de puissance enregistrée afin d'évaluer la capacité et la conductivité thermique du sous-sol.

Le problème de l'évaluation de la conductivité thermique du sous-sol est résolu en minimisant la fonction erreur suivante :

$$Erreur = \sum_{n=n_h}^N (T_{mes} - T_{num})^2 \quad (4-3)$$

La Figure 4.5 compare la température moyenne du fluide obtenue par la résolution du modèle numérique T5\_V2\_NUM après minimisation de l'erreur à la température enregistrée au niveau du thermocouple T5\_V2\_MES durant la période de restitution thermique.

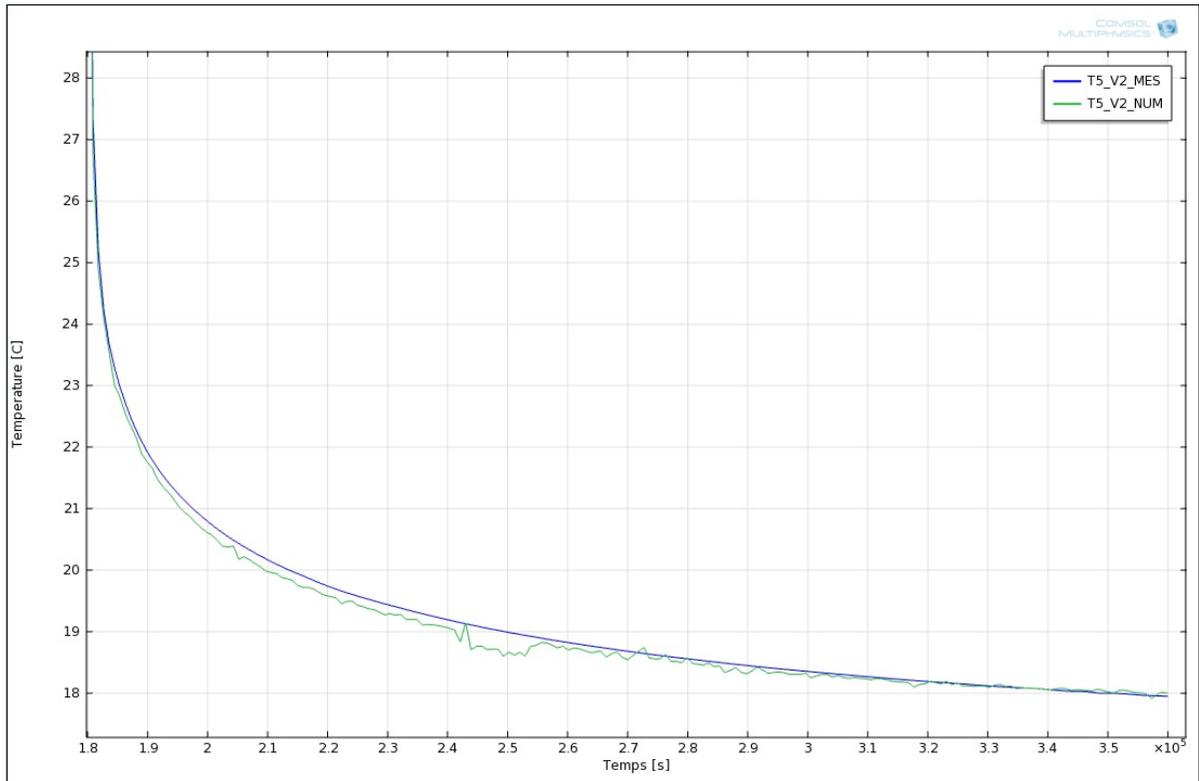


Figure 4.5 Température moyenne du fluide : modèle numérique et données enregistrées au niveau du thermocouple T5\_V2.

La température moyenne du fluide obtenue par la résolution du modèle numérique et tracée dans la Figure 4.6 en fonction de  $\ln\left(\frac{t}{t-t_h}\right)$  pour la période de restitution thermique, une allure linéaire est obtenue comme le prévoit le modèle de la ligne source, ce qui permet en plus d'appliquer la méthode de la pente.

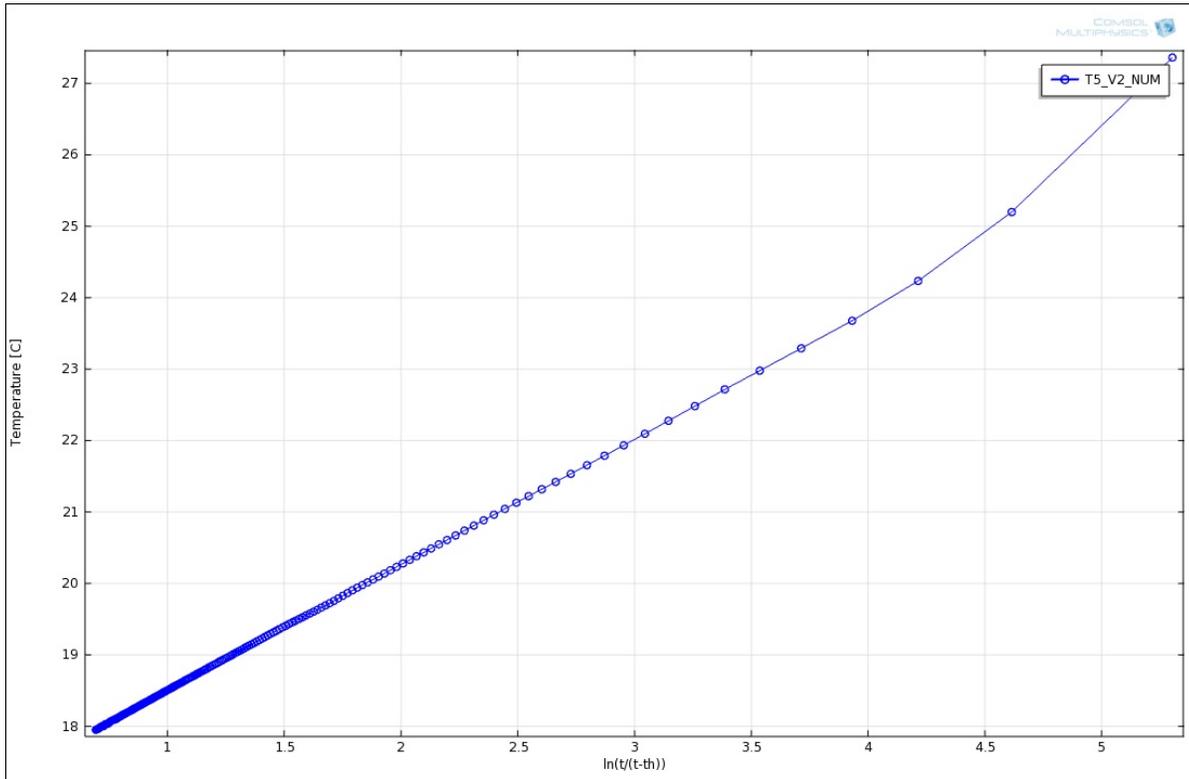


Figure 4.6 Température moyenne du fluide du modèle numérique en fonction de  $\ln(t/t_{th})$ .

La distribution de la température le long du puits confirme le fait que l'injection de chaleur qui se fait dans un seul tuyau du tube en U n'affecte en rien la température du fluide après une injection de chaleurs assez longues. La distribution thermique de la température du puits au début de la période de restitution après une période de chauffage de 50h est représentée sur la Figure 4.7.

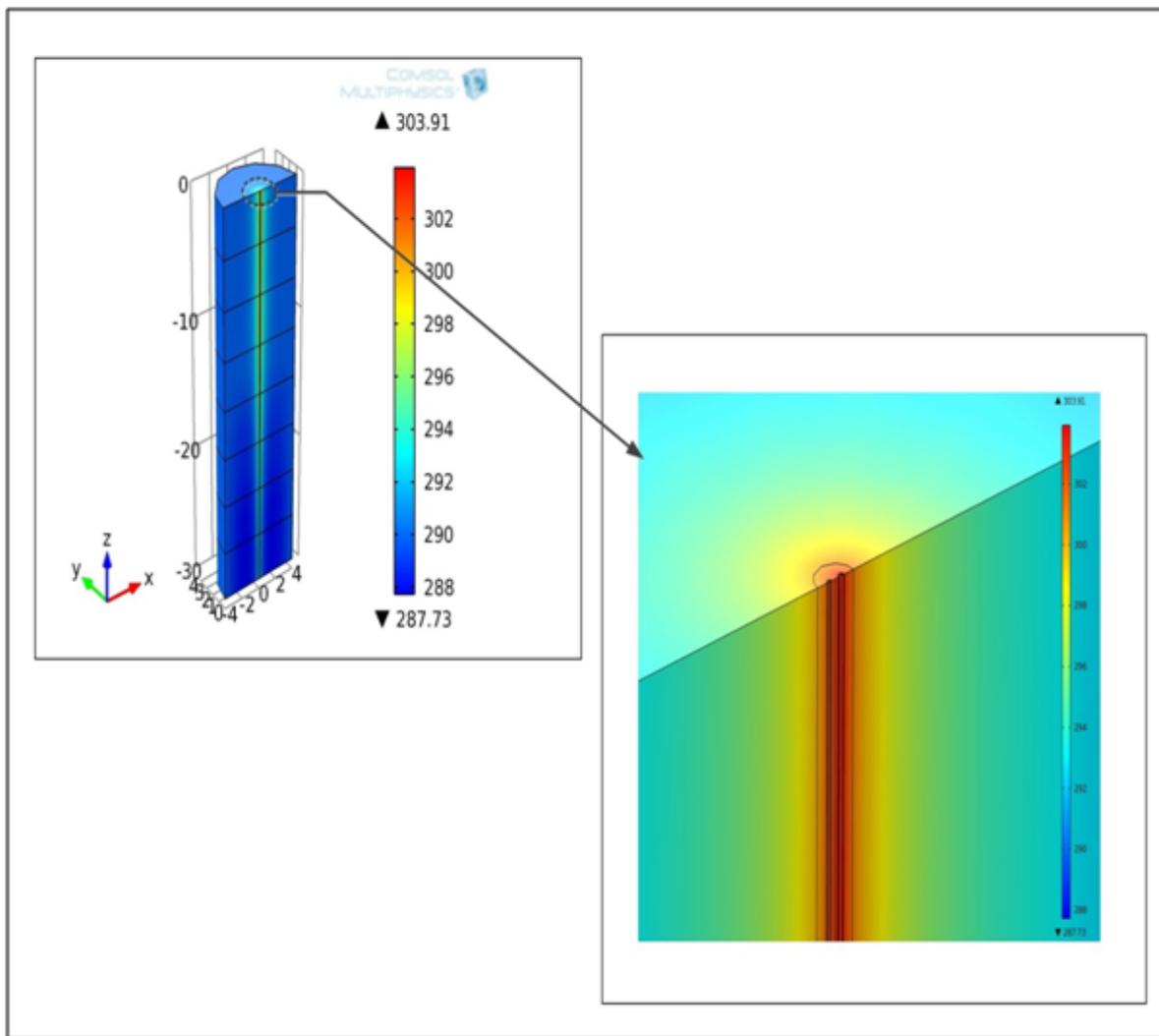


Figure 4.7 Distribution thermique de la température du puits après 50h d'injection de chaleur.



## CHAPITRE 5

### RESULTATS ET DISCUSSION

#### 5.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats des mesures expérimentales ainsi que les solutions analytiques et numériques sont exposés.

Pour déterminer la conductivité thermique durant la période de restitution thermique, le modèle de la ligne source est facilement mis en application. Comme discuté dans le chapitre 3, la méthode de la pente est utilisée pour estimer la conductivité thermique du sous-sol à partir de la pente de la droite de la température mesurée en fonction du  $\ln\left(\frac{t}{t-t_h}\right)$  et qui sera noté dans cette étude (LS1), et aussi sur les solutions analytiques de la ligne source (LS2) de la source cylindrique (CS) et sur la solution numérique (NUM).

En parallèle la méthode de superposition des courbes sera aussi appliquée sur les solutions analytiques et numériques en les approximant au profil de température mesuré ( $T_{mes}$ ) en variant la conductivité thermique du sous-sol pour chaque modèle.

Un des problèmes apparents pour estimer la conductivité thermique du sous-sol avec la méthode la pente, est qu'elle est très sensible aux fluctuations de la température qui peuvent parfois se produire pendant un essai expérimental. Ceci est démontré sur la Figure 5.1.

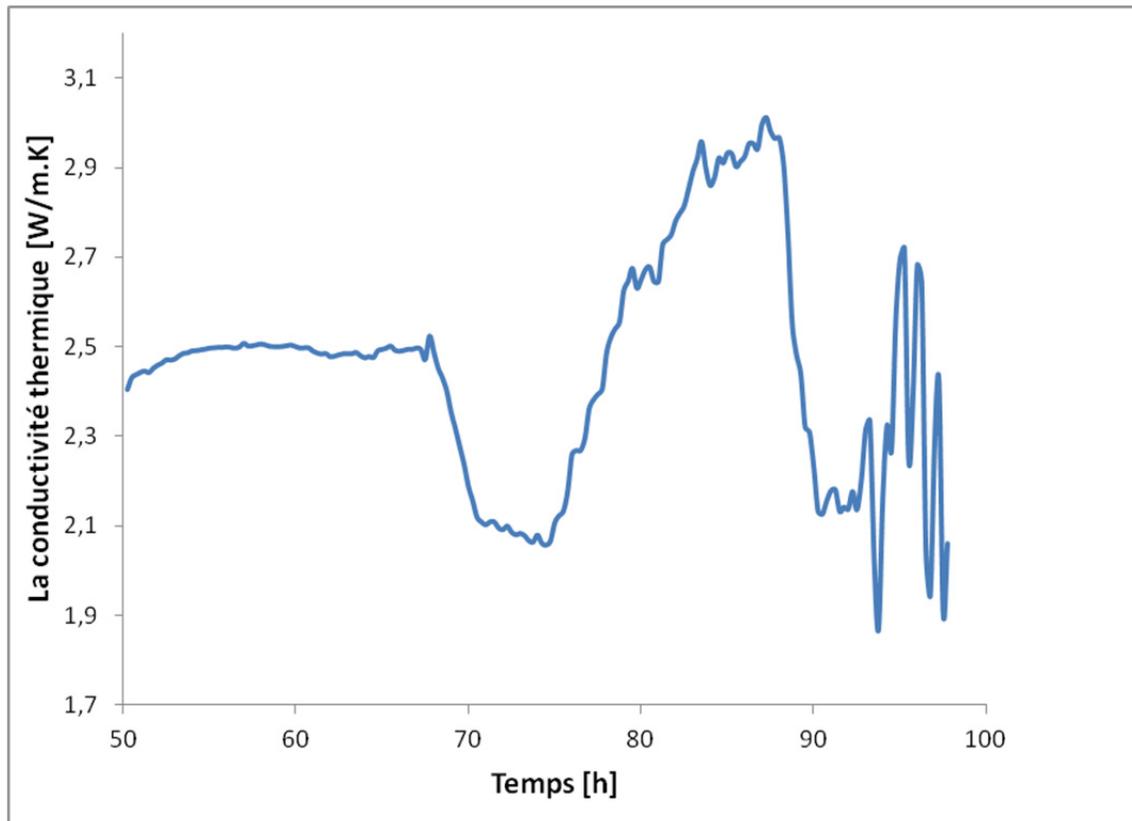


Figure 5.1 Sensibilité de la conductivité thermique à des petites perturbations.  
Test 50h Section T5\_V3.

La conductivité thermique a été systématiquement calculée pour toute la période de restitution thermique. Ainsi, la valeur de la conductivité thermique à 50 heures sur la Figure 5.1 est calculée avec les données expérimentales à partir de 50 heures jusqu'à la fin du test (100 heures) et la valeur à 60 heures est déterminée avec les données expérimentales de 60 à 100 heures. Selon où on a choisi de déterminer la pente de la ligne basée sur l'intervalle de temps, les différentes conductivités thermiques résultent. En fait, les valeurs du  $k_s$  Oscillent.

Ce n'était pas le seul ensemble de données qui a montré ces caractéristiques; en fait, la plupart des ensembles de données montrent la même tendance. N'importe quelle perturbation mineure dans le système mène au même problème. De plus longs essais ont également montré le comportement oscillant. Chaque essai réalisé montre une certaine forme de conductivité changeante.

La Figure 5.2 montre la température moyenne du fluide durant la période de restitution thermique en fonction du  $\ln\left(\frac{t}{t-t_h}\right)$  pour un essai de 50 heures. Les données représentées sont susceptibles d'être interprétées de plusieurs manières différentes, selon où les pentes sont prises. Les valeurs de la conductivité thermique calculée varient entre 2,3 W/m.K et 3,19 W/m.K pour les différentes pentes montrées. Les conductivités résultantes des différentes pentes sont récapitulées.

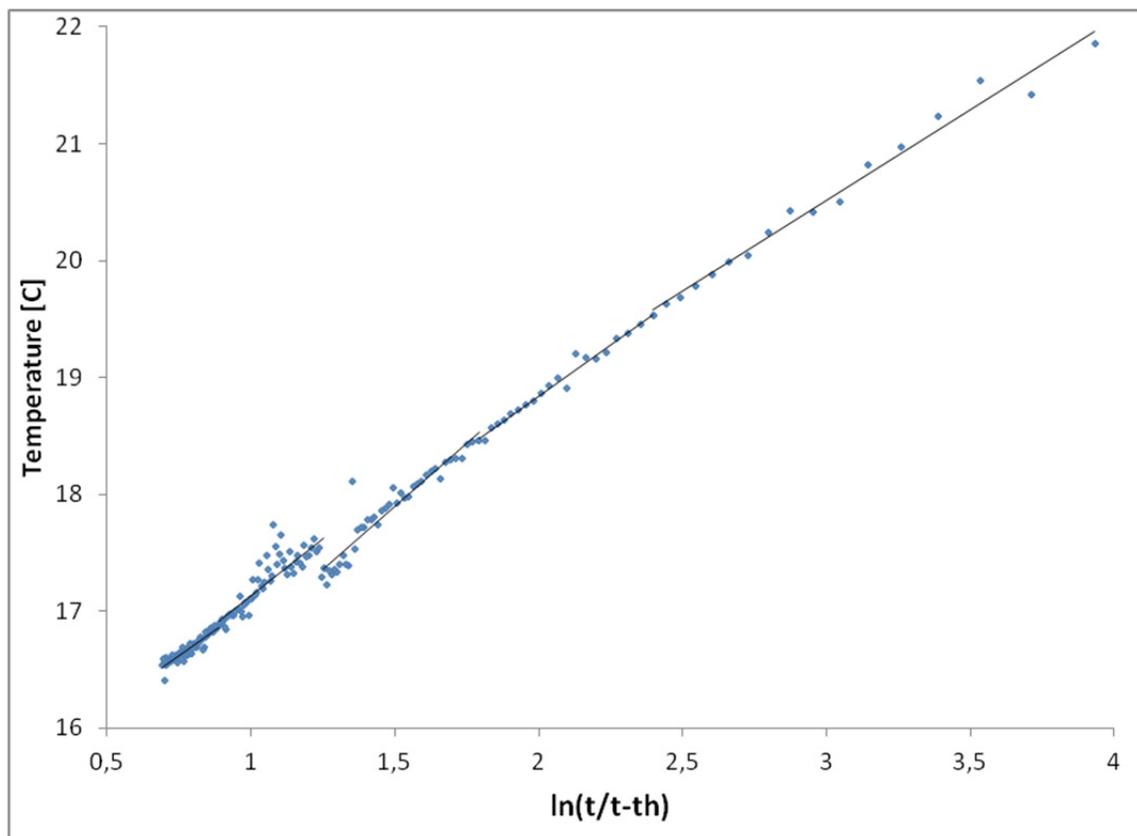


Figure 5.2 Essai expérimental de sensibilité de la pente aux perturbations.  
Test 50h Section T5\_L7.

On montre un autre exemple du large éventail des prévisions possibles avec un test plus long. Les données sont représentées sur la Figure 5.3. Encore, selon où les pentes sont prises (intervalle de temps) la conductivité thermique calculée évalue entre 2,62 W/m.K et 3,02 W/m.K et sont montrés dans le Tableau 5.1.

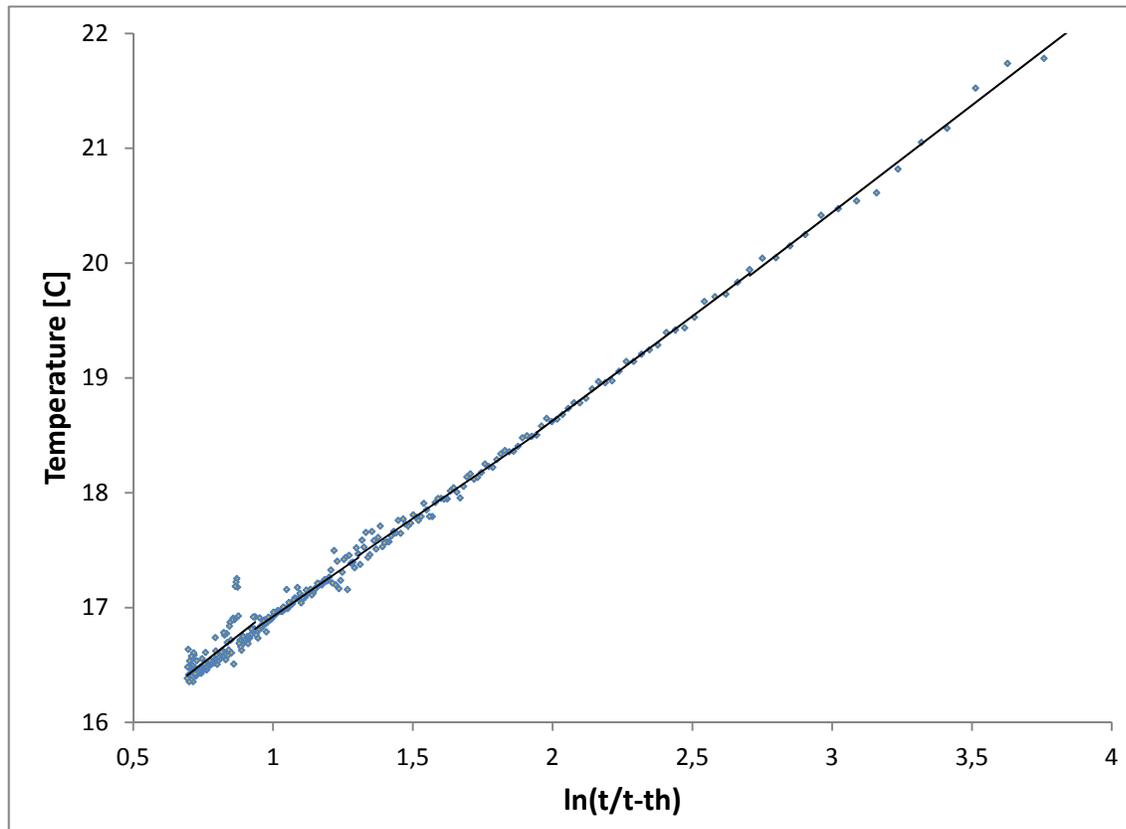


Figure 5.3 Essai expérimental de sensibilité de la pente aux perturbations.  
Test 74h Section T5\_L7.

Tableau 5.1 Évaluation de la conductivité thermique pour Test de 50h et 74h  
Section T5\_L7.

Période (h)	Pente	Conductivité thermique (W/mK)
<b>Test 50h</b>		
51-55	1,553	3,19
55-60	1,758	2,83
60-70	2,154	2,30
70-85	1,958	2,54
85-100	1,751	2,85
<b>Test 74h</b>		
74-78	1,866	2,66
78-85	1,817	2,75
85-100	1,662	3,02
100-120	1,679	2,99
120-148	1,907	2,62

Il est difficile de faire n'importe quelle comparaison entre les deux essais. Ils devraient rapporter la même conductivité thermique au sol parce que la composition du sol est identique, pourtant ni l'un ni l'autre ne donne des résultats similaires. Cette tendance se manifeste dans presque chaque ensemble de données expérimentales. Ceci nous a menés à envisager des approches analytique et numérique pour analyser les essais in situ.

## **5.2 Vue d'ensemble des résultats et méthodes d'évaluation de la conductivité thermique**

Premièrement, dans la partie 5.2.1, les résultats des données enregistrées pour les deux cas d'injection de chaleur constante sont détaillés pour une seule section. Une première figure montre une représentation générale de l'évolution de la température en fonction du temps pour une injection de chaleur de 63W/m pour une durée de 50H et de 74H dans la section T5\_V3. Les données seront traitées de la manière suivante. On commence par présenter dans les Figures 5.4 et 5.5 les profils de température pour les deux durées de test. La prochaine Figure 5.6 et la Figure 5.7 présentent la méthode de superposition des courbes avec le profil de la température enregistré et qui sera notée ( $T_{mes}$ ) et celui calculé par la méthode de la ligne source noté (LS2) et de la source cylindrique (CS) ainsi que la méthode numérique (NUM) pour la période de restitution thermique pour le test de 50H et 74H respectivement, les Figures 5.8 et 5.9 qui suivent, montrent la valeur moyenne des différences entre la température calculée et celle mesurée et l'écart type pour chaque méthode utilisée. Pour finir avec une estimation de la conductivité thermique avec la méthode de la pente de plusieurs points de vue pour chaque méthode dans les Figures 5.11 à 5.21.

Dans la deuxième partie 5.2.2 seront présentés les résultats du test avec une injection de chaleur de 63W/m avec une interruption. La Figure 5.22 montre une représentation générale de l'évolution de la température en fonction du temps pour une injection de chaleur d'une durée de 100H, mais avec une coupure à partir de la 41H d'une durée de 8H dans la section T5\_V3. Les données seront traitées de la manière suivante. Une présentation de la méthode de superposition des courbes dans les Figures 5.23 et 5.24 avec les profils de la température enregistrée ( $T_{mes}$ ) et calculée par la méthode de la ligne source (LS2) et de la source

cylindrique (CS) ainsi que la méthode numérique (NUM) pour la période de coupure et celle de la restitution thermique respectivement, la Figure 5.25 qui suit montre la valeur moyenne des différences entre la température calculée et celle mesurée et l'écart type pour chaque méthode utilisée. Pour finir avec une estimation de la conductivité thermique avec la méthode de la pente de plusieurs points de vue pour chaque méthode dans les Figures 5.27 à 5.31.

Ces résultats graphiques sont présentés dans chaque section de forage. Après l'évaluation de chaque section du forage, une distribution verticale de la conductivité thermique est calculée selon la valeur moyenne dans chaque section et présentée dans la Figure 5.32 un récapitulatif pour chaque cas de durée d'injection de chaleur.

### **5.2.1 Résultats pour une injection de chaleur constante**

Les figures 5.4 et 5.5 montrent la température à une profondeur précise (T5\_V3 18,75 m) pendant le TRT. Les deux phases principales de l'essai sont clairement distinctes. Dans un ordre chronologique, le premier point représente la température dans les conditions non perturbées du sous-sol à cette section. Après, durant 50 heures pour le premier test et 74 heures pour le deuxième, est représentée une injection de chaleur dans le forage pendant lequel le fluide est constamment chauffé. Les heures finales montrent comment la température tend à retourner aux conditions non perturbées après que la période d'injection de chaleur est finie. Ici, les gradients de température dans le forage sont très petits, ce qui permet de déterminer la conductivité thermique du sous-sol à différentes profondeurs le long du puits.

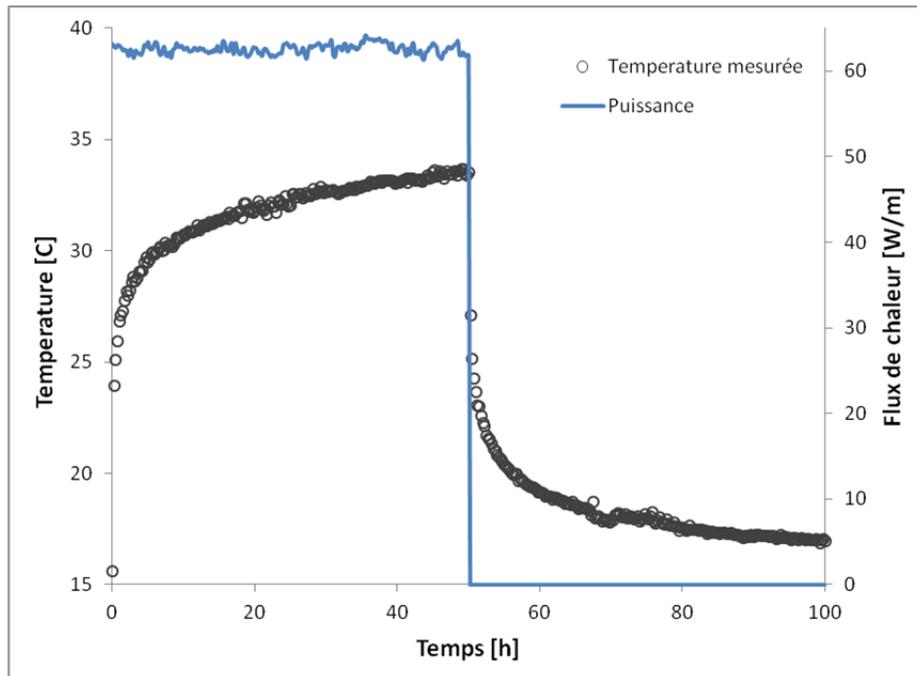


Figure 5.4 Température du fluide pour une injection de chaleur de 50 h Section T5\_V3.

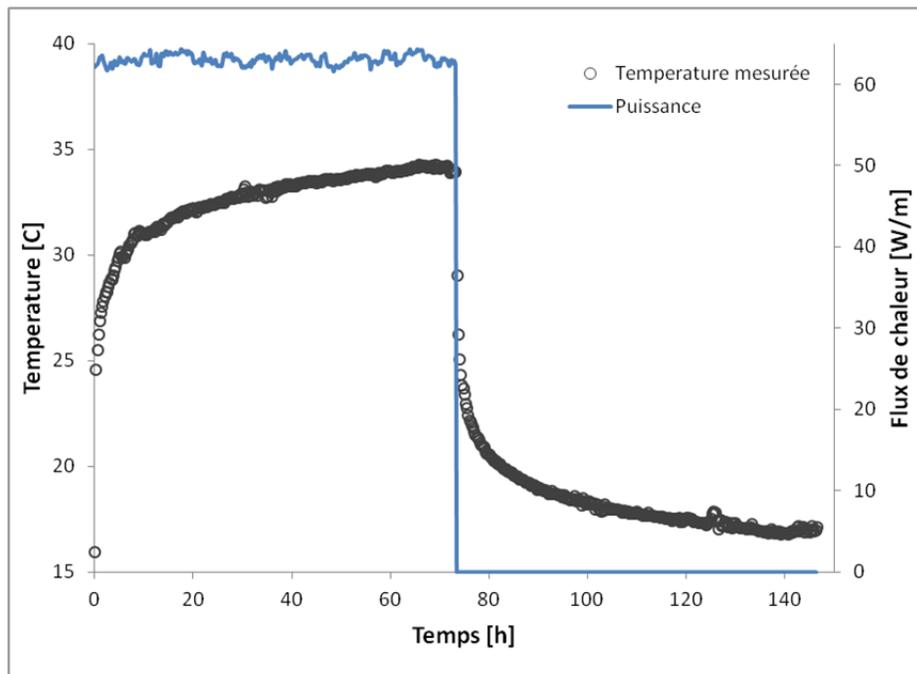


Figure 5.5 Température du fluide pour une injection de chaleur de 74 h Section T5\_V3.

Les Figures 5.6 et 5.7 présentent le profil de la température mesurée ( $T_{mes}$ ) pendant la 2e phase du TRT (phase de restitution thermique) et le profil des températures calculées avec une puissance d'injection de chaleur moyenne, avec la méthode de superposition des courbes pour les modèles utilisés, le modèle de la ligne source, le modèle de la source cylindrique, et le modèle numérique. On peut observer que le profil du modèle de (LS2) et celui du modèle (NUM) présentent une meilleure approximation durant toute la phase. En outre, la température décrite par le modèle de (LS2) est très proche du profil décrit par le modèle (NUM).

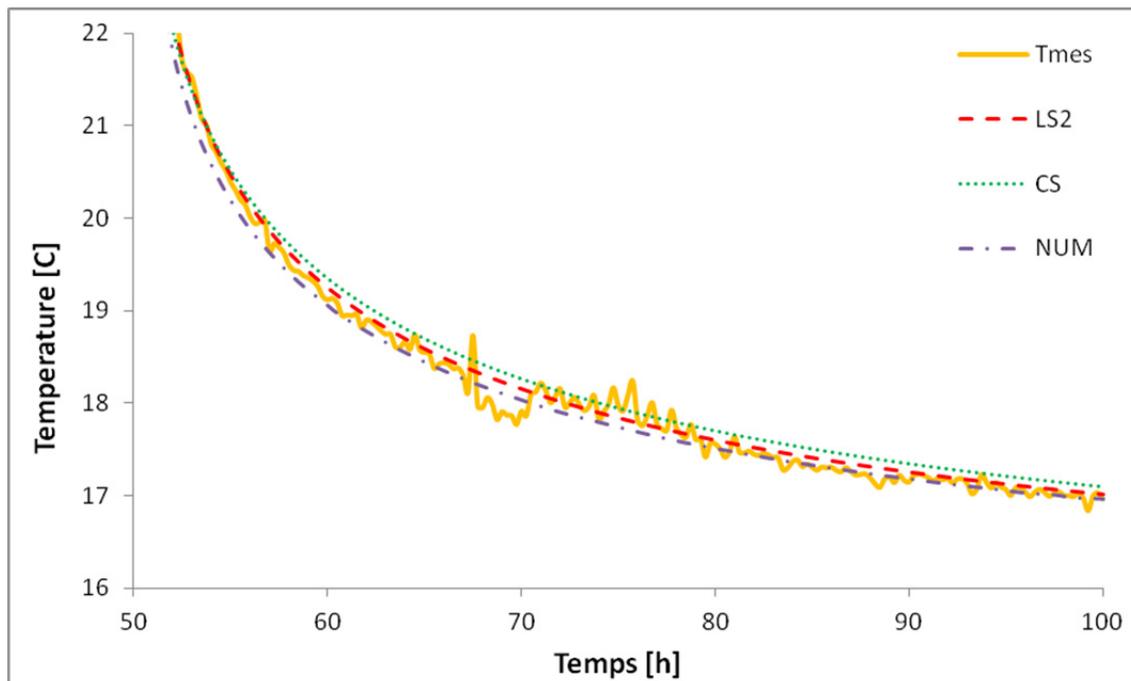


Figure 5.6 SectionT5\_V3 : Température du fluide mesurée et Températures calculées pour chaque méthode. Test 50h.

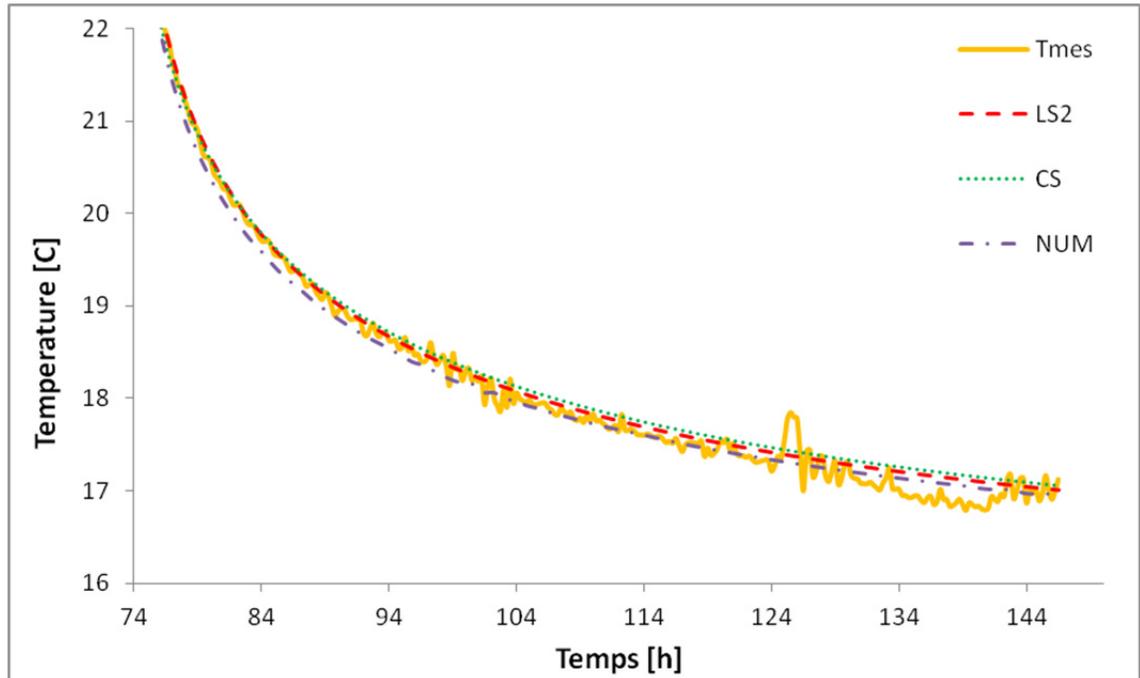


Figure 5.7 SectionT5\_V3 : Température du fluide mesurée et Températures calculées pour chaque méthode. Test 74h.

La Figure 5.8, reflète les différences entre la température du fluide calculée et la température mesurée pour chaque méthode, par la moyenne de  $(T_{\text{mesurée}} - T_{\text{calculée}})$  on remarque que la différence avec le modèle (CS) présente une valeur plus élevée que celle du modèle de (LS2 et NUM). Par rapport à l'écart type, le modèle (NUM) présente la plus petite valeur.

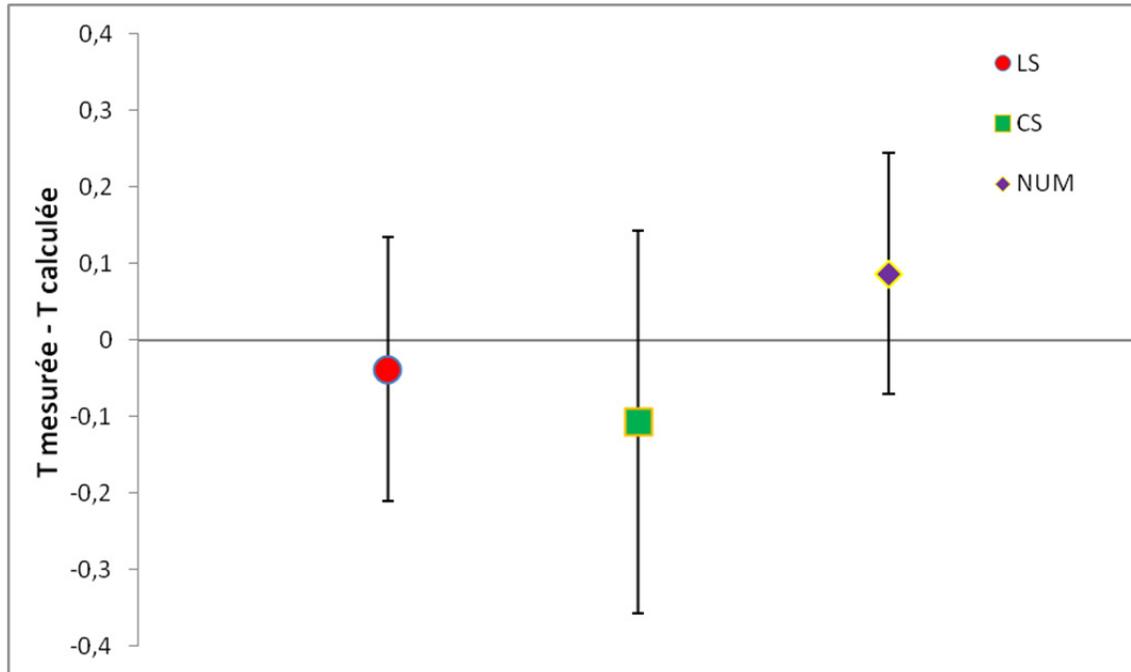


Figure 5.8 Différence entre la température du fluide mesurée et la température calculée pour chaque méthode. Test 50h Section T5\_V3.

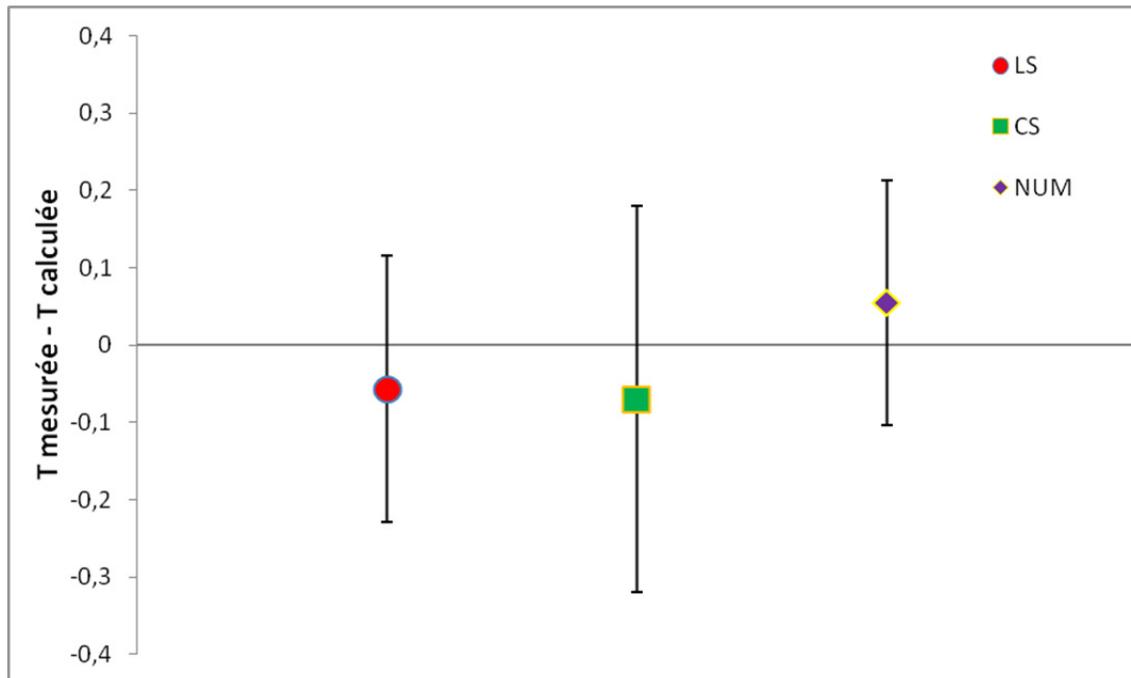


Figure 5.9 Différence entre la température du fluide mesurée et la température calculée pour chaque méthode. Test 74h Section T5\_V3.

Pour évaluer la conductivité thermique à partir des données de température avec la méthode de la pente, plusieurs approches sont possibles. Le Figures 5.10 et 5.11 présentent le résultat de la conductivité thermique pour chaque modèle utilisé, en fixant les derniers points des données et en faisant varier les premiers points avec une moyenne de 5 heures.

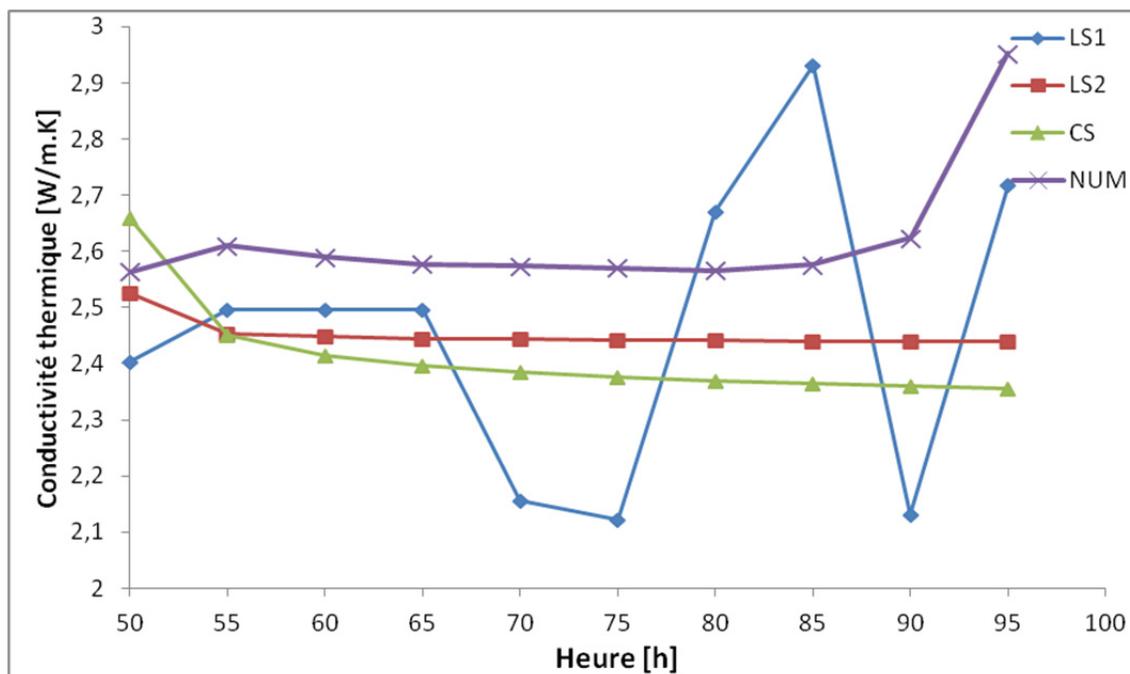


Figure 5.10 La conductivité thermique estimée avec les différentes méthodes. Le dernier point est fixé, le premier point varie. Test 50H.

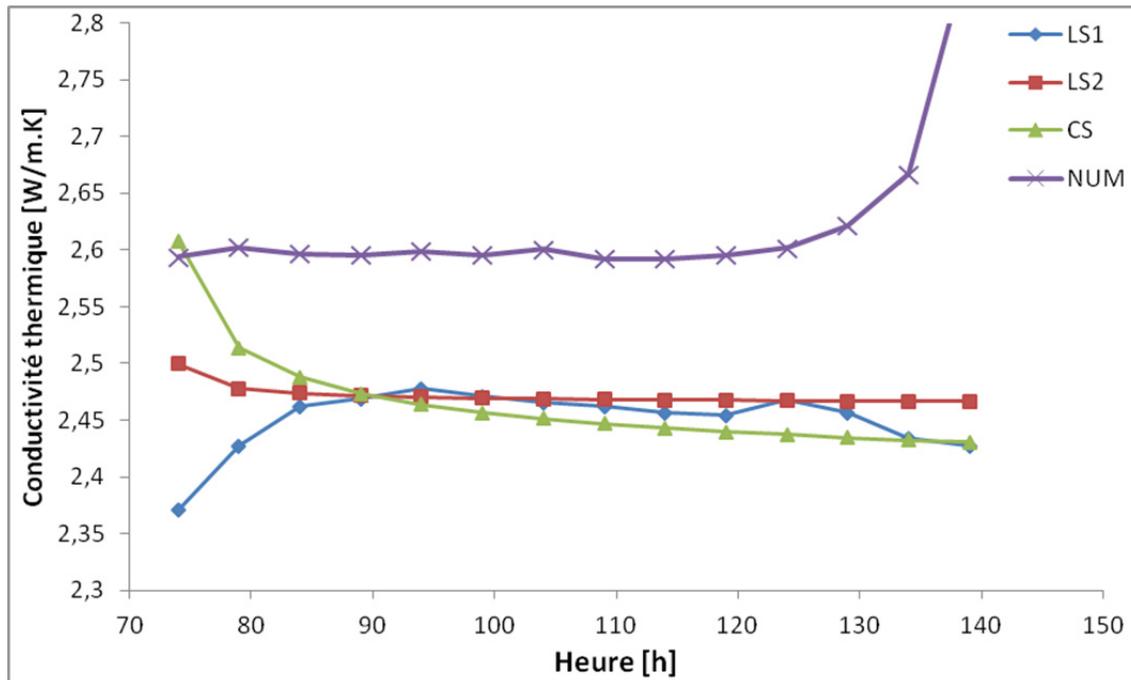


Figure 5.11 La conductivité thermique estimée avec les différentes méthodes. Le dernier point est fixé, le premier point varie. Test 74H.

Il est commun en pratique de négliger les données mesurées pendant un certain temps initial. Pour éviter la complexité de l'aspect transitoire du transfert chaleur dans le puits et pour utiliser les données enregistrées sur une période où les propriétés thermiques du sous-sol ont une influence relativement plus grande sur le test de réponse thermique.

Pour avoir une idée sur les données à exclure de l'étude durant une évaluation de la conductivité thermique sur la période de restitution on procède à une évaluation pour chaque méthode sur la section T5\_V3, en fixant le premier point à des heures précises qui sont mentionnées dans les Figures 5.12 pour (LS1), 5.13 pour (LS2), 5.14 pour (CS) et 5.15 pour (NUM), en faisant varier le dernier point avec une moyenne de 5 heures jusqu'à la fin des données pour le test de 50h et sur les Figures 5.16 pour (LS1), 5.17 pour (LS2), 5.18 pour (CS) et 5.19 pour (NUM) pour le test de 74h.

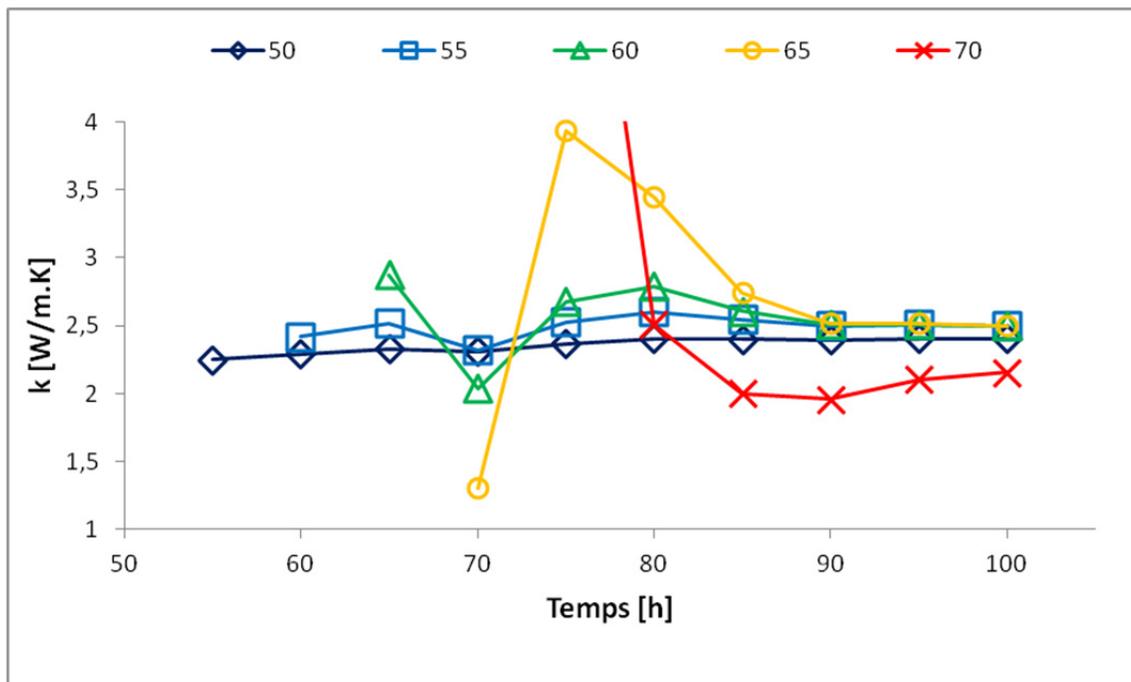


Figure 5.12 Estimation de la conductivité thermique par le modèle LS1  
Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 50H.

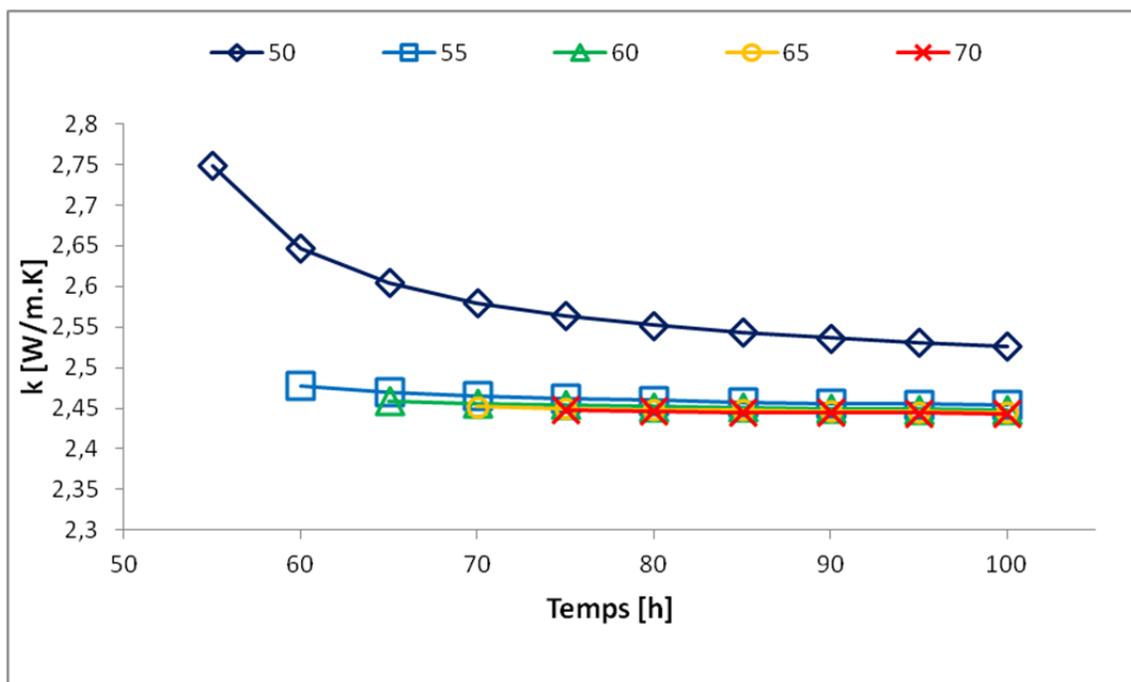


Figure 5.13 Estimation de la conductivité thermique par le modèle LS2  
Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 50H.

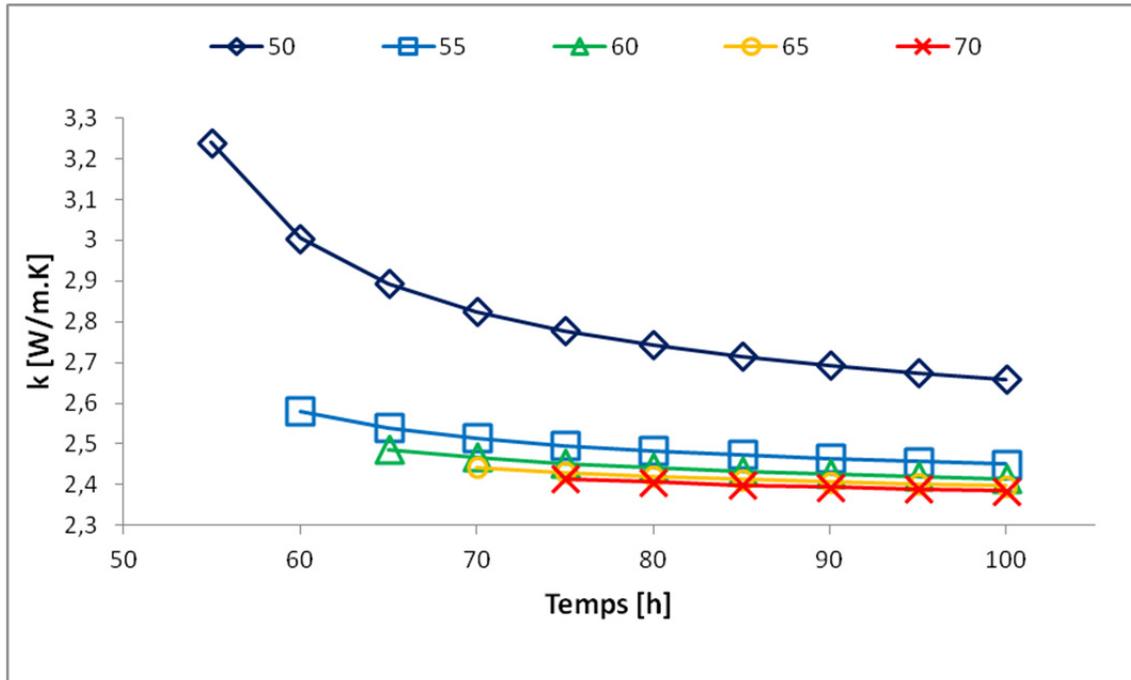


Figure 5.14 Estimation de la conductivité thermique par le modèle CS  
Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 50H.

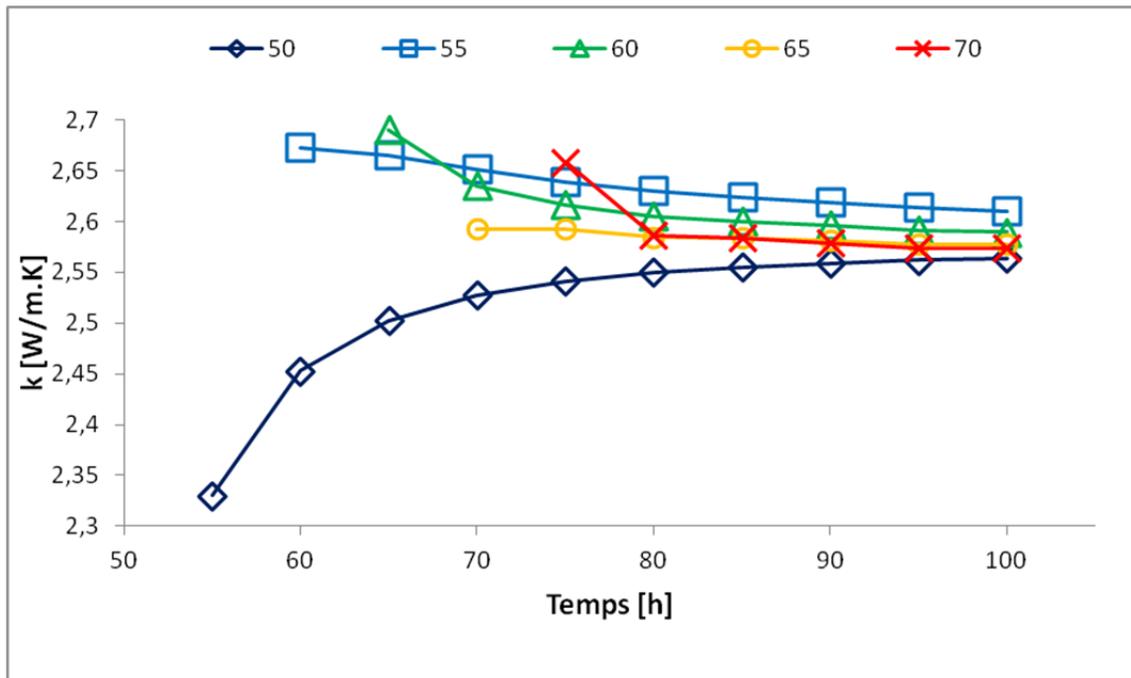


Figure 5.15 Estimation de la conductivité thermique par le modèle NUM  
Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 50H.

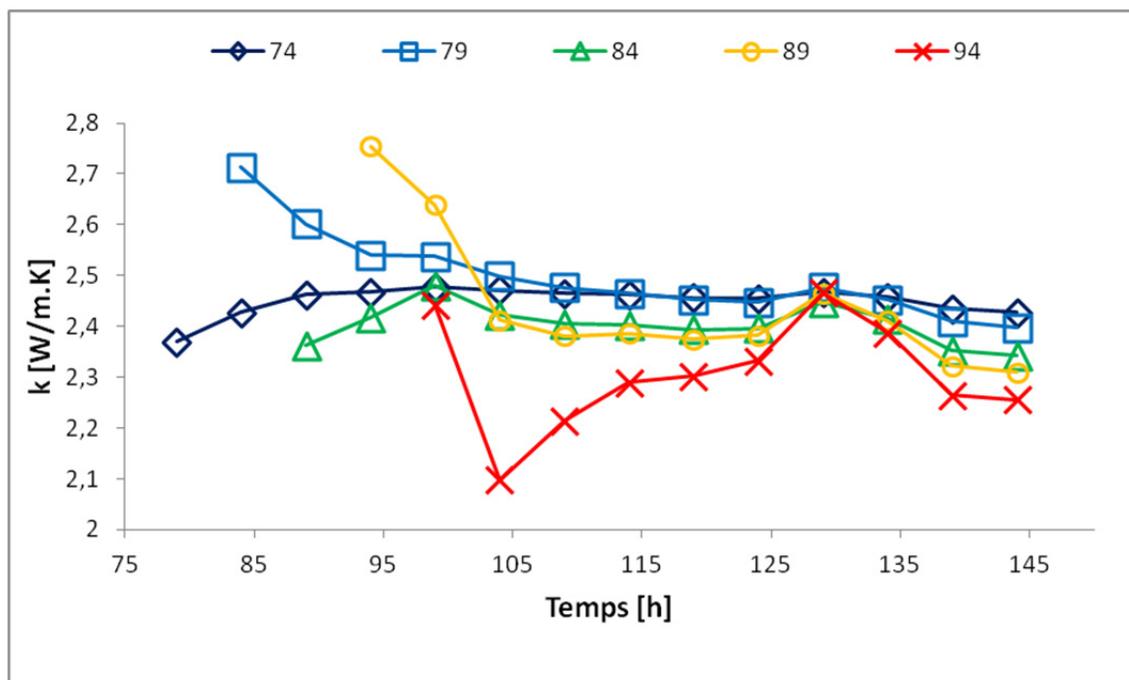


Figure 5.16 Estimation de la conductivité thermique par le modèle LS1  
Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 74H.

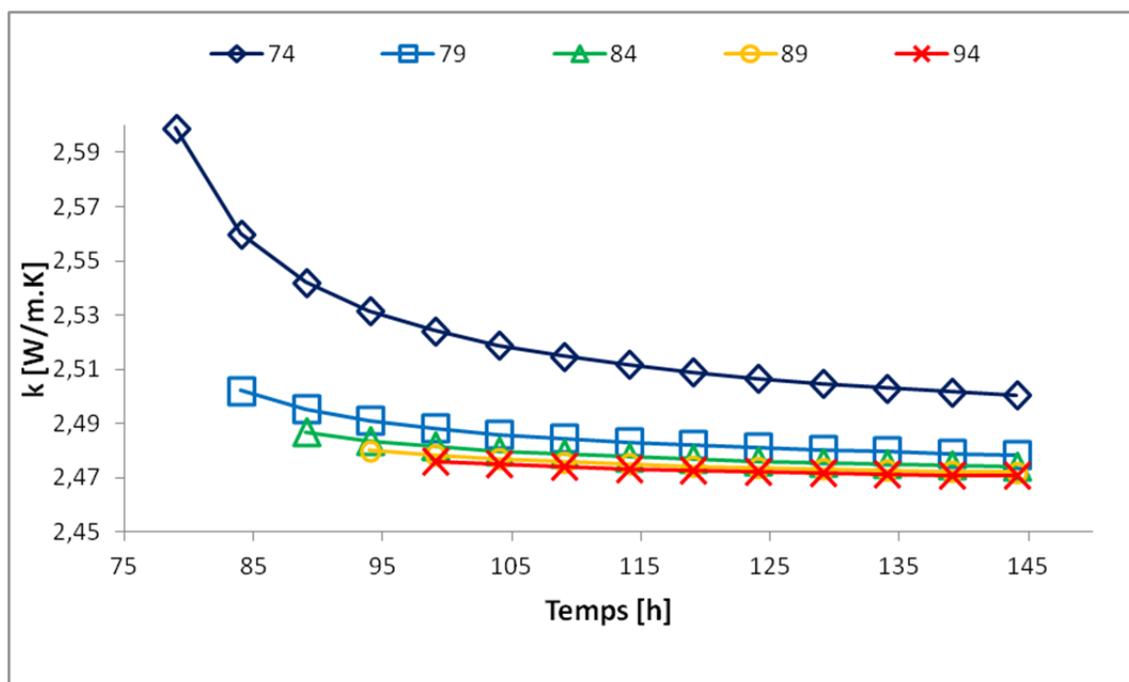


Figure 5.17 Estimation de la conductivité thermique par le modèle LS2  
Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 74H.

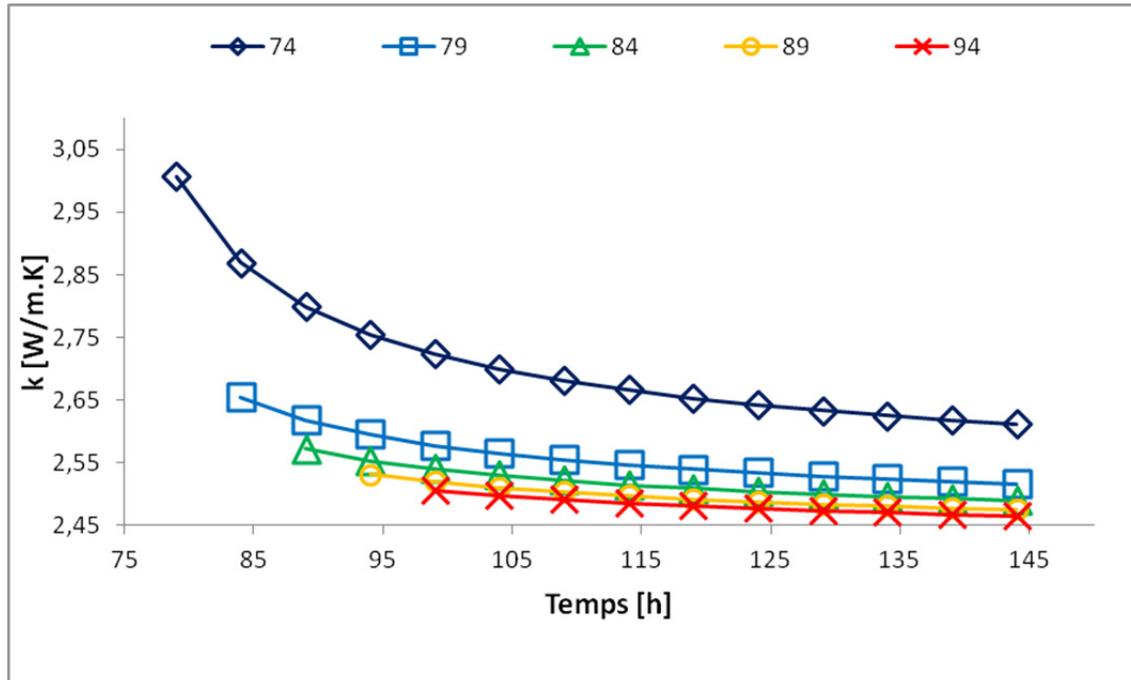


Figure 5.18 Estimation de la conductivité thermique par le modèle CS  
Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 74H.

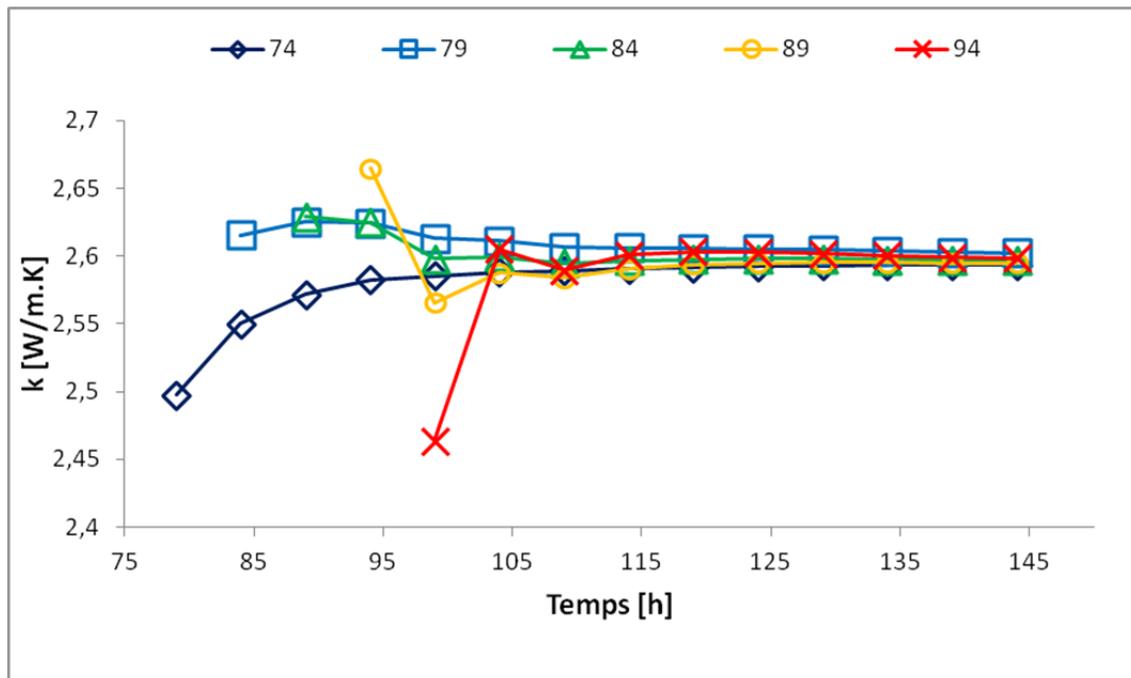


Figure 5.19 Estimation de la conductivité thermique par le modèle NUM  
Le premier point est fixé, le dernier point varie. Test 74H.

La conductivité thermique devient stable pour la série de données commençant à 55h et plus pour le test de 50H et de 79h et plus pour le test de 74H, et devient instable encore quand les séries de données expérimentales présentent des perturbations. La solution de la ligne source donne les résultats qui sont moins sensibles en incluant les premières données, tandis que le modèle numérique tend à avoir comme conséquence une évaluation inférieure et le modèle de la source cylindrique une évaluation plus élevée de la conductivité thermique quand les premières données sont incluses.

L'ensemble des modèles sont comparés sur les Figure 5.21 et 5.22. La conductivité thermique pour l'ensemble de données était déterminée pour la longueur croissante de l'intervalle de données. Le point de début est fixe à l'heure 55 ; c.-à-d. les données de mesure après l'arrêt de l'injection de chaleur. Le premier point dans la Figure 5.21 est l'évaluation pour l'intervalle de données entre l'heure 55 et l'heure 60. Le dernier point est l'évaluation pour l'intervalle de données entre l'heure 55 et l'heure 100 pour le test de 50H de chauffage.

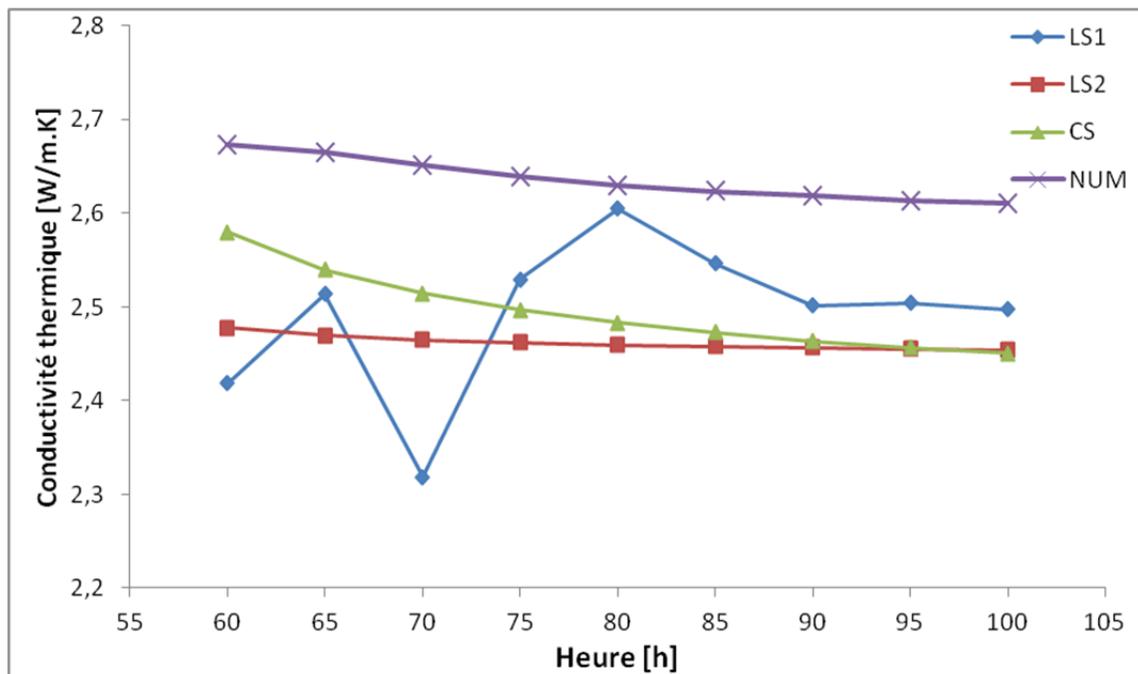


Figure 5.20 la conductivité thermique estimée avec les différentes méthodes. Le premier point est fixé, le dernier point varie avec les données enregistrées. Test 50h Section T5\_V3.

Le point de début est fixe à l'heure 79 ; c.-à-d. les données de mesure après l'arrêt de l'injection de chaleur. Le premier point dans la Figure 5.22 est l'évaluation pour l'intervalle de données entre l'heure 79 et l'heure 84. Le dernier point est l'évaluation pour l'intervalle de données entre l'heure 79 et l'heure 144 pour le test de 74H de chauffage.

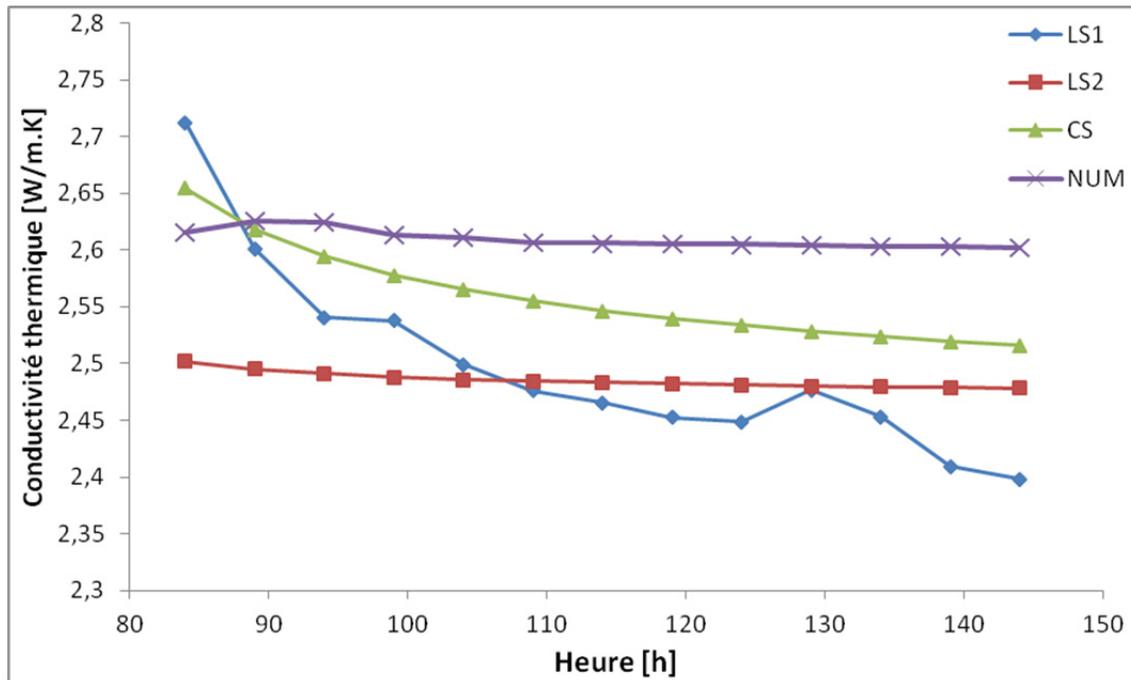


Figure 5.21 la conductivité thermique estimée avec les différentes méthodes. Le premier point est fixé, le dernier point varie avec les données enregistrées. Test 74h Section T5\_V3.

### 5.2.2 Résultats pour une injection de chaleur constante avec interruption

La Figure 5.23 montre la température à une profondeur précise (T5\_V3 18,75 m) pendant le TRT. Les phases d'essai avec interruption sont clairement distinctes. Dans un ordre chronologique, les premières heures représentent les températures durant la phase de l'injection de la chaleur. Après 41 heures, on remarque une interruption dans l'injection de la chaleur avec un flux de chaleur nul et une diminution de la température. Après 8 heures d'interruption, on reprend l'injection de chaleur qui est stoppée après 100 heures à partir du début du test. Les heures finales montrent comment la température dans une section tend à

retourner aux conditions calmes après que la période d'injection de chaleur est finie. Ici, les gradients de température dans le forage sont très petits, ce qui permet de déterminer la conductivité thermique du sous-sol à différentes profondeurs le long du puits.

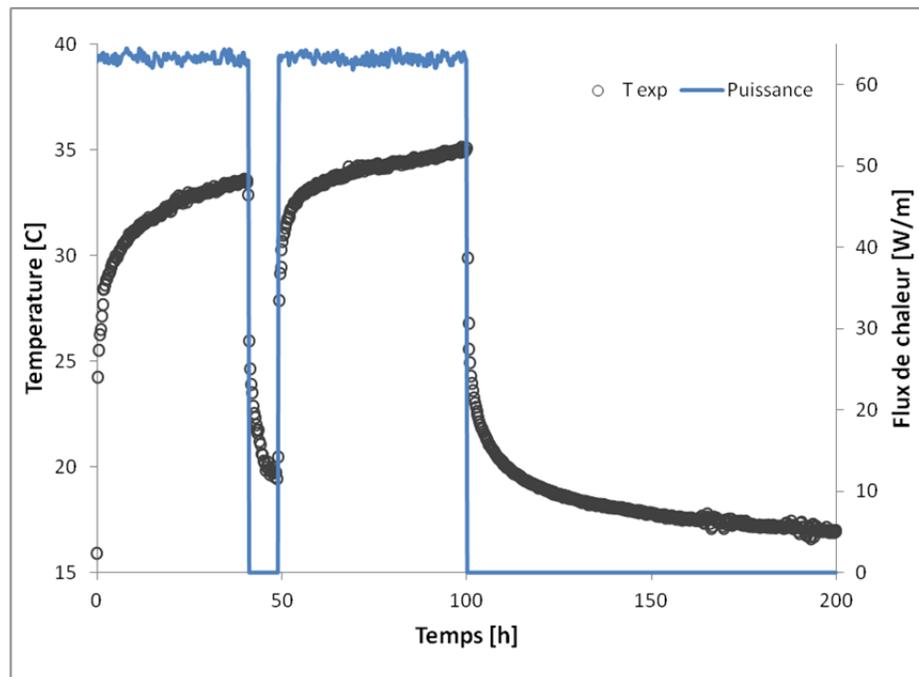


Figure 5.22 Température du fluide pour une injection de chaleur de 100h avec interruption. Section T5\_V3.

Les Figures 5.24 et 5.25 présentent le profil de la température mesurée ( $T_{mes}$ ) pendant la 2e et 4e phase du TRT (phase de coupure et de restitution thermique) et le profil des températures calculées avec une puissance moyenne d'injection de chaleur, avec la méthode de superposition des courbes, pour les modèles utilisés, le modèle de la ligne source (LS1), le modèle de la source cylindrique (CS), et le modèle numérique (NUM). On peut observer que le profil du modèle de (LS2) et celui du modèle (NUM) présentent une meilleure approximation durant toute la phase. En outre, la température décrite par le modèle de (LS2) serait très proche du profil décrit par le modèle (NUM) durant la période de restitution, alors que durant la période de coupure il se rapproche plus du modèle (CS).

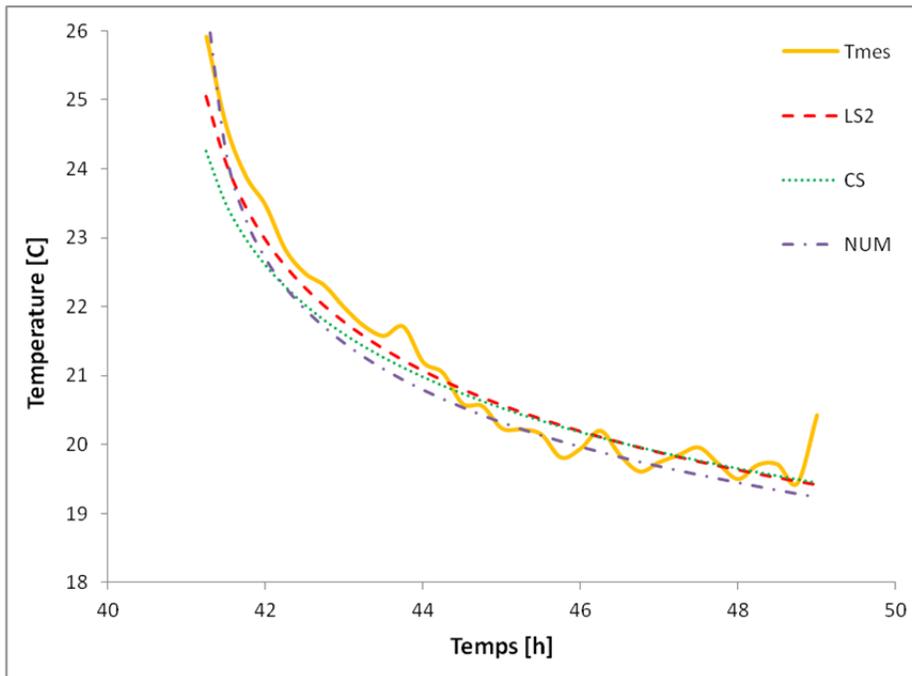


Figure 5.23 SectionT5\_V3 : Température du fluide mesurée et Températures calculées pour chaque méthode. Période de coupure.

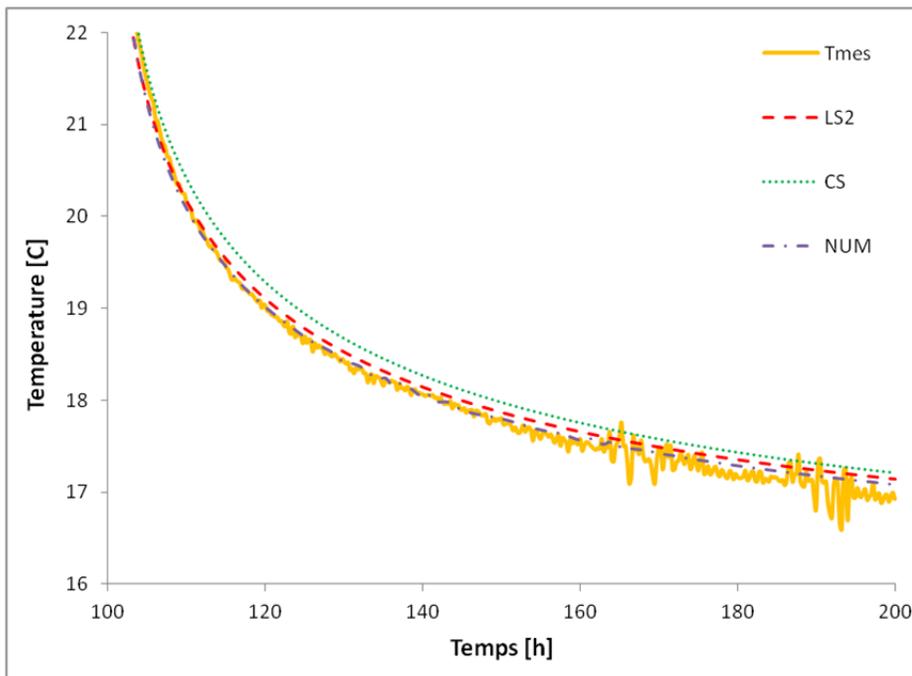


Figure 5.24 SectionT5\_V3 : Température du fluide mesurée et Températures calculées pour chaque méthode. Période de restitution.

La prochaine Figure 5.26, reflète les différences entre la température du fluide calculée et la température mesurée pour chaque méthode, par la moyenne de  $(T_{\text{mesurée}} - T_{\text{calculée}})$  on remarque que la différence avec le modèle (NUM) est presque nulle, tandis que le modèle (CS) présente une valeur plus élevée que celle du modèle de (LS2 et NUM). Par rapport à l'écart type, le modèle (NUM) présente la plus petite valeur.

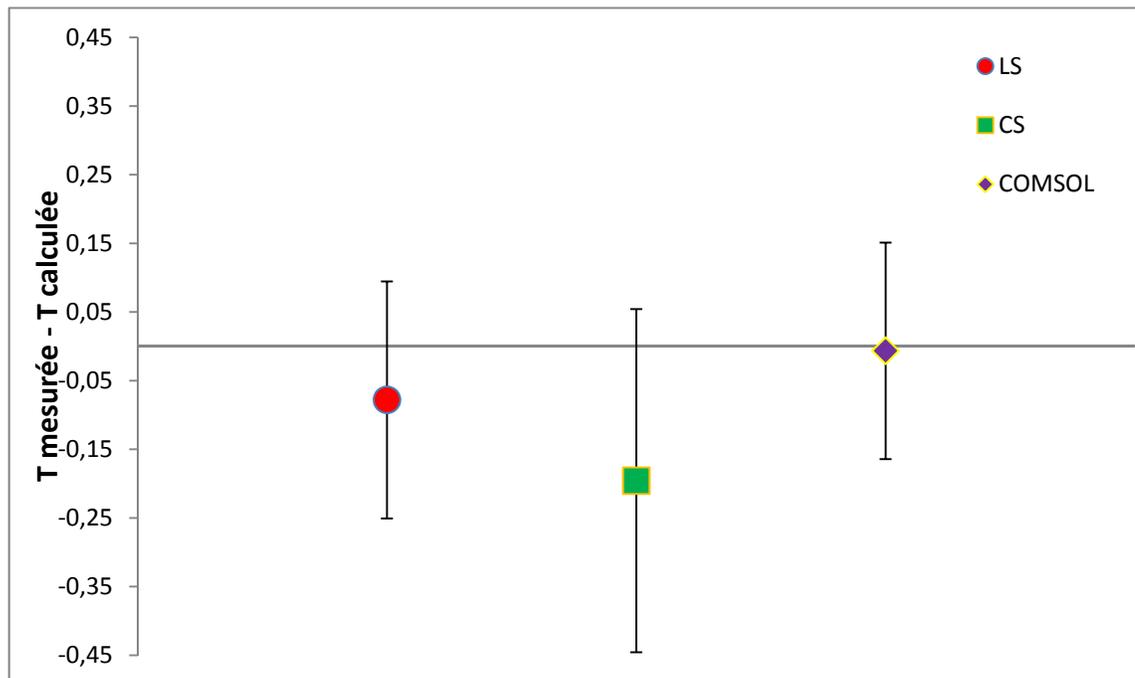


Figure 5.25 Différence entre la température du fluide mesurée et la température calculée pour chaque méthode. Test 100h Section T5\_V3.

Pour évaluer la conductivité thermique à partir des données de température avec la méthode de la pente, plusieurs approchent son possible. La Figure 5.27 présente le résultat de la conductivité thermique pour chaque modèle utilisé, en fixant les derniers points des données et en faisant varier les premiers points avec un intervalle de 5 heures.

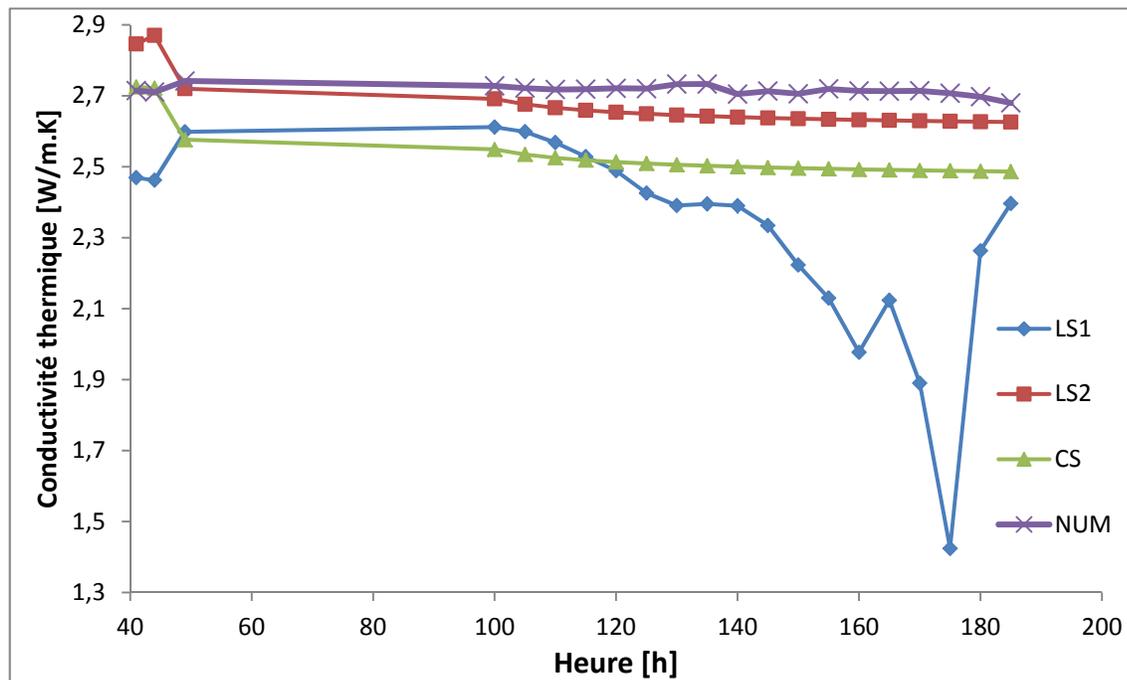


Figure 5.26 La conductivité thermique estimée avec les différentes méthodes.  
Le dernier point est fixé, le premier point varie.

Comme pour le test sans interruption il est commun de négliger les données mesurées pendant un certain temps initial. Pour éviter la complexité de l'aspect transitoire du transfert chaleur dans le puits et pour utiliser les données enregistrées sur une période où les propriétés thermiques du sous-sol ont une influence relativement plus grande sur le test de réponse thermique.

Pour avoir une idée sur les données à exclure de l'étude durant une évaluation de la conductivité thermique sur la période de restitution on procède à une évaluation pour chaque méthode en fixant le premier point à des heures précises qui sont mentionnés dans les Figures 5.27 pour (LS1), 5.28 pour (LS2), 5.29 pour (CS) et 5.30 pour (NUM), en faisant varier le dernier point avec un intervalle de 5 heures jusqu'à la fin des données.

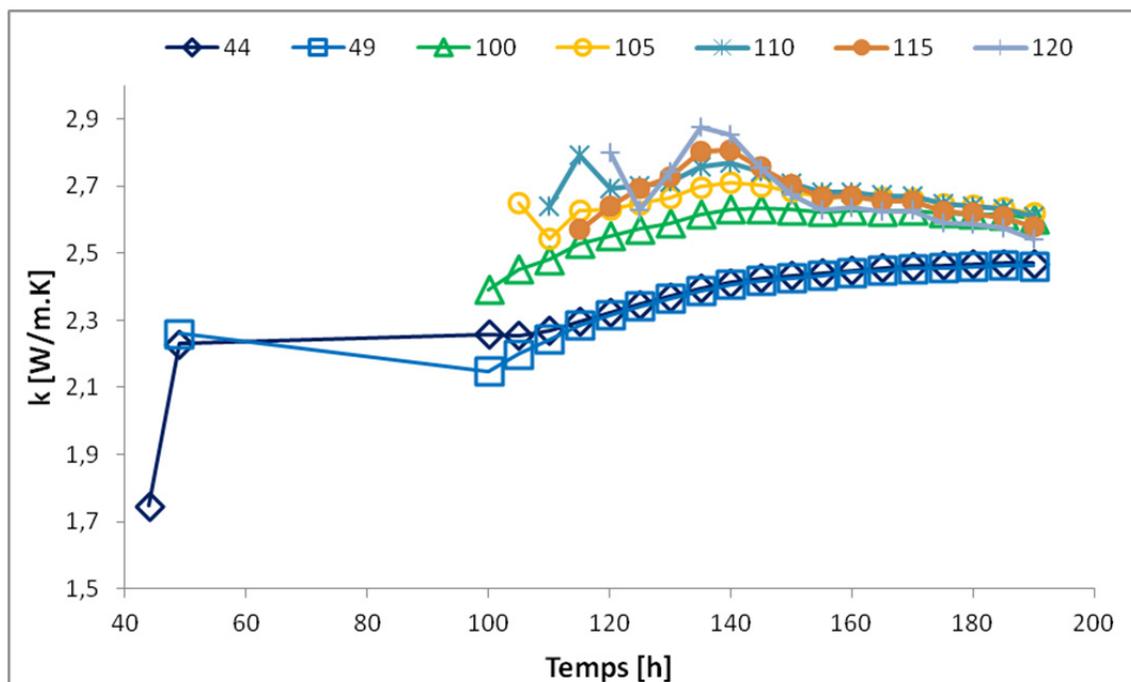


Figure 5.27 Estimation de la conductivité thermique par le modèle LS1 Le premier point est fixé aux heures précisées dans la légende, le dernier point varie. Test 100H.

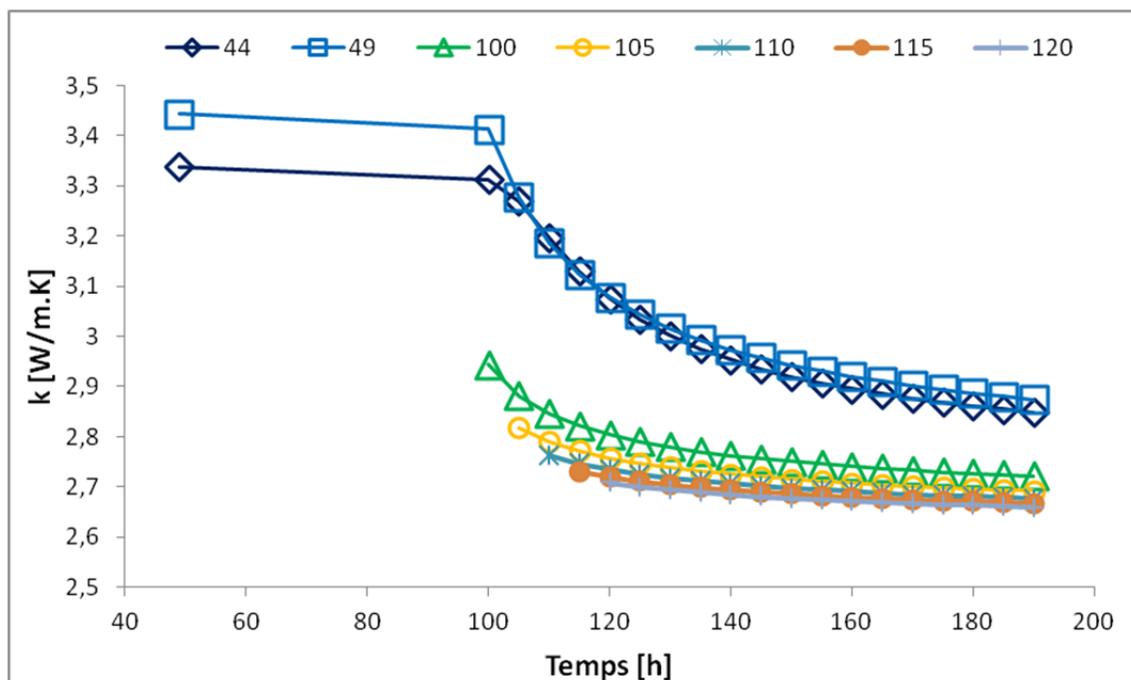


Figure 5.28 Estimation de la conductivité thermique par le modèle LS2 Le premier point est fixé aux heures précisées dans la légende, le dernier point varie. Test 100H.

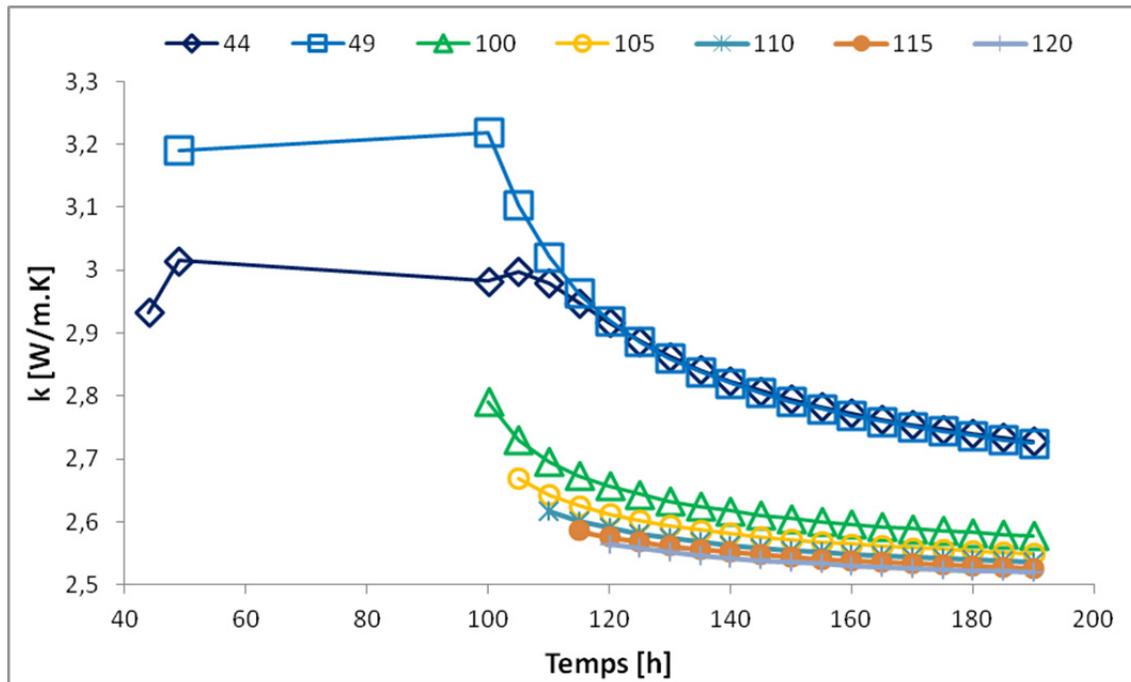


Figure 5.29 Estimation de la conductivité thermique par le modèle CS Le premier point est fixé aux heures précisées dans la légende, le dernier point varie. Test 100H.

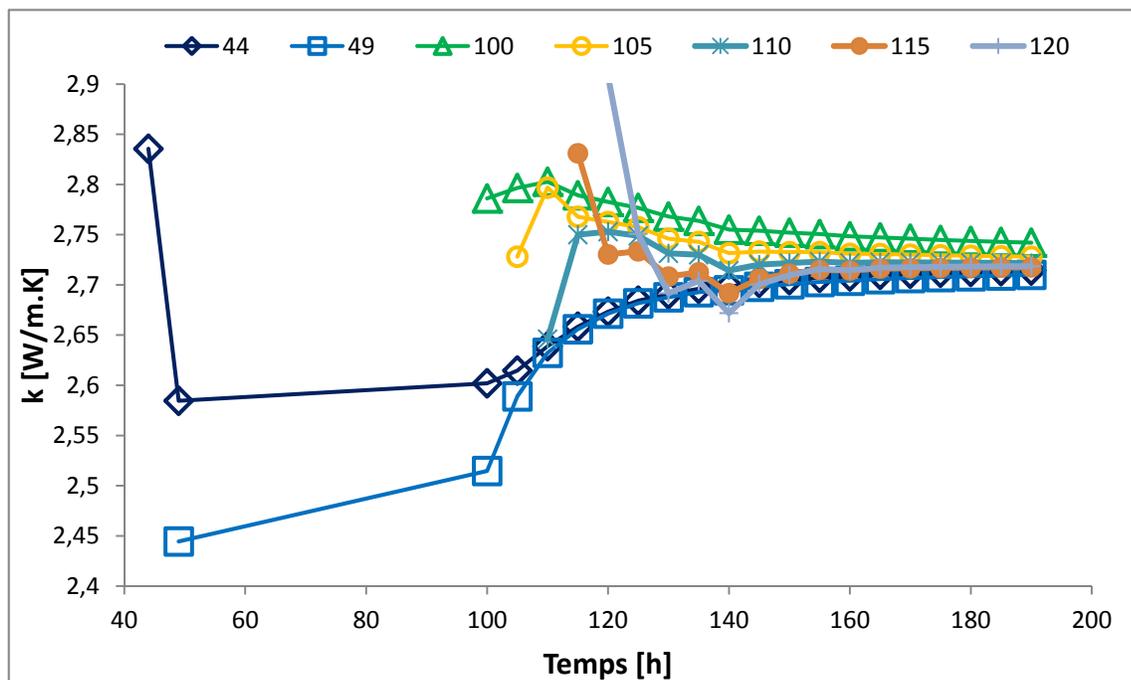


Figure 5.30 Estimation de la conductivité thermique par le modèle CS Le premier point est fixé aux heures précisées dans la légende, le dernier point varie. Test 100H.

La conductivité thermique devient stable et converge vers la même valeur pour la série de données commençant à 100h et plus c.-à-d. lors de la période de restitution, et devient instable quand la période de coupure et prise en compte et encore quand les séries de données expérimentales présentent des perturbations. La solution de la ligne source (LS2) donne les résultats qui sont moins sensibles en incluant les premières données, tandis que le modèle numérique tend à avoir comme conséquence une évaluation inférieure et le modèle de la source cylindrique une évaluation plus élevée de la conductivité thermique quand les premières données sont incluses.

L'ensemble des modèles sont comparés sur la figure 5.31. La conductivité thermique pour l'ensemble de données était déterminée pour la longueur croissante de l'intervalle de données. Le point de début est fixe à l'heure 100 ; c.-à-d. les données de mesure après l'arrêt de l'injection de chaleur. Le premier point dans la figure est l'évaluation pour l'intervalle de données entre l'heure 100 et l'heure 105. Le dernier point est l'évaluation pour l'intervalle de données entre l'heure 100 et l'heure 190.

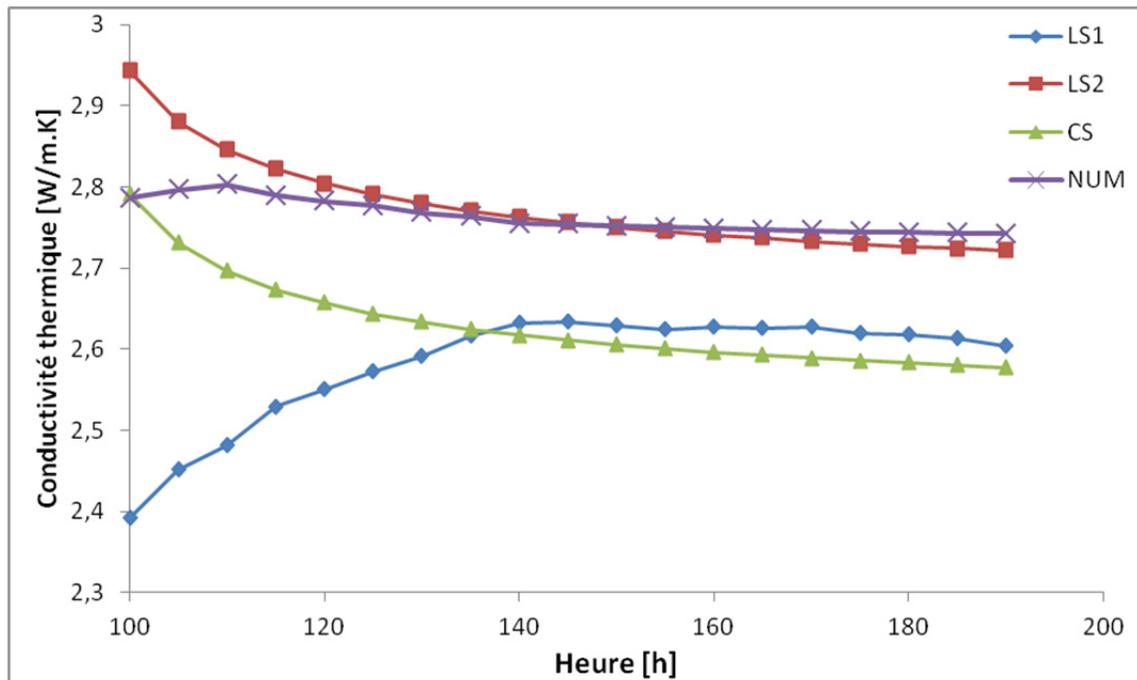


Figure 5.31 La conductivité thermique estimée avec les différentes méthodes. Le premier point est fixe, le dernier point varie avec les données enregistrées.

### 5.2.3 Distribution de la conductivité thermique du sous-sol

La Figure 5.32 présente une distribution verticale de la conductivité thermique dans chaque section de forage. La conductivité thermique est calculée selon la valeur moyenne dans chaque section pour les deux tests de 50 et 74 heures respectivement et le test de 100h avec interruption.

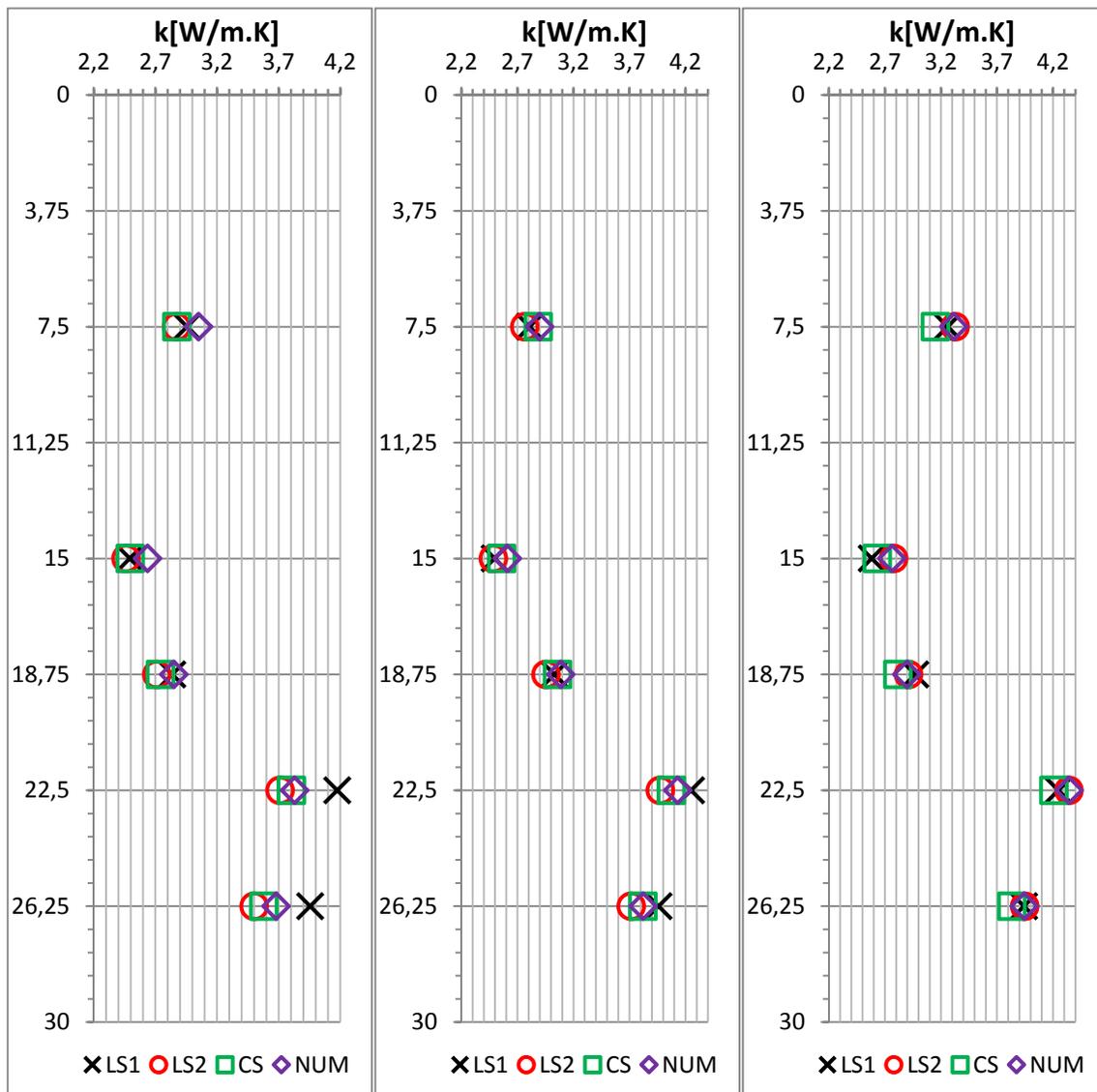


Figure 5.32 La distribution de la conductivité thermique dans chaque section du forage évaluée par (LS1, LS2, CS, NUM).

Les résultats de l'estimation de la conductivité thermique obtenue par la méthode la pente et la méthode de superposition des courbes pour les trois essais de réponse thermique de 50h, 74h et 100h avec interruption sont résumés dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2 Comparaison des résultats de la conductivité thermique des deux méthodes.

méthode	Test de 50h		Test de 74h		Test de 100h	
	pente	superposition	pente	superposition	pente	superposition
LS1	3.28	-	3.30	-	3.39	-
LS2	3.05	3,03	3.17	3.11	3.46	3.26
CS	3.09	2,86	3.27	3.07	3.32	3.12
NUM	3.20	2,91	3.30	3.16	3.45	3.20



## CHAPITRE 6

### ANALYSE D'ERREUR DE L'ESSAI DE RÉPONSE THERMIQUE

#### 6.1 Introduction

La solution analytique de la ligne source de Kelvin (Carslaw et Jaeger, 1959a; Ingersoll et Plass, 1948) employée pour résoudre l'équation de chaleur et employée couramment pour évaluer les données de TRT, a été utilisée comme technique de laboratoire depuis au moins 1905 (Niven, 1905). Néanmoins, particulièrement pour les essais de terrain, jusqu'ici une évaluation systématique des différentes sources d'incertitude (erreur) et leur effet sur la qualité du résultat n'ont pas été faits. Quelques auteurs ont au moins caractérisé l'erreur théorique des différentes sondes (AUSTIN III, 1998; Witte, Van Gelder et Spitler, 2002) utilisée pour effectuer l'essai, mais d'autres sources d'erreur telles que les paramètres du fluide, la longueur de l'échangeur de chaleur, le rayon de forage, mais également l'erreur du modèle ou l'écart type des coefficients de régression, n'ont pas été jusqu'ici considérés.

Les erreurs liées aux mesures peuvent affecter la précision de la conductivité thermique du sous-sol déterminé avec le modèle proposé. Pour évaluer l'exactitude du TRT, l'incertitude liée aux mesures est donc comparée à la sensibilité des paramètres du modèle.

Dans un TRT, le paramètre d'intérêt, soit la conductivité thermique du sous-sol, qui est estimé en fonction d'autres variables qui sont à plusieurs reprises mesurées pendant l'essai, ou mesurées une fois avant ou après l'essai ou indépendamment estimées. L'erreur totale, la différence entre la valeur réelle de la conductivité thermique et la valeur prévue, est la combinaison complexe de :

- 1) Erreurs de mesure, l'erreur liée à l'exactitude des sondes utilisées dans l'équipement et les variations dans les mesures effectuées à plusieurs reprises pendant l'expérience (prélèvement pendant le temps). Ces erreurs présentent des variations aléatoires pendant l'essai et réduisent de ce fait l'exactitude.

- 2) Erreurs de paramètre, erreurs dans les paramètres qui sont mesurés une fois et séparément (comme la longueur de forage ou la densité de fluide) ou qui sont estimés ou obtenus à partir d'autres sources (telles que le diamètre de forage, la capacité de chaleur du fluide). Ce type d'erreur est plus sérieux, car il ne varie pas pendant l'expérience, mais présente un biais dans le résultat.
- 3) La propagation des différentes erreurs et de la méthode par lesquelles ils devraient être combinés sur le paramètre d'intérêt seront déterminées suivant l'influence de chaque paramètre et la façon dont il est utilisé dans l'équation.
- 4) L'erreur du modèle d'évaluation utilisé, les résultats finaux sont obtenus par l'application d'un rapport théorique. Même si un tel rapport est évalué en utilisant les vraies valeurs de tous les paramètres, l'évaluation de la conductivité thermique du sous-sol, est toujours seulement une approximation des vraies valeurs.

Dans ce qui suit, une évaluation des erreurs sera traitée suivant les trois premières sources énumérées ci-dessus pour la quatrième source des remarques générales seront apportés.

## 6.2 Équation de la ligne source infinie

Le modèle de la ligne source (MLS) (Carslaw et Jaeger, 1959a; Ingersoll et Plass, 1948) comprend la conductivité et la résistance de forage. Gehlin (1998b) donne un bon examen du développement théorique de l'utilisation de la (LS) pour les essais de réponse thermiques.

L'équation de base pour l'évolution de la température moyenne par rapport au temps au niveau de la paroi du forage est :

$$T_f = \dot{Q}R_b + \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \left[ \ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2}\right) - \gamma \right] + \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \ln t + T_s \quad (6-1)$$

Avec  $\dot{Q}$  le flux de chaleur injecté, estimé par :

$$\dot{Q} = \frac{U^2}{R_e L} \quad (6-2)$$

La conductivité thermique est estimée en calculant la pente  $m$  du changement de température en fonction du log du temps comme suite :

$$k = \frac{\dot{Q}}{4\pi m} \quad (6-3)$$

Le tableau 6.1 donne une vue d'ensemble de tous les paramètres et du type d'erreur associé.

Tableau 6.1 Les différents paramètres et les estimateurs dans l'analyse de la LS des résultats d'un TRT, indiquant le type d'erreur : 1-erreur de mesure, 2-erreur d'évaluation de paramètre, 3-erreur de combinaison, 4-erreur du modèle.

Paramètre d'intérêt		Type d'erreur				Note
		1	2	3	4	
$k$	$k = \frac{\dot{Q}}{4\pi m}$			x		Estimation de la conductivité thermique a un point donné
$\dot{Q}$	$\dot{Q} = \frac{U^2}{R_e L}$			x		Le flux de chaleur
$U$		x				Tension électrique
$R_e$		x				Résistance électrique du câble
$H$			x			La profondeur du puits géothermique
$m$					x	La pente de la droite de régression de $T_f(t) = m \cdot \ln(t) + b$
$T_f$		x				Température du fluide
$C$			x			Capacité thermique du sol
$T_s$			x			Température moyenne du sol non perturbé (assumé constant et isotopique)
$r_b$			x			Rayon du puits
$t$		x				Temps

### 6.3 Méthode

Il est très facile de confondre entre une erreur et une incertitude et ce dû à leur sens qui est relativement distinct.

Par définition, l'erreur de mesure d'une grandeur physique est la différence entre la valeur mesurée et la valeur vraie (qui est inconnue puisqu'on la cherche). Elle peut se présenter sous forme d'erreur aléatoire, quand la valeur obtenue peut être surévaluée ou sous-évaluée par rapport à la valeur réelle. Cela à cause des interactions de mesure, du temps de déclenchement ou même du bruit. L'erreur systématique contribue à toujours surévaluer (ou toujours sous-évaluer) la valeur mesurée, du à une erreur d'étalonnage, un oubli d'un paramètre ou une procédure erronée.

Cependant l'incertitude traduit les tentatives pour estimer l'importance de l'erreur commise en définissant un intervalle autour de la valeur mesurée qui inclut la valeur vraie avec une probabilité plus ou moins grande.

Dans ce qui va suivre, l'incertitude de chaque paramètre intervenant dans l'analyse de la (LS) sera définie. La propagation des incertitudes sera calculée ensuite. L'incertitude d'un paramètre  $q$  qui est fonction des paramètres  $x$  et  $y$ . est donnée comme suite :

$$\delta q = \sqrt{\left|\frac{\partial q}{\partial x}\right|^2 \delta x^2 + \left|\frac{\partial q}{\partial y}\right|^2 \delta y^2} \quad (6-4)$$

## **6.4 Résultats**

### **6.4.1 Erreurs de mesure**

Les erreurs de mesure se rapportent aux mesures répétées des variables, spécifiquement les températures mesurées du fluide. Dans le cas de cette étude la tension électrique est mesurée par un lecteur de puissance pour obtenir une mesure directe de la puissance fournie. L'erreur de mesure peut être séparée en trois types d'erreur distincts :

- 1) Exactitude (la proximité de la valeur mesurée aux vraies valeurs). Ce type d'erreur présente un biais dans les résultats et devrait être faible, par un bon calibrage du système de sonde.
- 2) Reproductibilité, le degré d'éparpillement de la mesure quand des mesures répétées sont faites dans des conditions parfaitement constantes. Cette erreur dépend de la caractéristique et la qualité du système de sonde elle-même et la manière dans laquelle elle est installée dans le système.
- 3) La perturbation de la valeur réelle du paramètre mesuré, par exemple les petits changements de la température du fluide se produisent pendant les mesures. À proprement parler, ce n'est pas une erreur de mesure, mais une conséquence à la fréquence d'acquisition et comment les mesures sont faites (une moyenne sur le temps ou lecture instantanée).

L'erreur de mesure pendant un essai est un résultat des erreurs de reproductibilité et de perturbation. Une évaluation de la qualité d'un essai devrait comprendre une comparaison au moins de la variation mesurée par rapport à la gamme d'erreurs calculées basée sur la précision du système de sonde. Les mesures qui doivent être considérées sont : la température du fluide, la puissance fournie et le temps.

#### **6.4.1.1 La température du fluide**

Les thermocouples installés sont des thermocouples de surface de type K fabriqués selon la norme (IEC 584-1) leurs degrés de précision dans un intervalle de température -40 à -375 °C est de  $\pm 1,5$  °C.

#### **6.4.1.2 La puissance fournie**

Pour le calcul de la puissance fournie, un lecteur de puissance est utilisé (AEMC instruments : 8230 PowerPad Jr.) avec une précision relative de  $\pm 0.5$  %

#### **6.4.1.3 Le temps**

Le système d'acquisition de données utilisé est composé de différents modules de type SCXI de la compagnie National Instruments. L'erreur sur le temps des enregistreurs de données est normalement petite, particulièrement en ce qui concerne la période de mesure. L'exactitude de l'horloge typique est de 180s/année à 492s/année pour une durée d'essai de 100 heures, ceci rapporterait à une erreur d'horloge de  $8,6 \cdot 10^{-4}$  s à  $1,6 \cdot 10^{-3}$  s. C'est trop faible pour être pris en considération.

#### **6.4.2 Erreurs de paramètres**

Ce sont des paramètres qui sont mesurés une fois avant l'essai et les paramètres qui sont estimés et basés sur d'autres sources telles que des résultats publiés. Ces paramètres comprennent la profondeur du puits géothermique, la capacité thermique du sous-sol et le diamètre de forage ainsi que la température moyenne du sous-sol non perturbé.

#### **6.4.2.1 La longueur active de l'échangeur de chaleur géothermique (H)**

La profondeur active réelle de l'échangeur de chaleur géothermique devrait être toujours mesurée avant un TRT. Avec une bande de mesure typique, une précision des centimètres ou même des millimètres peut être réalisée, le calibrage de la mesure de bande ne devrait pas être oublié, car la mesure utilisée présentera l'erreur systématique dans les résultats de tous les essais réalisés. D'ailleurs, l'erreur affectera les résultats également selon la longueur de la boucle installée, une erreur de 1 mètre sur une boucle de 20 mètres donnera une erreur beaucoup plus grande que celle sur une boucle profonde de 100 mètres. En outre, quand un forage n'est pas correctement remblayé, la longueur active peut changer pendant l'essai et créer d'autres perturbations.

#### **6.4.2.2 La capacité thermique du sol (C)**

La capacité thermique du sous-sol est estimée à partir du profil géologique et il n'est pas facile de définir une évaluation de la gamme d'erreurs dans ce paramètre, mais pour une capacité thermique variant de 2,0 à 3,4 MJ/m<sup>3</sup>/K on a une erreur d'environ  $\pm 0.20$  à 0.51 MJ/m<sup>3</sup>K (une erreur 10-15 %) semble raisonnablement conservateur.

#### **6.4.2.3 Le rayon de forage ( $r_0$ )**

Nous devons considérer l'erreur de mesure aussi bien que la variation probable du rayon de forage au-dessus de la longueur entière de forage. Dans la pratique, le rayon de forage souvent ne sera pas mesuré réellement, mais sera estimé basé sur le diamètre de la tige de forage. Le rayon typique de forage se trouve entre 0.07 à 0.12 m avec une précision de 0,015 à 0,025 m.

### 6.4.3 Propagation des erreurs (combinaison)

Dans les calculs d'erreur, les valeurs prises durant le TRT seront utilisées, ces valeurs sont énumérées dans le tableau 5.2. Dans les équations d'erreur, on suppose que les différents termes sont indépendants.

Tableau 6.2 Valeurs de référence pour les erreurs des différentes variables et paramètres mesurés utilisés pour le calcul des erreurs combinées.

Paramètre	Erreur		Valeur de référence
	Absolue	Relative	
$U$	$\pm 0.5$	0.4%	115.5
$R_e$	$\pm 0.4$	7%	7.1
$L$	$\pm 0.3$	1%	30
$H$	$\pm 0.3$	1%	30
$m$	-	-	-
$T_f$	$\pm 1.5$	-	-
$t$	$\pm 4.38 \cdot 10^{-4}$	-	-

#### 6.4.3.1 L'erreur du flux de chaleur

Le flux de chaleur est calculé par :

$$\dot{Q} = \frac{U^2}{R_e L} \quad (6-5)$$

L'erreur composée du flux de chaleur est indiquée par :

$$\frac{\delta \dot{Q}}{\dot{Q}} = \sqrt{2 \left( \frac{\delta U}{U} \right)^2 + \left( \frac{\delta R_e}{R_e} \right)^2 + \left( \frac{\delta L}{L} \right)^2} \quad (6-6)$$

En utilisant la gamme d'erreurs et les valeurs de référence dans le tableau, avec un flux de chaleur de référence de 63W/m, nous obtenons :

$$\delta\dot{Q} = \dot{Q} * \sqrt{2\left(\frac{0.5}{115.5}\right)^2 + \left(\frac{0.4}{7.1}\right)^2 + \left(\frac{0.3}{30}\right)^2} = 63 * 0.07 = 4.41 \text{ W/m} \quad (6-7)$$

Avec un flux de chaleur de 63 W/m l'erreur est de  $\pm 4,41$  W/m ou 7 %.

Pour calculer l'erreur finale, nous avons besoin du coefficient de pente de l'équation de régression. L'erreur du coefficient de régression ne peut pas être connue à l'avance étant donné qu'elle dépend de l'évolution de la température durant l'expérience. La précision du coefficient m de pente peut être exprimée par l'écart type.

#### 6.4.4 Erreur des paramètres d'intérêt (combinaison)

Après avoir défini les erreurs de mesure et des erreurs dans d'autres paramètres, l'erreur du résultat final (évaluation de la conductivité thermique) dépend de la façon dont toutes les erreurs sont combinées à l'erreur finale de l'évaluation. La propagation d'erreur est calculée utilisant la règle standard de combinaison des erreurs. Les calculs d'exemple emploient les valeurs de référence données dans le tableau 6.2.

L'évaluation de la conductivité thermique (k) est obtenue par :

$$k = \frac{Q}{4\pi Hm} \quad (6-8)$$

Et l'erreur composée peut être approximée par :

$$\frac{\delta k}{k} = \sqrt{\left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\delta m}{m}\right)^2} \quad (6-9)$$

#### 6.4.5 La sensibilité des paramètres

Des analyses factorielles sont exécutées pour évaluer la sensibilité de la conductivité thermique du sous-sol déterminée avec des modèles analytiques et numériques pendant le rétablissement de la température.

L'évolution de la température moyenne du fluide pour un test avec une injection de chaleur de 50h suivie d'un rétablissement de 50h dans un échangeur de chaleur géothermique à expansion directe inséré dans un forage de diamètre de 0,076m est simulée. Avec des paramètres du scénario de la situation de base comme présenté dans le Tableau 6.3.

Tableau 6.3 Paramètres du scénario de base utilisés pour l'analyse factorielle.

<b>Paramètre</b>	<b>Valeur</b>	<b>Unité</b>
$k$	2.5±%	$W/m \cdot K$
$\dot{Q}$	63±%	$W/m$
$C$	2.0±%	$J/m^3 \cdot K$
$R_b$	0.2±%	$m \cdot K/W$

Le taux d'injection de chaleur pendant le rétablissement est zéro. Des simulations sont conduites avec toutes les combinaisons possibles des paramètres donnant  $2^n$  courbes de température, où  $n$  est le nombre de paramètres considérés. L'effet principal de chaque paramètre est évalué à partir du changement de la température entre les deux scénarios où le paramètre varie entre sa valeur minimale et maximale. Les effets principaux du paramètre sont ramenés à une moyenne pour que toute la comparaison détermine l'effet du paramètre sur la température moyenne du fluide en fonction du temps. (Box et autres 1978).

L'incertitude spécifique pour le taux d'injection de chaleur dans l'analyse factorielle est celle déterminée par l'analyse d'erreur, qui est  $\pm 7\%$ . L'incertitude des autres paramètres est ajustée telle que l'effet est deux fois celui du taux d'injection de chaleur pour la plupart de la durée des simulations.

Ceci assure que l'effet de la conductivité thermique du sous-sol peut être distingué de celui du taux d'injection de chaleur. On vérifie avec un tracé préliminaire également que l'effet de la conductivité thermique du sous-sol demeure au-dessus durant la période de rétablissement, et que cet effet peut être évalué par des mesures de température.

L'analyse factorielle avec des incertitudes convenablement ajustées, finalement indique le degré de précision lié aux valeurs de conductivité thermique déterminées pendant le TRT.

Le modèle numérique utilisé est sujet alors à l'analyse factorielle. L'écoulement d'eaux souterraines n'est pas simulé avec le modèle. Seule la conductivité thermique du sol le taux d'injection de chaleur et la capacité thermique sont considérés pour l'analyse factorielle. Le modèle de ligne source employé pour calculer le rétablissement thermique est premièrement soumis à l'analyse factorielle.

Les résultats factoriels d'analyse sont tracés sur la Figure 6.2. L'effet de la capacité thermique devient négligeable pendant la période de rétablissement, quand l'état d'équilibre à travers le forage est atteint, et celui de la résistance du puits est égal à zéro parce que ce dernier paramètre disparaît dans l'équation quand le taux d'injection de la chaleur est nul. L'effet de la conductivité thermique du sous-sol augmente avec le temps pendant l'injection de chaleur et diminue pendant la période de rétablissement.

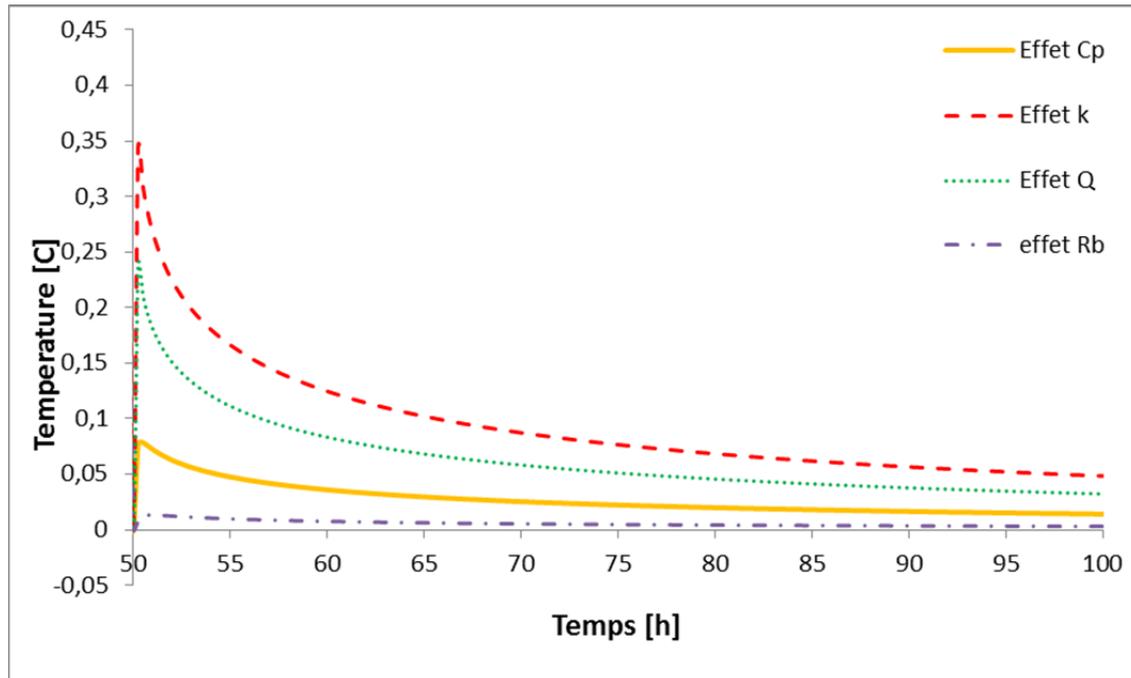


Figure 6.1 Résultats de l'analyse factorielle pour déterminer la sensibilité des paramètres.

Avec une exactitude de  $\pm 12\%$ , l'effet des  $k$  est au-dessus de celui du taux d'injection de chaleur pendant le rétablissement, alors qu'il demeure en dessous pendant la majeure partie de la période d'injection de la chaleur

L'analyse factorielle prouve que l'incertitude à laquelle la conductivité thermique du sous-sol peut être déterminée pour un effet deux fois que celui du taux d'injection de chaleur est  $\pm 12\%$ .

## 6.5 Comparaison des résultats

Avec les résultats obtenus dans le chapitre 5 et l'analyse d'erreur de ce chapitre, on réalise, que l'analyse des données enregistrées sur le terrain avec l'approche de la ligne source (LS1) par la méthode de la pente est très sensible aux perturbations de la source d'injection de chaleur.

Les trois essais de 50h, 74h et 100h ont été utilisés pour estimer la conductivité thermique du sous-sol à l'aide de deux méthodes : 1- méthode de la pente et 2- méthode de superpositions des courbes.

Le problème fondamental réside dans le fait que la conductivité thermique du sous-sol du terrain où les tests ont été réalisés est inconnue et il n'y a pas de modèle vrai. Pour déterminer la conductivité thermique trois modèles ont été utilisés deux modèles analytiques, la ligne source (LS2) et la source cylindrique (CS) ainsi qu'un modèle numérique (NUM).

Avec la méthode de superposition des courbes, le modèle de la ligne source (LS2) et le modèle numérique (NUM) ont donné des résultats proches des données enregistrées.

Avec la méthode de la pente, le modèle de la ligne source (LS2) et celui de la source cylindrique (CS) ont donné des résultats similaires, en changeant la méthode d'évaluation pour déterminer les données à négliger, le modèle de la ligne source (LS2) s'est démarqué des autres modèles en apportant des résultats qui étaient moins sensibles à l'ajout des données initiales et semblables à ceux obtenus avec la méthode de superposition des courbes.

Pour conclure, les deux méthodes donnent des résultats similaires pour un modèle précis, la méthode de la pente donne des valeurs légèrement supérieures à celle de la méthode de superposition et converge moins rapidement.

Le modèle qui selon moi donne une meilleure estimation de la conductivité thermique du sous-sol est celui de la ligne source (LS2), durant un test de 50h. Les résultats obtenus donnent une conductivité thermique moyenne sur toute la profondeur de  $3.05 \pm 12\%$  [W/m·K].



## CONCLUSION

Une méthode originale développée pour effectuer les essais de réponse thermique utilisant un câble chauffant a été présentée. L'essai consiste en une injection de chaleur le long du câble inséré dans l'échangeur géothermique et en enregistrant la température qui est analysé durant la période de restitution pour évaluer la conductivité thermique du sous-sol.

Le test de réponse thermique (TRT) a été réalisé au moyen de trois essais différents dans la période d'injection de chaleur. Il y avait deux cas expérimentaux, un où la puissance était gardée constante, mais l'étape de temps variait et un autre où la puissance était interrompue et après remis en marche. De cette façon, les propriétés thermiques du sous-sol obtenues à partir des méthodes analytiques et numériques ont pu être comparées aux propriétés thermiques du sous-sol estimées à partir des données expérimentales.

Premièrement, les données ont été analysées avec le modèle de la ligne source couplé au principe de superposition des courbes durant la période de restitution thermique pour les méthodes analytiques ainsi qu'un modèle numérique tridimensionnel dans chaque section du forage.

Les profils de la conductivité thermique présentent une distribution similaire le long de la profondeur du forage, dans les trois cas. Pour l'essai avec une injection de chaleur constante durant 50H, la moyenne de la conductivité thermique moyenne du sous-sol est égale à 3.05 [W / m·K], qui varie dans la fourchette 2.43 et 3.71 [W / m·K]. D'autre part, la conductivité thermique de la roche estimée à partir des données du deuxième essai avec une injection de chaleur constante mais cette fois durant 74H, présente une valeur moyenne de 3.17 [W / m·K], qui varie entre 2.48 et 3.97 [W / m·K] dans les sections de forage. Pour l'essai avec interruption, la conductivité thermique moyenne dans toutes les sections est égale à 3.46 [W / m·K] et comprise entre 2.77 et 4.34 [W / m·K].

Cela donne à penser qu'il n'y a pas des incertitudes pertinentes dans les paramètres thermiques estimés en raison des mesures d'équipements du test. La différence dans l'estimation de la conductivité thermique le long de la profondeur du forage peut être attribuée à des différences dans les propriétés géologiques le long du forage, bien que la terre ait été considérée comme homogène et isotrope.

Pour finir, l'équipement exigé pour réaliser les essais avec câble chauffant est plus petit, plus léger et plus facile à installer que l'équipement utilisé pour des tests conventionnels. Des essais de câble chauffant peuvent également être réalisés dans divers types de forage permettant la mesure des propriétés thermiques du sous-sol sans installation d'un échangeur géothermique. Ces avantages mènent à des réductions des coûts liées à un TRT et augmentent la popularité pour la conception des systèmes de pompe à chaleur géothermique.

## RECOMMANDATIONS

Dans cette étude, nous avons ouvert une voie vers l'utilisation des câbles chauffants comme sources d'injection de chaleur pour la réalisation de test de réponse thermique. Une méthode expérimentale et les processus d'analyse ont été développés pour permettre des essais plus faciles sur le terrain. Le modèle numérique utilisé apporte une meilleure représentation de la géométrie du puits. Cette méthodologie a donné, des résultats satisfaisants qui ont élucidé quelques secteurs ou d'avantage de recherche et de clarification sont exigés. Les futures recherches sont recommandées dans les secteurs suivants :

Étant donné que la température enregistrée est établie par l'intermédiaire de Cinque point de mesures le long de la boucle. Il est suggéré plus de points de mesure pour obtenir une plus grande précision dans l'estimation de la température.

Dans l'approche de cette étude, l'analyse sur la première étape d'injection de chaleur n'est pas considérée. Il est suggéré d'analyser l'influence de l'étape d'injection de la chaleur sur l'estimation des paramètres thermiques.

Faire un contrôle sur le système d'alimentation et de puissance pour procéder à des tests avec des taux variables d'injection de chaleur.

Développer une méthode pour l'évaluation d'autres propriétés thermiques inconnues simultanément avec la conductivité thermique du sous-sol, comme la conductivité thermique du coulis, la capacité thermique du sous-sol et du coulis.

Tous les processus d'analyse supposent qu'il n'y a aucun écoulement d'eaux souterraines. Développer des processus d'analyse pratiques pour des situations où l'écoulement significatif d'eaux souterraines se produit.

Développer le modèle numérique en faisant une étude de sensibilité du maillage et optimiser le temps de calcul.

En conclusion, développer un appareil expérimental avec des câbles chauffants, qui pourrait être transporté et utilisé très facilement sur le terrain, avec une possibilité de branchement sur une source de puissance auxiliaire.

## BIBLIOGRAPHIE

- Acuña, José. 2010. « Improvements of U-pipe borehole heat exchangers ». KTH.
- AUSTIN III, WARREN ADAM. 1998. « Development of an in situ system for measuring ground thermal properties ». Oklahoma State University.
- Austin, W, C Yavuzturk et J.D Spitler. 2000. « Development Of An In-Situ System For Measuring Ground Thermal Properties ». *ASHRAE Transactions*, vol. 106(1), p. 365-379.
- Birsoy, Yuksel K, et WK Summers. 1980. « Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping data ». *Ground Water*, vol. 18, n° 2, p. 137-146.
- Bose, James Edwin. 1984. *Closed-loop ground-coupled heat pump design manual*. The University.
- Bozzoli, F, G Pagliarini, S Rainieri et L Schiavi. 2011. « Estimation of soil and grout thermal properties through a TSPEP (two-step parameter estimation procedure) applied to TRT (thermal response test) data ». *Energy*, vol. 36, n° 2, p. 839-846.
- Veillez sélectionner un type de document autre que « Generic » afin de faire afficher la référence bibliographique.
- Carslaw, H. S., et J. C. Jaeger. 1959a. *Conduction of heat in solids*, 2nd. London: Oxford University Press, viii, 510 p. p.
- Carslaw, HS, et JC Jaeger. 1959b. « Conduction of Heat in Solids (paperback, ) ».
- Choudhary, Ata-ur-Rehman. 1976. « An approach to determine the thermal conductivity and diffusivity of a rock in situ ». Oklahoma State University.
- Deerman, JD. 1990. « Simulation of vertical U-tube ground-coupled heat pump systems using the cylindrical heat source solution ». *ASHRAE Transaction: Research*, vol. 3472, p. 287-295.
- Dittus, FW, et LMK Boelter. 1930. « University of California Publications on Engineering ». *University of California Publications in Engineering*, vol. 2, p. 371.
- Eklöf, Catarina, et Signhild Gehlin. 1996. « TED-a mobile equipment for thermal response test: testing and evaluation ».
- Ericsson, LO. 1985. « Värmeutbyte mellan berggrund och borrhål vid bergvärme-system (Heat Exchange Between Crystalline Bedrock and Borehole in an Energy Well

System) ». *Department of Geology, Chalmers University of Technology and University of Göteborg. Publ. A*, vol. 52.

Fujii, Hikari, Hiroaki Okubo, Keita Nishi, Ryuichi Itoi, Kunio Ohyama et Kazuo Shibata. 2009. « An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers ». *Geothermics*, vol. 38, n° 4, p. 399-406.

Gehlin, Signhild. 1998a. « Thermal response test ». *situ measurements of thermal properties in hard rock. Licentiate thesis, Luleå University of Technology*, vol. 37.

Gehlin, Signhild. 1998b. « Thermal response test ». *situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock, Licentiate thesis, Lulea University of Technology, Sweden*.

Gehlin, Signhild. 2002. « Thermal response test: method development and evaluation ».

Gehlin, Signhild EA, et Goran Hellstrom. 2003. « 4612 Comparison of Four Models for Thermal Response Test Evaluation ». *ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Airconditioning Engin*, vol. 109, n° 1, p. 131-142.

Gehlin, Signhild EA, et B Nordell. 2003. « Determining undisturbed ground temperature for thermal response test ». *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS*, vol. 109, n° 1, p. 151-156.

Hedenus, Fredrik, Christian Azar et Kristian Lindgren. 2005. « Induced technological change in a limited foresight optimization model ».

IEA, International Energy Agency. 2012. *World Energy Outlook, 2012*. OECD/IEA.

Ingersoll, Leonard Rose. 1954. *Heat conduction: with engineering, geological, and other applications*. University of Wisconsin Press.

Ingersoll, Leonard Rose, Otto Julius Zobel et Alfred Cajori Ingersoll. 1948. *Heat conduction, with engineering and geological applications*. McGraw-Hill Book Co.

Ingersoll, LR, et HJ Plass. 1948. « Theory of the ground pipe heat source for the heat pump ». *ASHVE transactions*, vol. 47, n° 7, p. 339-348.

Javed, Saqib. 2010. « Design of ground source heat pump systems. Thermal modelling and evaluation of boreholes ».

Katzenbach, Rolf, Frithjof Clauss, Thomas Waberseck et Isabel Wagner. 2008. « The Geothermal Response Test: Data Analysis and Present Developments ». *Electric power*, vol. 1, p. T2.

- Kavanaugh, Stephen Paul. 1985. *Simulation and experimental verification of vertical ground-coupled heat pump systems*. Oklahoma State Univ., Stillwater (USA).
- Lamarche, Louis, Stanislaw Kajl et Benoit Beauchamp. 2010. « A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems ». *Geothermics*, vol. 39, n° 2, p. 187-200.
- Lim, Kyoungbin, Sanghoon Lee et Changhee Lee. 2007. « An experimental study on the thermal performance of ground heat exchanger ». *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 31, n° 8, p. 985-990.
- Marcotte, D, et P Pasquier. 2008. « On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test ». *Renewable Energy*, vol. 33, n° 11, p. 2407-2415.
- Mogensen, Palne. 1983. « Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages ». *Document-Swedish Council for Building Research*, n° 16, p. 652-657.
- Nakos, Helena. 2011. « Response testing and evaluation of groundwater-filled boreholes. Development and validation of a new calculation tool ».
- Niven, C. 1905. « On a method of finding the conductivity for heat ». *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol. 76, n° 507, p. 34-48.
- Pehme, Peeter E, John P Greenhouse et Beth L Parker. 2007a. « The Active Line Source (ALS) technique, a method to improve detection of hydraulically active fractures and estimate rock thermal conductivity ». In *Proceedings, 60th Canadian Geotechnical Conf. & 8th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conf.* p. 21-24.
- Pehme, Peeter E, John P Greenhouse et Beth L Parker. 2007b. « The Active Line Source temperature logging technique and its application in fractured rock hydrogeology ». *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, vol. 12, n° 4, p. 307-322.
- Raymond, J, G Robert, R Therrien et L Gosselin. 2010. « A novel thermal response test using heating cables ». In *Proceedings of the World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*. p. 1-8.
- Rohner, Ernst, Ladislaus Rybach et Ulrich Schärli. 2005. « A new, small, wireless instrument to determine ground thermal conductivity in-situ for borehole heat exchanger design ». In *Proceedings of the World Geothermal Congress. Antalya, Turkey*.
- Roth, P, A Georgiev, A Busso et E Barraza. 2004. « First in situ determination of ground and borehole thermal properties in Latin America ». *Renewable energy*, vol. 29, n° 12, p. 1947-1963.

- Sanner, Burkhard, Göran Hellström, Jeff Spitler et Signhild Gehlin. 2005. « Thermal response test-current status and world-wide application ». In *Proceedings world geothermal congress*. p. 24-29.
- Sanner, Burkhard, Erich Mands, Marc Sauer et Edgar Grundmann. 2007. « Technology, development status, and routine application of Thermal Response Test ». In *Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany*. Vol. 30.
- Sass, JH, Arthur H Lachenbruch et Robert J Munroe. 1971. « Thermal conductivity of rocks from measurements on fragments and its application to heat-flow determinations ». *Journal of Geophysical Research*, vol. 76, n° 14, p. 3391-3401.
- Sharqawy, MH, EM Mokheimer, MA Habib, HM Badr, SA Said et NA Al-Shayea. 2009. « Energy, exergy and uncertainty analyses of the thermal response test for a ground heat exchanger ». *International Journal of Energy Research*, vol. 33, n° 6, p. 582-592.
- Shonder, J.A., et J.V. Beck. 1998. *Determining effective soil formation thermal properties from field data using a parameter estimation technique*. Medium: ED; Size: [50] p. p.
- Shonder, John A, et JV Beck. 2000a. *Field test of a new method for determining soil formation thermal conductivity and borehole resistance*. Oak Ridge National Lab., TN (US).
- Shonder, John A, et JV Beck. 2000b. « A new method to determine the thermal properties of soil formations from in situ field tests ». *Oak Ridge National Laboratory, Rept. ORNL/TM-2000*, vol. 97.
- Signorelli, Sarah, Simone Bassetti, Daniel Pahud et Thomas Kohl. 2007. « Numerical evaluation of thermal response tests ». *Geothermics*, vol. 36, n° 2, p. 141-166.
- Wagner, Roland, et Christoph Clauser. 2005. « Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity ». *Journal of Geophysics and Engineering*, vol. 2, n° 4, p. 349.
- Witte, Henk JL, Guus J Van Gelder et JD Spitler. 2002. « In situ measurement of ground thermal conductivity: a Dutch perspective ». *Ashrae Transactions*, vol. 108, n° 1, p. 263-272.
- Yavuzturk, Cenk, JD Spitler et SJ Rees. 1999. « A transient two-dimensional finite volume model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers ». *ASHRAE transactions*, vol. 105, n° 2, p. 465-474.
- Zanchini, E., S. Lazzari et A. Priarone. 2010. « Improving the thermal performance of coaxial borehole heat exchangers ». *Energy*, vol. 35, n° 2, p. 657-666.

