

Titre: Élaboration et validation d'une suite évolutive de modèles
d'échangeurs géothermiques verticaux
Title: d'échangeurs géothermiques verticaux

Auteur: Vivien Godefroy
Author:

Date: 2014

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Godefroy, V. (2014). Élaboration et validation d'une suite évolutive de modèles
d'échangeurs géothermiques verticaux [Mémoire de maîtrise, École
Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1481/>
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1481/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Michel Bernier
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉLABORATION ET VALIDATION D'UNE SUITE ÉVOLUTIVE DE
MODÈLES D'ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES VERTICAUX

VIVIEN GODEFROY

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

AOÛT 2014

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉLABORATION ET VALIDATION D'UNE SUITE ÉVOLUTIVE DE MODÈLES
D'ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES VERTICAUX

présenté par : GODEFROY Vivien

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. KUMMERT Michaël, Doct., président

M. BERNIER Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. PASQUIER Philippe, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Mes remerciements premiers et les plus sincères vont à mon directeur de recherche, le professeur *Michel Bernier*, pour son soutien, son enthousiasme, ses conseils, et sa disponibilité durant ces deux années. Ce fut un réel plaisir de travailler sous sa supervision.

Mes remerciements au réseau stratégique du CRSNG sur les bâtiments intelligents à consommation énergétique nette nulle (Smart Net-Zero Energy Buildings Strategic Network) pour son appui financier.

Mes remerciements aux professeurs *Michaël Kummert* et *Philippe Pasquier* pour leurs précieux conseils.

Mes remerciements au groupe MECBAT, notamment *Massimo Cimmino*, *Amin Ahmadfard*, *Bruno Marcotte*, *Nicolas Hache*, *Katherine D'Avignon*, *Humberto Jose Quintana*, et *Kun Zhang* pour leur bonne humeur et dynamisme au quotidien.

Mes remerciements vont tout particulièrement à *Massimo Cimmino* pour son aide précieuse tout au long de ma maîtrise, et pour sa contribution aux travaux présentés dans ce mémoire.

Mes remerciements au Centre Canadien des Technologies Résidentielles (CCTR) pour m'avoir donné accès à des données expérimentales réalisées sur des puits géothermiques verticaux installés sur le site du Conseil National de Recherches Canada (CNRC).

Enfin, je tiens à remercier mes parents pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements tout au long de mes études.

RÉSUMÉ

Ce mémoire détaille l'élaboration et la validation d'une suite évolutive de modèles d'échangeurs géothermiques verticaux dans l'environnement TRNSYS.

Un nouveau modèle d'échangeur géothermique vertical tenant compte des phénomènes transitoires à l'intérieur du puits est d'abord présenté. Il s'agit d'un modèle quasi 3D, dans lequel le puits est découpé en tranches axiales successives, où chaque tranche est modélisée par l'approche des résistances et capacités thermiques (TRCM). Le modèle est d'abord détaillé pour un puits à un tube en U, puis il est adapté pour un puits à deux tubes en U avec deux circuits indépendants. Le modèle TRCM à un tube en U proposé est validé avec succès par comparaison avec d'autres modèles existants incluant un modèle numérique 3D détaillé, ainsi que par comparaison avec trois cas expérimentaux.

Quatre modèles d'échangeurs géothermiques verticaux simples (un seul puits) ont été implémentés dans l'environnement TRNSYS sous la forme de TYPEs. Le premier est un modèle de puits à un tube en U, dont l'intérêt est essentiellement pédagogique : initiation aux concepts associés aux échangeurs géothermiques, et à l'utilisation d'un outil de simulation d'échangeurs géothermiques. Le second est un modèle d'échangeur géothermique à deux tubes en U, avec deux circuits indépendants. Le troisième, et le quatrième modèle correspondent respectivement aux modèles TRCM proposés à un tube en U, et à deux tubes en U.

Dans un dernier volet, ces quatre modèles d'échangeurs simples sont adaptés à la modélisation d'échangeurs géothermiques multi-puits, conduisant à l'élaboration de quatre autres TYPEs. Ces modèles d'échangeur multi-puits, dans lesquels le positionnement spatial de chaque puits est possible, utilisent les g-functions générées par un préprocesseur pour calculer la réponse thermique du champ de puits à modéliser.

Finalement, un exemple de simulation annuelle d'une communauté solaire est illustré dans ce mémoire, dans laquelle le stockage thermique saisonnier par puits géothermiques est modélisé par des TYPEs de la suite.

ABSTRACT

This thesis describes the development and the validation of a progressive suite of models for the simulation of geothermal heat exchangers in the TRNSYS environment.

A new vertical geothermal heat exchanger model that accounts for transient behavior in the borehole is first presented. This is a quasi 3D model where the borehole is divided into successive layers. The cross-section of each layer is modeled by the ‘thermal resistance and capacity model’ (TRCM) approach. It is first described for a single U-tube borehole and then adapted for a double U-tube borehole with two independent circuits. The proposed TRCM model for a single U-tube is then validated against other models including a fully discretized 3D model. It is also successfully compared to three experimental cases.

Four models of simple vertical geothermal heat exchangers (single borehole) have been implemented as components (TYPEs) in the TRNSYS environment. The first is a single U-tube borehole model, whose interest is mainly pedagogical: introduction to concepts associated to geothermal heat exchangers and simulation tools for geothermal heat exchangers. The second is a double U-tube borehole with two independent circuits. The third and the fourth models correspond to the proposed TRCM models mentioned above for single and double U-tubes.

In the last part, these four simple borehole models are adapted for modeling bore fields leading to the development of four other TYPEs. These bore field models use g-functions. g-functions are generated by a preprocessor to calculate the bore field thermal response factor for any given spatial positions of each borehole.

Finally, an example of an annual simulation of a solar community is presented in this thesis, in which the borehole thermal energy storage system is modeled by the TYPEs of the suite.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	V
TABLE DES MATIÈRES	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIV
LISTE DES ANNEXES.....	XVII
INTRODUCTION.....	1
Objectif de cette étude	2
Organisation de ce mémoire.....	3
CHAPITRE 1 REVUE DE LITÉRATURE.....	5
1.1 Transfert de chaleur dans le sol.....	5
1.1.1 Pour un seul puits	5
1.1.2 Pour un champ de puits	11
1.2 Transferts de chaleur à l'intérieur du puits.....	15
1.2.1 Résistance thermique d'un puits	15
1.2.2 Le delta-circuit	19
1.2.3 Les modèles transitoires	22
1.3 L'agrégation des charges.....	25
1.4 Les modèles de puits géothermiques présentement implantés dans le logiciel TRNSYS	30
1.4.1 Le modèle DST	30

1.4.2	Le modèle EWS	33
1.4.3	Lacunes des modèles existants	35
CHAPITRE 2	MODÈLES DE CAPACITÉS ET DE RÉSISTANCES THERMIQUES PROPOSÉS.....	37
2.1	Modèle 2 tuyaux.....	37
2.1.1	Présentation de l'approche à deux tuyaux.....	37
2.1.2	Calcul des résistances thermiques et des capacités thermiques	39
2.1.3	Équations du modèle	40
2.1.4	Procédure de résolution	46
2.2	Modèle 4 tuyaux.....	47
2.2.1	Présentation de l'approche à 4 tuyaux.....	47
2.2.2	Calcul des résistances thermiques et des capacités thermiques	49
2.2.3	Équations du modèle	49
2.2.4	Procédure de résolution	53
CHAPITRE 3	MODÈLES D'ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES VERTICAUX SIMPLES	54
3.1	TYPE 241	54
3.1.1	Présentation du TYPE 241	54
3.1.2	Variables du TYPE 241.....	58
3.1.3	Validation du Type 241	60
3.2	TYPE 242	68
3.2.1	Présentation du modèle	69
3.2.2	Variables du TYPE 242.....	71
3.2.3	Validation du TYPE 242	75
3.3	TYPE 243	75

3.3.1	Variables du TYPE 243.....	75
3.3.2	Validation du TYPE 243	78
3.4	TYPE 244.....	93
3.4.1	Variables du TYPE 244.....	93
3.4.2	Comparaison avec le TYPE 242	98
3.5	Résumé	100
CHAPITRE 4 MODÈLES D'ECHANGEURS GÉOTHERMIQUES VERTICAUX MULTIPUITS.....		101
4.1	g-function généré par préprocesseur	101
4.2	TYPE 245	103
4.2.1	Présentation du TYPE 245	104
4.2.2	Variables du TYPE 245.....	104
4.2.3	Validation du TYPE 245	107
4.3	TYPE 246.....	109
4.3.1	Présentation du TYPE 246	109
4.3.2	Variables du TYPE 246.....	110
4.3.3	Validation du TYPE 246	113
4.4	TYPE 247	113
4.4.1	Présentation du TYPE 247	114
4.4.2	Variables du TYPE 247.....	114
4.4.3	Validation du TYPE 247	118
4.5	TYPE 248.....	119
4.5.1	Présentation du TYPE 248	120
4.5.2	Variables du TYPE 248.....	120
4.5.3	Validation du TYPE 248	124

4.6	Exemple d'utilisation des TYPEs 246 et 248.....	124
4.7	Résumé	130
	CONCLUSION	131
	BIBLIOGRAPHIE	134
	ANNEXE	139

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 0-1: Tableau récapitulatif de la suite évolutive TRNSYS	4
Tableau 1-1: Coefficients empiriques de Paul (1996).....	17
Tableau 1-2: Modification à apporter aux paramètres d'agrégations de Liu (2005) en fonction du pas de temps de la simulation.....	30
Tableau 3-1 : Les quatre cas tests proposés par Bertagnolio et al. (2012).....	61
Tableau 3-2: Paramètres utilisés pour la comparaison avec d'autres modèles existants	79
Tableau 3-3 : Paramètres de l'échangeur géothermique conçu par Beier et al. (2011)	88
Tableau 3-4: Caractéristiques du champ de puits expérimental d'EDF R&D	90
Tableau 3-5: Paramètres utilisés pour la comparaison avec d'autres modèles existants	98
Tableau 4-1: Paramètres de l'échangeur géothermique de la communauté solaire Drake Landing	127
Tableau 4-2 : Performances énergétiques du système complet.....	128

LISTE DES FIGURES

Figure 0-1: Représentation schématique d'un système de pompe à chaleur géothermique	1
Figure 1-1: Représentation schématique de la source linéique infinie.....	6
Figure 1-2: Représentation schématique de la source cylindrique infinie	7
Figure 1-3: Représentation schématique de la source linéique finie.....	10
Figure 1-4: g -functions d'Eskilson pour un champ de puits 3x2.....	12
Figure 1-5 Représentation de 2 puits divisés en 3 segments modélisés par des sources linéiques finies	13
Figure 1-6: Définition des principaux paramètres d'un puits géothermique	16
Figure 1-7: Configuration pris en compte par Paul (1996)	16
Figure 1-8: Approche originale du delta-circuit (Eskilson & Claesson, 1988).....	20
Figure 1-9: Delta-circuit modifié de Lamarche et al. (2010)	21
Figure 1-10: Présentation des paramètres de l'Équation (1.32).....	22
Figure 1-11: Modèle TRCM pour un puits à 2 tuyaux de Bauer et al. (2011).....	23
Figure 1-12: Modèle CaRM de Zarella et al. (2011).....	24
Figure 1-13: Illustration de la méthode MLAA (Bernier et al, 2004).....	26
Figure 1-14: Illustration de la méthode d'agrégation de Liu (2005)	27
Figure 1-15: Formation d'un « petit bloc » dans l'agrégation de Liu (2005)	28
Figure 1-16: Formation d'un « moyen bloc » dans l'agrégation de Liu (2005)	28
Figure 1-17: Formation d'un « grand bloc » dans l'agrégation de Liu (2005)	29
Figure 1-18: Arrangement des puits dans le modèle DST	32
Figure 1-19: Représentation schématique du bilan d'énergie dans le modèle EWS (Wetter & Huber, 1997).....	34
Figure 1-20: Représentation schématique du transfert de chaleur radial dans le modèle EWS (Wetter & Huber, 1997)	35

Figure 2-1: Représentation schématique du modèle proposé.....	38
Figure 2-2: a) Circuit TRCM proposé, et b) définition des zones du coulis	39
Figure 2-3: a) Représentation schématique des bilans d'énergie et b) des échanges de chaleur entre le fluide caloporteur et la paroi du tuyau.....	42
Figure 2-4: Représentation du taux d'injection de chaleur à la paroi du puits	46
Figure 2-5 : Circuit TRCM proposé pour un puits géothermique à 4 tuyaux	48
Figure 2-6: Définition des zones du coulis.....	48
Figure 3-1: Illustration des paramètres de l'Équation (3.1)	55
Figure 3-2 : Résultats du cas test A.....	63
Figure 3-3: Résultats du cas test B	64
Figure 3-4: Profil de charge du cas test C	65
Figure 3-5: Résultats du cas test C	66
Figure 3-6: Profil de charge du cas test D	67
Figure 3-7: Résultats du cas test D.....	68
Figure 3-8: Nomenclature utilisée dans l'Équation (3.13).....	69
Figure 3-9 : Comparaison du TYPE 243 avec le TYPE 451 (Wetter & Huber, 1997) et les modèles GEMS2D/GEMS3D de He (2012)	80
Figure 3-10 : Comparaison avec les données de l'essai de réponse thermique	82
Figure 3-11: Présentation du système géothermique	83
Figure 3-12: Comparaison des résultats entre le 24 Novembre et le 27 Novembre.....	85
Figure 3-13: Zoom de la Figure 3-12	86
Figure 3-14: Représentation de l'écart moyen journalier	87
Figure 3-15 : Comparaison du TYPE 243 avec les données expérimentales de Beier et al. (2011)	89
Figure 3-16 : Représentation de la plateforme expérimentale d'EDF R&D	90

Figure 3-17: Illustration du TYPE 243bis.....	91
Figure 3-18: Comparaison entre la température de sortie simulée avec le TYPE 243bis, et la température de sortie mesurée expérimentalement sur le puits n°4	92
Figure 3-19: Illustration de l'importance de prendre en considération la variation de température dans le sol	93
Figure 3-20 : Comparaison du TYPE 242 avec le TYPE 244 (avec et sans la capacité thermique du coulis)	99
Figure 4-1: Interface graphique du préprocesseur.....	102
Figure 4-2: Fichier texte de la g-function d'un champ de puits 3x3 généré par le préprocesseur	103
Figure 4-3: Disposition d'un champ de 19 puits avec le modèle DST	107
Figure 4-4: Calcul de la g-function d'un champ de 19 puits repartis de façon hexagonale	108
Figure 4-5: Comparaison du TYPE 245 avec le modèle DST	109
Figure 4-6: Comparaison du TYPE 247 avec le modèle DST	119
Figure 4-7: Illustration de la communauté solaire Drake Landing extrait du mémoire de Verstraete (2013).....	125
Figure 4-8: Températures à l'entrée et à la sortie de l'échangeur géothermique côté charge et côté décharge la 1ère semaine de décembre de l'année 2	129

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

1-D	Une dimension
2-D	Deux dimensions
3-D	Trois dimensions
<i>B</i>	Distance centre-à-centre entre deux puits adjacents (m)
<i>C</i>	Capacité thermique massique (J/kg·K)
<i>C_f, C_g, C_{gg}</i>	Capacité thermique du circuit TRCM (J/m·K)
<i>COP</i>	Coefficient de performance (-)
<i>c_p</i>	Chaleur spécifique (J/kg·K)
<i>dH</i>	Epaisseur d'une tranche axiale de puits (m)
<i>D</i>	Profondeur de la tête des puits (m)
<i>D_s</i>	Demi-distance centre à centre entre les deux tuyaux d'un tube en U (m)
erfc	Fonction d'erreur complémentaire
<i>F_o</i>	Nombre de Fourier (-)
<i>G</i>	g-factor (-)
<i>g</i>	g-function (-)
<i>H</i>	Hauteur du puits (m)
<i>h</i>	Facteur de réponse thermique (-)
<i>h_i</i>	Coefficient de convection interne (W/m ² K)
<i>J_n</i>	Fonction de Bessel de premier type d'ordre <i>n</i>
<i>k</i>	Conductivité thermique (W/m·K)
<i>m̄</i>	Débit massique du fluide (kg/s)
<i>n</i>	Nombre de tuyau
<i>n_H</i>	Nombre de tranches axiales de puits

Nu	Nombre de Nusselt (-)
PAC	Pompe à chaleur
q	Taux d'extraction de chaleur par unité de longueur (W/m)
R_f, R_g, R_{gg}	Résistance thermique du circuit TRCM (m·K/W)
R_a	Résistance interne du puits (m·K/W)
R_b	Résistance équivalente du puits (m·K/W)
R_f	Résistance convective du fluide (m·K/W)
R_g	Résistance du matériau de remplissage (m·K/W)
R_p	Résistance de conduction du tuyau (m·K/W)
r	Distance du point de mesure par rapport au centre du puits (m)
r_b	Rayon du puits (m)
r_i	Rayon intérieur du tuyau (m)
r_o	Rayon extérieur du tuyau (m)
SCI	Source cylindrique infinie
SLI	Source linéique infinie
SLF	Source linéique finie
t	Temps (s)
$t_{décalage}$	Jour de la plus basse température à compter du 1 ^{er} janvier
T_b	Température à la paroi du puits (°C)
T_{in}	Température du fluide à l'entrée du puits (°C)
T_{out}	Température du fluide à la sortie du puits (°C)
$T_{f,moy}$	Température moyenne du fluide dans le puits (°C)
T_g	Température du sol non perturbé (°C)
T_m	Température moyenne annuelle de l'air (°C)

T_0	Amplitude annuelle de la température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)
t_s	Constante de temps d'un champs de puits (s)
Y_n	Fonction de Bessel de deuxième type d'ordre n
z	Distance verticale du point de mesure par rapport à la surface du sol (m)

INDICES

f	Fluide caloporteur
g	Coulis
in	À l'entrée
out	À la sortie
p	Tuyau
s	Sol environnant
1, 2, 3 et 4	Numéro du tuyau dans une configuration 1-2 (un tube en U) ou dans une configuration 1-3/2-4 (deux tubes en U)

SYMBOLES GRECS

α	Diffusivité thermique (m^2/s)
β_0, β_1	Coefficients empiriques dans l'Équation (1.18)
Δt	Pas de temps (s)
ΔP	Perte de charge à l'intérieur du puits ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT	Variation de température ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT^*	Variation de température associée aux taux d'injections des pas de temps précédents ($^{\circ}\text{C}$)
ε	Rugosité du tuyau (mm)
μ	Viscosité dynamique ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)
ρ	Masse volumique (kg/m^3)

LISTE DES ANNEXES

Annexe A - Adaptation du modèle de Eslami-Nejad et Bernier (2011)	139
---	-----

INTRODUCTION

Les systèmes de pompes à chaleur géothermiques représentent une alternative durable, énergétiquement efficace et respectueuse de l'environnement par rapport aux systèmes conventionnels pour répondre aux besoins de chauffage et de climatisation des bâtiments.

Les systèmes de pompes à chaleur géothermiques sont typiquement constitués d'une pompe à chaleur reliée à un échangeur géothermique vertical en boucle fermée. La pompe à chaleur fournit les besoins en chaud (ou en froid) relatifs au chauffage (ou à la climatisation) d'un bâtiment. Pour cela, elle puise (ou rejette) de la chaleur dans le sol via le fluide caloporteur qui circule dans une série de puits géothermiques verticaux dont l'ensemble constitue l'échangeur géothermique. Une représentation schématique d'un système pompe à chaleur géothermique est illustrée à la Figure 0-1.

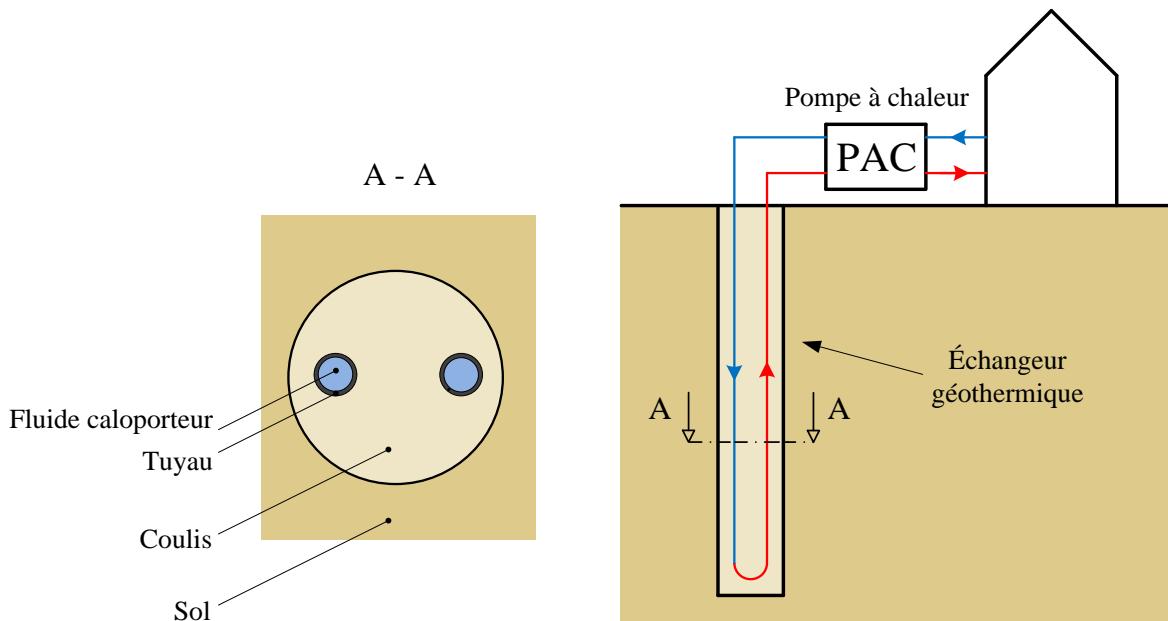


Figure 0-1: Représentation schématique d'un système de pompe à chaleur géothermique

Le dimensionnement de l'échangeur géothermique est l'un des principaux enjeux de la conception d'un tel système. En effet, le surdimensionnement de l'échangeur engendre des coûts supplémentaires prohibitifs, tandis que le sous-dimensionnement provoque des problèmes d'opération de la pompe à chaleur. Ces problèmes résultent de la température du fluide à la sortie de l'échangeur géothermique qui sort de la plage d'opération de la pompe à chaleur.

Pour le dimensionnement et l'évaluation de la consommation d'énergie de la pompe à chaleur, il est donc important de pouvoir prédire l'évolution de la température du fluide à la sortie de l'échangeur géothermique en ayant recours à un outil de modélisation permettant la simulation d'échangeurs géothermiques.

Le logiciel TRNSYS est un outil de référence dans le domaine de la simulation dynamique de bâtiments et de systèmes énergétiques. Il permet de coupler différents composants (échangeur géothermique, pompe à chaleur, maison, capteur solaire...), et de modéliser le comportement d'une grande diversité de configurations, en particulier un système pompe à chaleur géothermique qui chauffe (et climatise) un bâtiment.

Il existe présentement plusieurs modèles destinés à la simulation d'échangeurs géothermiques disponibles dans TRNSYS, mais ils ont tendance à présenter certaines lacunes dont les principales sont:

- Les phénomènes transitoires se produisant à l'intérieur des puits géothermiques sont négligés.
- Non-disponibilité de modèles de puits géothermiques à deux tubes en U, avec deux circuits indépendants. Ces derniers peuvent s'avérer intéressant pour la charge/décharge simultanés.
- La position des puits dans le champ est généralement limitée à des configurations régulières (puits équidistants disposés en rectangle ou de façon axisymétrique).

Objectif de cette étude

L'objectif principal du présent mémoire est l'élaboration et la validation d'une suite évolutive de modèles d'échangeurs géothermiques verticaux dans l'environnement TRNSYS.

Le cahier des charges de cette suite comprend les exigences suivantes :

- Inclure un modèle d'échangeur géothermique prenant compte les phénomènes transitoires se produisant à l'intérieur des puits géothermiques.
- Inclure un modèle d'échangeur géothermique à deux tubes en U, avec deux circuits indépendants.

- Être évolutive. C'est-à-dire, elle doit être utilisable par un utilisateur non-initié à la géothermie. C'est pourquoi elle doit comprendre un modèle d'échangeur géothermique élémentaire destiné à l'initiation des concepts associés aux échangeurs géothermiques. La suite contient également des modèles qui augmentent en complexité.
- Les modèles doivent permettre la simulation d'un échangeur géothermique vertical simple ou multi-puits dans lequel le positionnement spatial de chaque puits doit être possible.
- L'ensemble des modèles doit être accompagné d'un cas de validation.

Organisation de ce mémoire

Ce mémoire est divisé en 4 chapitres. Le chapitre 1 présente une revue de la littérature dont l'objectif est d'une part de passer en revue les outils utilisés pour l'élaboration de la suite évolutive de modèles d'échangeurs géothermiques verticaux, et d'autre part de présenter les principaux modèles d'échangeurs géothermiques présentement disponibles dans le logiciel TRNSYS. Le chapitre 2 détaille un nouveau modèle d'échangeur géothermique prenant compte des phénomènes transitoires se produisant à l'intérieur des puits géothermiques. Il est basé sur le concept des capacités et résistances thermiques qu'on désigne également sous le nom de TRCM. Le modèle est d'abord introduit pour un échangeur à deux tuyaux, puis il est adapté pour un échangeur à quatre tuyaux. Les deux autres chapitres sont consacrés à la présentation de la suite évolutive de modèles d'échangeurs géothermiques verticaux. La suite comprend huit modèles d'échangeurs géothermiques implémentés dans l'environnement TRNSYS sous la forme de TYPE (Tableau 0-1). Le chapitre 3 expose les quatre modèles permettant la simulation d'échangeurs géothermiques simples. Ces quatre modèles sont ensuite adaptés pour la simulation d'échangeurs géothermiques multi-puits dans le chapitre 4. La présentation de chaque modèle est accompagnée d'un cas de validation. Enfin les contributions des travaux présentés dans le mémoire et les recommandations sont détaillées en conclusion.

Tableau 0-1: Tableau récapitulatif de la suite évolutive TRNSYS

TYPE	Nombre de puits	Nombre de tuyaux	Nombre de circuits indépendants	Modèle sol	Modèle puits
241	1	2	1	Usager choisit entre SLI/SCI/SLF	R _b fourni par l'usager, constant durant la simulation
242	1	4	2	Usager choisit entre SLI/SCI/SLF	Modèle d'Eslami-nejad et Bernier (2011)
243	1	2	1	SCI	Modèle TRCM - 8 noeuds dans le puits - 2 à 20 tranches axiales - R _b calculé avec la méthode « multipole » - h _i (donc R _b) est réévalué à chaque pas de temps
244	1	4	2	SCI	Modèle TRCM - 8 noeuds dans le puits - 2 à 20 tranches axiales - R _b calculé avec la méthode « multipole » - h _i (donc R _b) est réévalué à chaque pas de temps
245	≥ 1	2	1	g-function générée par préprocesseur	R _b fourni par l'usager (sans h _i) - h _i (donc R _b) est réévalué à chaque pas de temps
246	≥ 1	4	2	g-function générée par préprocesseur	Modèle d'Eslami-nejad et Bernier (2011)
247	≥ 1	2	1	g-function générée par préprocesseur	Modèle TRCM - 8 noeuds dans le puits - 2 à 20 tranches axiales - R _b calculé avec la méthode « multipole » - h _i (donc R _b) est réévalué à chaque pas de temps
248	≥ 1	4	2	g-function générée par préprocesseur	Modèle TRCM - 20 noeuds dans le puits - 2 à 20 tranches axiales - R _b calculé avec la méthode « multipole » - h _i (donc R _b) est réévalué à chaque pas de temps

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de littérature est divisée en quatre sections. Les deux premières sections présentent les méthodes de modélisation du transfert de chaleur entre le fluide caloporeur circulant dans le puits et le sol environnant. Celui-ci peut être séparé en deux parties : le transfert de chaleur dans le sol entre la paroi du puits et le sol environnant (section 1), et le transfert de chaleur à l'intérieur du puits entre le fluide caloporeur et la paroi et du puits (section 2). La troisième section présente des techniques d'agrégations temporelles des charges. Ces trois premières sections ont pour objectifs d'introduire les outils utilisés pour l'élaboration de la suite évolutive de modèles d'échangeurs géothermiques verticaux. Finalement, la quatrième section présente les modèles de puits géothermiques présentement disponibles dans le logiciel TRNSYS.

1.1 Transfert de chaleur dans le sol

Les méthodes de modélisation du transfert de chaleur dans le sol ont généralement recours à des facteurs de réponse thermique. Ces facteurs de réponse thermique permettent de calculer la variation de température à la paroi d'un puits (ou des puits) due à une injection ou une extraction de chaleur constante. La première section de la présente partie expose les trois principales méthodes du calcul des facteurs de réponse thermique pour le cas d'un seul puits. La seconde section s'intéresse quant à elle au calcul des facteurs de réponse thermique pour le cas d'un champ de puits.

1.1.1 Pour un seul puits

1.1.1.1 Méthode de la source linéique infinie (SLI)

La méthode de la source linéique infinie a été introduite par Lord Kelvin (1882), puis adaptée aux échangeurs géothermiques par Ingersoll et Plass (1948). Cette méthode évalue la variation de température radiale engendrée par un nombre infini de sources ponctuelles localisées sur une ligne. Appliquée à la géothermie, la méthode de la source linéique infinie prédit la variation de température radiale autour d'un puits suffisamment profond pour être considéré de longueur infinie puisant ou rejetant une quantité constante de chaleur par unité de longueur au sol environnant.

La méthode de la source linéique infinie a recours à deux approximations:

- le transfert de chaleur est supposé radial,
- l'échange de chaleur s'opère au centre du puits et non pas à la paroi du puits.

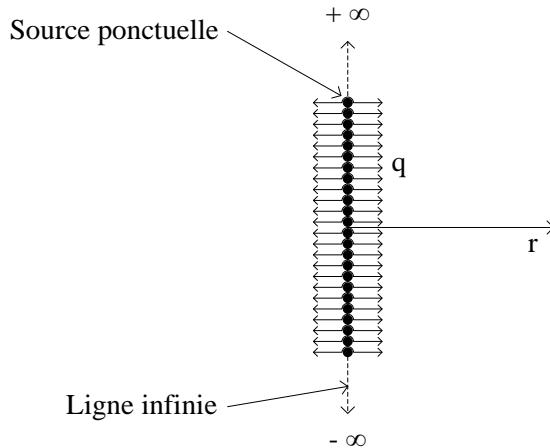


Figure 1-1: Représentation schématique de la source linéique infinie

La méthode de la source linéique infinie prédit une variation de température ΔT à une distance r du centre d'un puits:

$$\Delta T(r, t) = T(r, t) - T_g = \frac{q}{4 \pi k_s} \int_{r^2}^{\infty} \frac{e^{-\beta}}{\beta} d\beta \quad (1.1)$$

où T ($^{\circ}\text{C}$) est la température du sol à une distance r (m) du centre du puits, T_g ($^{\circ}\text{C}$) est la température initiale du milieu géologique non perturbé, q (W/m) est le taux d'extraction de chaleur par unité de longueur, k_s (W/m·K) est la conductivité thermique du milieu géologique, α_s (m^2/s) est la diffusivité thermique du milieu géologique, et t (s) est le temps. La solution est généralement évaluée à une distance r_b (m), le rayon du puits, afin d'obtenir la variation de température à la paroi du puits.

1.1.1.2 Méthode de la source cylindrique infinie (SCI)

La méthode de la source cylindrique infinie a été introduite par Carslaw et Jaeger (1946), puis par Ingersoll et al. (Ingersoll, Zobel, & Ingersoll, 1954). Cette méthode évalue la variation de température radiale engendrée par une source cylindrique de longueur infinie puisant ou rejetant

une quantité constante de chaleur par unité de longueur au sol environnant. Contrairement à la méthode de la source linéaire infinie, l'échange de chaleur s'opère à la paroi du cylindre, à une distance r_b du centre du puits (Figure 1-2).

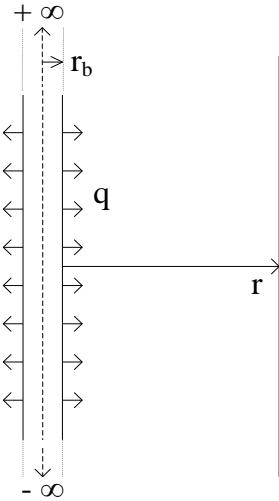


Figure 1-2: Représentation schématique de la source cylindrique infinie

La méthode de la source cylindrique infinie prédit une variation de température ΔT à une distance $p = r/r_b$:

$$\Delta T(r, t) = T(r, t) - T_g = \frac{q}{k_s} G(Fo, p) \quad (1.2)$$

Le facteur de réponse G , aussi appelé G-factor a pour expression (Carslaw & Jaeger, 1946) :

$$G(Fo, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty \left(e^{-\beta^2 \alpha_s t} - 1 \right) \frac{J_0(p\beta)Y_1(\beta) - Y_0(p\beta)J_1(\beta)}{\beta^2(J_1^2(\beta) - Y_1^2(\beta))} d\beta \quad (1.3)$$

où $Fo = \alpha_s t / r_b^2$ (-) est le nombre de Fourier, J_n et Y_n sont les fonctions de Bessel du premier et du second type d'ordre n .

Le G-factor est quelque peu difficile à évaluer numériquement. Différentes méthodes ont été développées afin de faciliter l'utilisation de la source cylindrique infinie. Ingersoll et al. (1954) ont pré-calculé et tabulé les valeurs du G-factor pour diverses valeurs de Fo et pour

$p = 1, 2, 5$ et 10 . Bernier (2001) a fourni des corrélations obtenues à partir de ces valeurs tabulées. L'Équation (1-4) montre une de ces corrélations lorsque $p = 1$:

$$G(Fo) = 10^{-0.89129+0.36081 \log(Fo)-0.05508 \log^2(Fo)+0.00359617 \log^3(Fo)} \quad (1.4)$$

Cooper (1976) a lui aussi proposé une approximation du G-factor pour $p = 1$:

Pour $Fo \leq 6.124633$

$$G(Fo) = \frac{\sqrt{F_o}}{2\pi} \left(C_a + C_o F_0^{\frac{1}{2}} + C_1 F_0 + C_2 F_0^{\frac{3}{2}} + C_3 F_0^2 + C_4 F_0^{\frac{5}{2}} + C_5 F_0^3 \right)$$

Pour $Fo > 6.124633$

$$G(Fo) = \frac{2z[8F_o(1+2F_o)-1-3z]+16F_o+\pi^2+3}{128\pi F_o^2} \quad (1.5)$$

où

$$[C_a..C_5] = [1.128379, -0.5, 0.2756227, -0.1499385, 0.0617932, -0.01508767, 0.001566857]$$

$$z = \ln \frac{4F_o}{e^\gamma}$$

et γ est la constante d'Euler et

Enfin, Veillon (1972) a proposé une technique d'inversion numérique reprise par Hellström (1991) pour déterminer le G-factor.

1.1.1.3 Méthode de la source linéique finie (SLF)

Si les temps considérés deviennent grands ou si le puits à modéliser est court, les effets axiaux aux extrémités du puits géothermique ne sont plus négligeables. Le profil de température autour du puits devient bidimensionnel. Eskilson (1987) estime que l'hypothèse 1-D radiale n'est plus applicable pour des temps $t \geq t_s / 10 = H^2 / 90 \alpha_s$. Philippe et al. (2009) montrent que les effets bidimensionnels deviennent importants après 1.6 ans pour un puits typique. Ils préconisent l'utilisation de la méthode de la source linéique finie pour des temps plus grands.

La méthode de la source linéique finie présentée par Eskilson (1987) et reprise par Zeng et al. (2002) permet de prédire la variation de température à une position (r, z) autour d'une source

linéique de longueur finie H enterrée à une certaine distance D du sol puisant ou rejetant une quantité constante de chaleur par unité de longueur au sol environnant.

La méthode de la source linéique finie suppose que la surface du sol a une température constante, T_g , la température du sol non perturbée, tout au long de l'intervalle étudié. Elle utilise la méthode des images pour intégrer la condition frontière de température constante à la surface du sol. Pour cela, une source miroir, située symétriquement par rapport au sol, de taux de transfert de chaleur opposé est utilisée (Figure 1-3).

Une source ponctuelle d'intensité q engendre une variation de température (Carslaw & Jaeger, 1946) :

$$\Delta T(r, t) = T(r, t) - T_g = \frac{q}{4 \pi k_s} \operatorname{erfc} \left(\frac{r}{2\sqrt{\alpha_s t}} \right) \quad (1.6)$$

Où erfc est la fonction d'erreur complémentaire.

Eskilson (1987) a évalué la variation de température en un point (r, z) autour d'une source linéique finie verticale d'une longueur H , débutant à une profondeur $D = 0$. Pour cela, il a superposé les variations provoquées par les sources ponctuelles de la source linéique finie et les variations provoquées par les sources ponctuelles de la source miroir :

$$\Delta T(r, z, t) = T(r, z, t) - T_g = \frac{q}{4 \pi k_s} \int_0^H \left[\frac{\operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha_s t}} \right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha_s t}} \right)}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right] dh \quad (1.7)$$

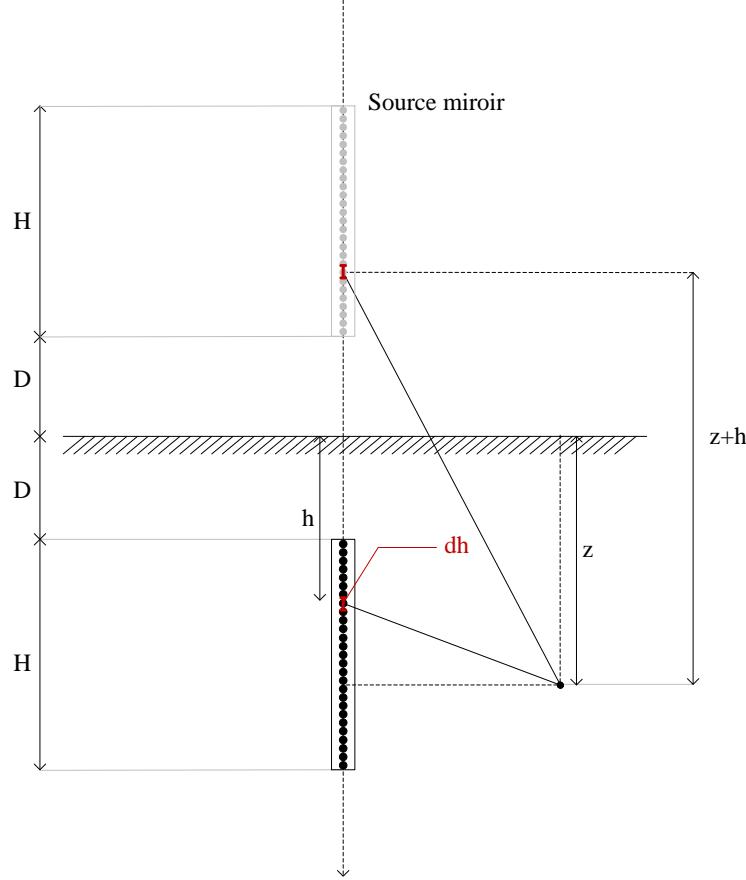


Figure 1-3: Représentation schématique de la source linéaire finie

L'Équation (1.7) donne la variation de température en un point, or il est généralement utile de calculer la variation de température moyenne sur la hauteur du puits, le plus souvent à la paroi du puits. C'est ce qu'ont réalisé Zeng et al. (2002) en intégrant l'Équation (1.7) :

$$\Delta T(r, t) = T(r, t) - T_g = \frac{q}{4 \pi k_s} \frac{\int_0^H \int_0^H \left[\frac{\operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha_s t}} \right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha_s t}} \right)}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right] dh dz}{H} \quad (1.8)$$

Lamarche et Beauchamp (2007) ont proposé une solution simplifiée comportant une intégrale simple au lieu d'une intégrale double parfois lourde à calculer. Cependant, leur solution est applicable uniquement dans le cas où $D = 0$. Costes et Peysson (2008) sont parvenus à généraliser la solution pour le cas $D > 0$. La solution est présentée dans le mémoire de Chapuis (2009).

Claesson et Javed (2011) ont également proposé une solution sous la forme d'une intégrale simple pour le cas $D \geq 0$. D'après eux, la variation de température moyenne (sur la hauteur du puits) à une distance r du centre du puits peut être calculée par :

$$\Delta\bar{T}(r, t) = \bar{T}(r, t) - T_g = \frac{q}{4\pi k_s} \int_{\frac{1}{\sqrt{4\alpha_s t}}}^{\infty} \exp(-r^2 s^2) \frac{Y(Hs, Ds)}{Hs^2} ds$$

$$Y(h, d) = 2 \operatorname{ierf}(h) + 2 \operatorname{ierf}(h + 2d) - \operatorname{ierf}(2h + 2d) - \operatorname{ierf}(2d) \quad (1.9)$$

$$\operatorname{ierf}(X) = X \operatorname{erf}(X) - \frac{1}{\sqrt{\pi}} (1 - \exp(-X^2))$$

1.1.2 Pour un champ de puits

Les g-functions, introduites par Eskilson (1987), sont utilisées pour déterminer la réponse thermique d'un champs de puits. Les g-functions sont des facteurs de réponse reliant le taux d'extraction de chaleur par unité de longueur à la paroi des puits avec la variation de la température à la paroi des puits :

$$T_b = T_g + \frac{q}{2\pi k_s} g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}, \frac{B}{H}, \text{configuration du champs}\right) \quad (1.10)$$

où g est la g-function, t_s (s) est la constante de temps du champ de puits géothermiques définie par $t_s = H^2/9\alpha_s$, et B (m) est l'espacement entre les puits géothermiques. Les g-functions d'Eskilson sont fonction de 3 paramètres adimensionnels (t/t_s , r_b/H , B/H) et de la configuration du champ (i.e. 2x4, 5x6...). Bernier (2014) recommande l'ajout d'un quatrième paramètre adimensionnel, D/H , notamment pour les champs de puits courts.

Pour évaluer les g-functions, Eskilson a solutionné l'équation bidimensionnelle de la chaleur:

$$\frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1.11)$$

Eskilson résout cette équation numériquement par la méthode des différences finies en supposant que la température à la paroi des puits, T_b , est la même pour tous les puits et qu'elle est uniforme sur toute la longueur des puits. Lors de la résolution, le taux d'extraction de chaleur de

l'ensemble des puits est constant. Pour autant, le taux d'extraction de chaleur peut différer d'un puits à l'autre en fonction de l'emplacement de celui-ci dans le champ. Le taux d'extraction de chaleur peut également différer sur la longueur du puits.

Les g-functions sont représentées sous formes de courbes adimensionnelles (Figure 1-4). Les g-functions d'Eskilson ont été pré-calculées pour une grande variété de géométries et de configurations de champs et sont utilisées par des logiciels de simulation énergétique tels EnergyPlus et eQuest.

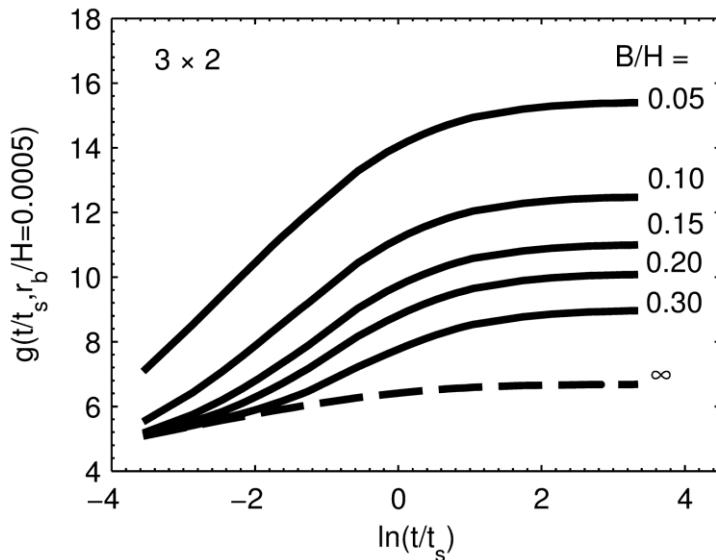


Figure 1-4: g-functions d'Eskilson pour un champ de puits 3x2.

Cimmino et al. (2013) ont introduit un nouveau concept pour le calcul des facteurs de réponse d'un champ de puits. Ils proposent de modéliser chaque puits par une source ligne finie, et de définir les conditions limites suivantes pour le calcul des g-functions :

- Conditions frontières BC I : Taux d'extraction uniforme à la paroi des puits et identique pour chaque puits.
- Conditions frontières BC II : Taux d'extraction uniforme à la paroi des puits (mais il peut différer d'un puits à l'autre) et température moyenne à la paroi des puits identiques pour tous les puits.

Par la suite, Cimmino et Bernier (2014) proposent de diviser les puits en segments afin de tenir en compte de la variation du taux d'extraction de chaleur le long des puits, et de modéliser chaque segment de puits par une source linéique finie.

Afin d'évaluer l'interaction « segment à segment », ils ont développé une expression permettant de calculer la variation de température à la paroi d'un segment de puits causé par le taux d'extraction de chaleur d'un autre segment de puits:

$$\Delta T_{i \rightarrow j, u \rightarrow v}(t) = \frac{q_{i,u}}{2\pi k_s} h_{i \rightarrow j, u \rightarrow v}(t) \quad (1.12)$$

où $\Delta T_{i \rightarrow j, u \rightarrow v}$ est la variation de température à la paroi du segment v du puits j , causé par le taux d'extraction de chaleur du segment u du puits i , noté $q_{i,u}$. $h_{i \rightarrow j, u \rightarrow v}$ est le facteur de réponse « segment à segment » basé sur la solution de la source linéique finie. L'Équation (1.12) est la généralisation de l'Équation (1.9) pour le cas de segments de longueurs différentes et de profondeurs d'enterrement différentes. La Figure 1-5 illustre le cas d'un champ de puits où chaque puits est divisé en 3 segments. A noter que Cimmino et Bernier préconise de diviser les puits en 12 segments pour effectuer le calcul des g-functions.

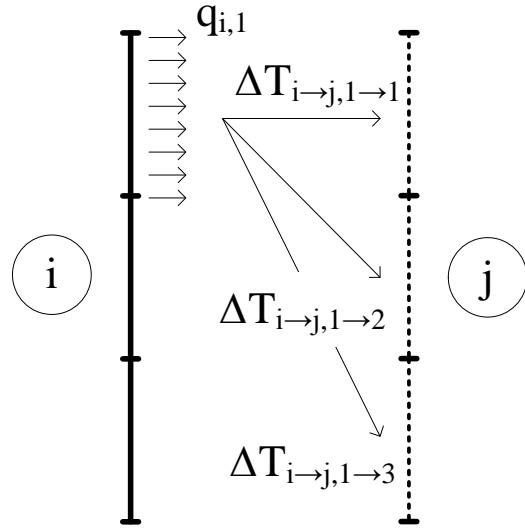


Figure 1-5 Représentation de 2 puits divisés en 3 segments modélisés par des sources linéiques finies

L'Équation (1.12) prend en compte l'effet d'un seul segment. Pour prendre en compte les effets de tous les segments, il faut réaliser une superposition spatiale des charges :

$$\Delta T_{b,j,v}(t) = \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{u=1}^{n_q} \frac{q_{i,u}}{2\pi k_s} h_{i \rightarrow j, u \rightarrow v}(t) \quad (1.13)$$

où $\Delta T_{b,j,v}$ est la variation de température à la paroi du segment v du puits j , n_q est le nombre de segments par puits et n_b est le nombre de puits du champs de puits.

De plus comme le taux d'extraction $q_{i,u}$ varie, la variation de température est obtenue par la superposition temporelle des charges.

Cimmino et Bernier (2014) proposent de définir comme conditions limites : une température uniforme à la paroi des puits et identique pour chaque puits (conditions frontières BC III). Le taux d'extraction de chaleur peut quant à lui varier entre les puits ainsi que sur la longueur des puits. Les conditions limites BC III sont identiques à celles proposées par Eskilson (1987).

Afin d'alléger le temps de calcul, le système d'équations est résolu dans le domaine de Laplace en utilisant un algorithme de type 'Fast Fourier Transform' (FFT) comme suggéré par Marcotte et Pasquier (2008).

Cimmino et Bernier (2014) ont comparé les g-functions obtenues avec leur modèle semi-analytique, aux g-functions obtenus numériquement par Eskilson pour un grand nombre de configuration de champs de puits. Par exemple, pour un champ de puits 10×10 (avec $B/H=0.05$), l'écart est de 2.2% après 20 ans et de 4.7% lorsque l'état permanent est atteint. L'écart entre les deux modèles est toujours inférieur à 5% pour toutes les configurations de champs de puits testés, à l'exception des champs constitués d'une seule rangée de puits. De plus, le modèle semi-analytique de Cimmino et Bernier propose un avantage majeur par rapport à la méthode numérique d'Eskilson : le temps de calcul est largement réduit, moins de 10 min pour générer la g-function d'un champ de 100 puits contre plusieurs heures avec le modèle numérique d'Eskilson.

Cimmino et Bernier (2013) ont implémenté leur modèle semi-analytique de g-function dans un préprocesseur Matlab. Le préprocesseur génère les g-functions pour n'importe quelle configuration de champ de puits : arrangement des puits quelconques, possibilité d'avoir des

puits de longueurs différentes avec des profondeurs d'enterrement différents. C'est à l'utilisateur de paramétriser la configuration du champ de puits. Le préprocesseur calcule la g-fonction du champ de puits à étudier en utilisant les conditions frontières BC III ou BC II.

1.2 Transferts de chaleur à l'intérieur du puits

1.2.1 Résistance thermique d'un puits

1.2.1.1 Définition

Les transferts de chaleur survenant à l'intérieur d'un puits géothermique sont généralement modélisés par une résistance thermique équivalente, R_b . Dans ce cas, la température moyenne du fluide, T_f , est reliée à la température moyenne de la paroi puits, \bar{T}_b , par l'expression :

$$T_f = \bar{T}_b + qR_b \quad (1.14)$$

La résistance thermique d'un puits R_b entre le fluide caloporteur et la paroi du puits peut être séparée en 3 parties :

$$R_b = R_f + R_p + R_g \quad (1.15)$$

où R_f est la résistance convective du fluide entre le fluide caloporteur et la paroi interne des tuyaux (Équation 1.16),

R_p est la résistance des tuyaux (Équation 1.17),

R_g est la résistance du matériau de remplissage entre la paroi externe des tuyaux et la paroi du puits géothermique.

La résistance convective du fluide entre le fluide caloporteur et la paroi interne des tuyaux est donnée par :

$$R_f = \frac{1}{2 n \pi r_i h_i} \quad (1.16)$$

Où n (-) est le nombre de tuyaux, r_i (m) est le rayon interne des tuyaux, et h_i (W/m²K) est le coefficient de film fonction du nombre de Nusselt, Nu .

La résistance thermique des tuyaux est définie par la résistance thermique d'éléments cylindriques creux :

$$R_p = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2 n \pi k_p} \quad (1.17)$$

où r_o (m) est le rayon externe des tuyaux et k_p (W/m·K) est la conductivité thermique des tuyaux.

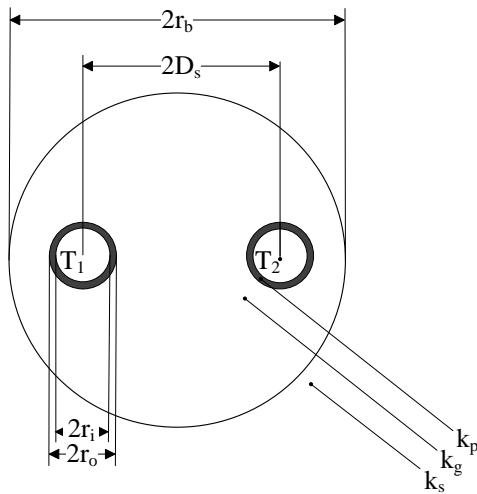


Figure 1-6: Définition des principaux paramètres d'un puits géothermique

Différents modèles sont proposés dans la littérature pour le calcul de la troisième résistance. Ces modèles sont présentés aux sections suivantes.

1.2.1.2 Modèle de Paul

Paul (1996) suggère un modèle empirique basé sur des mesures expérimentales. Ce dernier permet de prendre en compte 3 configurations de puits (Figure 1-7).

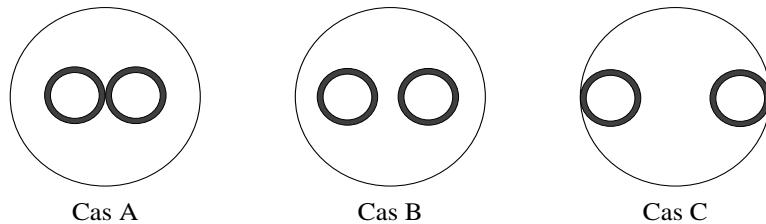


Figure 1-7: Configuration pris en compte par Paul (1996)

L'expression de Paul est donnée par :

$$R_g = \frac{l}{k_g \beta_0 \left(\frac{r_b}{r_o}\right)^{\beta_1}} \quad (1.18)$$

où β_0 et β_1 sont des coefficients empiriques donnés par le Tableau 1-1 et k_g (W/m·K) est la conductivité du coulis.

Tableau 1-1: Coefficients empiriques de Paul (1996)

Coefficients	Configuration des tuyaux		
	Cas A	Cas B	Cas C
β_0	20.1004	17.4427	21.9059
β_1	-0.9447	-0.6052	-0.3796

1.2.1.3 Modèle de la source linéique infinie d'Hellström

Hellström (1991) utilise l'approximation de la source linéique infinie pour calculer la résistance du matériau de remplissage :

$$R_g = \frac{l}{4\pi k_g} \left[\ln\left(\frac{r_b}{r_o}\right) + \ln\left(\frac{r_b}{2 D_s}\right) + \sigma \ln\left(\frac{r_b^4}{r_b^4 - D_s^4}\right) \right] \quad (1.19)$$

Où D_s (m) est le demi-espacement entre les tuyaux (centre à centre) et σ est défini par :

$$\sigma = \frac{k_g - k_s}{k_g + k_s} \quad (1.20)$$

Le modèle d'Hellström est notamment utilisée par le modèle DST (Pahud, Hellström, & Mazzarella, 1996), représenté par le TYPE 557 dans le logiciel TRNSYS.

1.2.1.4 Modèle « multipole »

Un autre modèle notable pour le calcul de la résistance thermique du puits est le modèle « multipole » de Bennet et al. (1987).

Chaque tuyau est représenté par une source linéaire infinie. La méthode s'appelle « multipole » parce qu'à un tuyau est associé un certain nombre de sources linéaires images, ce nombre est l'ordre du « multipole ».

La méthode résout l'équation de la chaleur à 2 dimensions en régime permanent :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (1.21)$$

Avec les hypothèses suivantes :

- La température du fluide circulant dans chaque tuyau est uniforme.
- La température à la frontière du milieu considéré est constante.

Pour un puits à 2 tuyaux, à l'ordre « multipole » 1, la résistance du puits est donnée par la relation suivante (Hellström, 1991):

$$R_b = \frac{1}{4\pi k_s} \left(\beta + \ln \lambda_1 + \ln \frac{\lambda_2}{2} + \sigma \ln \frac{\lambda_2^4}{\lambda_2^2 - 1} \right) - \frac{1}{4\pi k_s} \frac{\lambda_3^2 \left(1 - \frac{4\sigma}{\lambda_2^4 - 1} \right)^2}{\frac{1+\beta}{1-\beta} + \lambda_3^2 \left(1 + \frac{16\sigma\lambda_2^4}{(\lambda_2^4 - 1)^2} \right)} \quad (1.22)$$

où,

$$\beta = 2\pi k_g (R_f + R_p) \quad (1.23)$$

$$\lambda_1 = \frac{r_b}{r_o}, \quad \lambda_2 = \frac{r_b}{D_s}, \quad \lambda_3 = \frac{r_o}{2D_s} = \frac{\lambda_2}{2\lambda_1} \quad (1.24)$$

La première partie de l'Équation (1.22) est l'approximation de la source linéaire infinie d'Hellström (Équation (1.19)) tandis que la seconde partie correspond au terme correctif de l'ordre 1 de la méthode « multipole ».

La méthode « multipole » ne se limite pas seulement au cas d'un puits à 2 tuyaux. La méthode s'adapte à n'importe quelle configuration de puits, c'est-à-dire à n'importe quel nombre de tuyaux et à n'importe quel espacement entre les tuyaux (y compris le cas où les tuyaux ne sont pas placés symétriquement par rapport à l'axe du puits).

Bennet et al. (1987) ont publié le programme original Fortran de la méthode « multipole ». Avec ce programme l'utilisateur doit choisir la configuration du puits étudié, les conditions limites, et l'ordre du « multipole ». Le programme « multipole » calcule en sortie les taux d'extraction de chaleur de tous les tuyaux, ainsi que la température à l'intérieur du puits.

Pour un puits à n tuyaux, la résistance thermique du puits est alors donnée par :

$$R_b = \frac{\sum_{i=1}^n T_i / n - T_b}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (1.25)$$

Cette formulation est la généralisation de l'Équation (1.14) pour un puits à n tuyaux.

Claesson et Hellström (2011) ont récemment détaillé les étapes du calcul de la méthode « multipole » en s'appuyant sur des exemples simples de calcul de résistance thermique d'un puits.

1.2.2 Le delta-circuit

Eskilson et Claesson (1988) ont introduit l'approche du delta-circuit pour modéliser les interactions thermiques à l'intérieur d'un puits géothermique. Ils ont définis trois résistances (Figure 1-8) : la résistance R_1 (et R_2) entre le fluide caloporteur du tuyau 1 (et 2) et la paroi du puits, et la résistance R_{12} entre le fluide des deux tuyaux.

Ces résistances thermiques internes dépendent de la résistance thermique équivalente du puits R_b , et de la résistance thermique interne du puits, R_a , qui est également la résistance totale entre les 2 tuyaux.

R_a peut être calculé par :

$$R_a = \frac{2 (T_1 - T_2)}{q_1 - q_2} \quad (1.26)$$

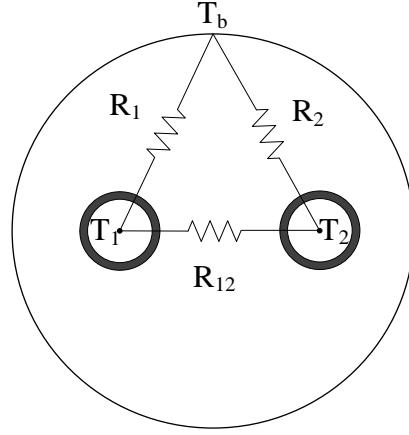


Figure 1-8: Approche originale du delta-circuit (Eskilson & Claesson, 1988)

A noter que R_a est aussi la résistance équivalente à l'association en parallèle des résistances R_{12} avec $R_1 + R_2$:

$$R_a = \frac{(R_1 + R_2) R_{12}}{R_1 + R_2 + R_{12}} \quad (1.27)$$

Si $T_1 = T_2 = T_f$, la résistance équivalente du puits entre le fluide caloporteur T_f et la paroi du puits T_b est constitué de l'association en parallèle des résistances R_1 et R_2 :

$$R_b = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.28)$$

Ces deux expressions (1.28 et 1.27) peuvent être simplifiées lorsque les 2 tuyaux sont installés de façon symétrique par rapport au centre du puits, et conduisent aux expressions :

$$R_1 = 2 R_b \quad (1.29)$$

$$R_{12} = \frac{4 R_a R_b}{4 R_b - R_a} \quad (1.30)$$

A partir d'un certain espacement entre les tuyaux, les Équations (1.14) et (1.26) peuvent conduire à des valeurs négatives (et inexactes) de R_{12} . Lamarche et al. (2010) expliquent ces résultats par le recourt à l'hypothèse \bar{T}_b uniforme sur la paroi. Cette simplification s'avère être inexacte lorsque les tuyaux se rapprochent de la paroi du puits. C'est pourquoi ils suggèrent de définir

deux températures sur la paroi du puits (Figure 1-9) : \bar{T}_{b1} correspondant à la température moyenne de la paroi du puits sur le demi-cercle à gauche du tuyau 1 et \bar{T}_{b2} correspondant à la température moyenne de la paroi du puits sur le demi-cercle à droite du tuyau.

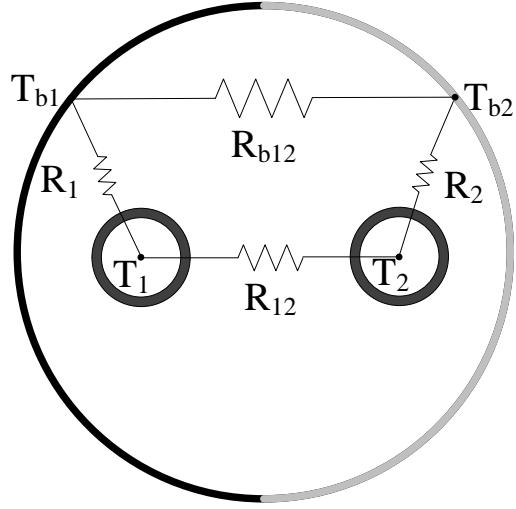


Figure 1-9: Delta-circuit modifié de Lamarche et al. (2010)

La résistance R_{12} peut alors être calculée grâce à l'expression suivante :

$$R_{12} = \frac{2 (T_1 - T_2)}{q_1 - q_2 - \frac{T_1 - T_2 - (T_{b1} - T_{b2})}{R_1}} \quad (1.31)$$

Cette nouvelle résistance R_{12} est ensuite incorporée dans le delta-circuit pour calculer la résistance interne du puits R_a corrigé (via l'Équation 1.27)

Eskilson et Claesson (1988) utilisent le concept du delta-circuit pour évaluer le profil de température du fluide caloporteur le long du puits. Pour cela ils résolvent le système d'équations différentielles suivant :

$$\begin{aligned} \dot{m} C_f \frac{\partial T_1(z)}{\partial z} &= q_1(z) - q_{12}(z) = \frac{T_b(z) - T_1(z)}{R_1} - \frac{T_1(z) - T_2(z)}{R_{12}} \\ -\dot{m} C_f \frac{\partial T_2(z)}{\partial z} &= q_2(z) + q_{12}(z) = \frac{T_b(z) - T_2(z)}{R_1} + \frac{T_1(z) - T_2(z)}{R_{12}} \end{aligned} \quad (1.32)$$

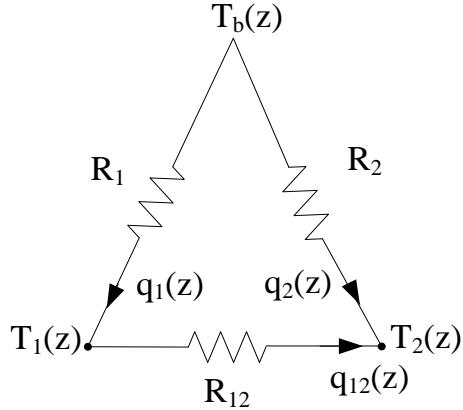


Figure 1-10: Présentation des paramètres de l'Équation (1.32)

Eskilson et Claesson (1988) obtiennent le profil de température du fluide caloporteur pour une température à la paroi et un flux de chaleur arbitraire le long du puits. Hellström (1991) estime le nouveau profil de température quand la température à la paroi est uniforme puis quand le flux de chaleur est uniforme.

Zeng et al. (2003) étendent le problème pour des puits à 4 tuyaux. Ils résolvent le système d'équations en supposant la température à la paroi uniforme. Certaines erreurs dans l'article de Zeng et al. (2003) ont été par la suite corrigées (Diao, Zeng, & Fang, 2011). Eslami-nejad et Bernier (2011) ont généralisé l'approche de Zeng et al. (2003) pour des puits à 4 tuyaux avec 2 circuits indépendants.

1.2.3 Les modèles transitoires

Le concept du delta-circuit ne prend cependant pas en compte les phénomènes transitoires se produisant à l'intérieur d'un puits géothermique. En ajoutant des termes capacitifs au delta-circuit original, il est possible de considérer les phénomènes transitoires. Ces modèles TRCM « Modèles Résistances et Capacités Thermiques » sont un compromis entre le modèle du delta-circuit (limité au régime permanent), et les modèles numériques complexes couteux en terme de temps de calcul.

C'est une approche TRCM qu'a adoptée Bauer et al. (2011) en ajoutant deux capacités au delta-circuit original (Figure 1-11). Les capacités visent à modéliser la capacité thermique du coulis. Cette approche peut également s'adapter à un puits à 4 tuyaux, et à un puits coaxial. Bauer et al.

(2011) ont étendu leur modèle à 2 dimensions à un modèle quasi 3-D qui prend en compte le déplacement du fluide caloporeur dans le tube en U.

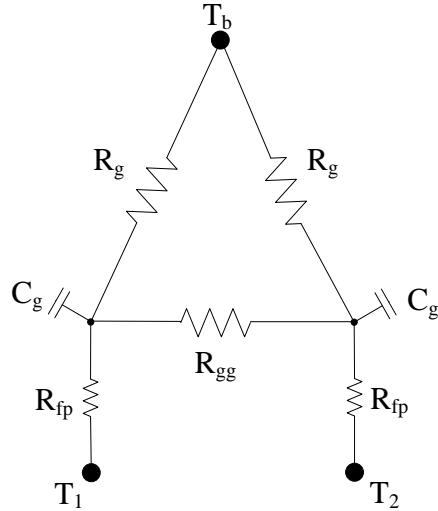


Figure 1-11: Modèle TRCM pour un puits à 2 tuyaux de Bauer et al. (2011)

Afin d'améliorer la précision du modèle TRCM, Pasquier et Marcotte (2012) ont proposé certaines modifications au modèle initial de Bauer et al. (2011). Dans leur approche MTRCM (modèle « TRCM Modifié »), ils suggèrent de prendre en compte la capacité thermique du fluide et des tuyaux, et d'affiner le maillage de résistance. Pour cela toutes les résistances du modèle de Bauer et al. (2011) sont divisées en sous-résistances et une sous-capacité est associée à chaque nœud du maillage afin de mieux distribuer les capacités sur le maillage. Le modèle MTRCM a été également étendu à un modèle quasi 3-D (Pasquier & Marcotte, 2014).

Zarella et al. (2011) ont aussi développé une approche capacité et résistance, appelé CaRM « Modèle Capacité Résistance ». Pour cela, ils se sont inspirés d'un modèle préexistant (De Carli, Tonon, Zarella, & Zecchin, 2010) dans lequel le domaine de simulation est découpé en tranches axiales et où chaque tranche est subdivisée radialement. Le domaine est ensuite modélisé par un maillage de capacités et de résistances. Le modèle de De Carli et al. (2010) représentait l'intérieur du puits uniquement à l'aide de résistances, négligeant ainsi les phénomènes transitoires se produisant à l'intérieur du puits. C'est pourquoi Zarella et al. (2011) ont suggéré de rajouter 2 capacités pour modéliser la capacité thermique du coulis, une première correspondant à la zone central du coulis entre les tuyaux, et une seconde correspondant à la zone périphérique du coulis entre les tuyaux et la paroi et du puits (Figure 1-12).

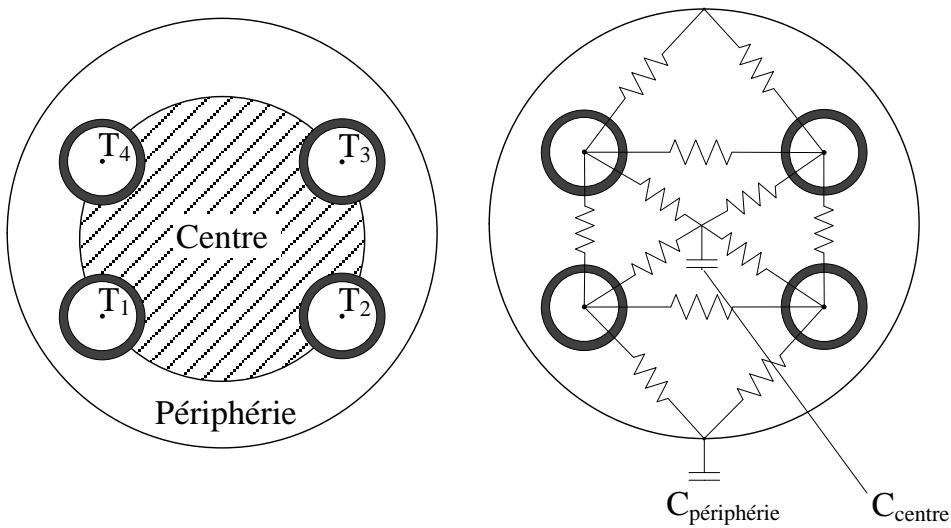


Figure 1-12: Modèle CaRM de Zarella et al. (2011)

Un autre modèle capacité et résistance notable est le modèle EWS (Wetter & Huber, 1997), implémenté dans le logiciel TRNSYS sous le nom TYPE 451 (voir la section 1.4.2).

Young (2004) a pour sa part adopté une démarche analytique (connu sous l'acronyme BFTM) pour modéliser les phénomènes transitoires. Il a adapté le modèle du câble électrique enterré de Carlaw et Jaeger (1946) au cas d'un puits géothermique vertical. Le câble électrique se divise en trois parties, le corps métallique entouré par un isolant, lui-même entouré par une gaine de protection. Dans le modèle du câble enterré, le corps métallique et la gaine de protection sont modélisés par des capacités thermiques, tandis que l'isolant est représenté par une résistance thermique. Young (2004) a remplacé le corps du câble par le fluide caloporteur, et la gaine par le coulis, tandis que la résistance thermique de l'isolant devient la résistance du puits géothermique. Pour améliorer la précision du modèle, Young (2004) a introduit un coefficient de correction afin de prendre en compte la répartition de la capacité thermique du coulis par rapport à la résistance du puits.

Salim-Shirazi et Bernier (2013) ont également ramené le problème du puits à 2 tuyaux, à un problème à un seul tuyau. Pour cela ils ont défini le rayon équivalent r_{eq} du tuyau, en égalant la résistance du puits à deux tuyaux avec la résistance qu'aurait le puits s'il avait un seul tuyau (Équation (1.33)).

$$R_{b,2 \text{ tuyaux}} = R_{b,1 \text{ tuyau}} = \frac{\ln(r_b/r_{eq})}{2\pi k_g} \rightarrow r_{eq} = r_b e^{-2\pi k_g R_b} \quad (1.33)$$

Une seule tranche axiale est utilisée et la capacité thermique du fluide est prise en compte. La température du fluide est supposée uniforme sur toute la longueur du puits. Le modèle résout analytiquement l'équation de transfert de chaleur à 1 dimension en tenant compte de la capacité thermique du coulis avec la méthode de Patankar (1980).

Salim-Shirazi et Bernier (2013) ont utilisé leur modèle pour réaliser des simulations annuelles d'une pompe à chaleur géothermique avec et sans la capacité thermique du puits. Lorsque la capacité thermique du puits est prise en compte, le COP annuel de la pompe à chaleur est 4.5% plus important par rapport au cas où la capacité thermique du puits est négligée.

1.3 L'agrégation des charges

La température à la paroi du puits est obtenue grâce à la relation suivante :

$$T_b(t) = T_g + \Delta T(r_b, t) \quad (1.34)$$

avec

$$\Delta T(r_b, t) = q h(r_b, t) \quad (1.35)$$

où h est le facteur de réponse thermique (calculé grâce aux solutions analytiques SLI, SCI, et SLF ou encore aux g-functions).

Généralement le taux d'extraction de chaleur q est variable. La variation de température à la paroi du puits est donnée par la superposition temporelle des charges q_i :

$$\Delta T(r, t) = \sum_{i=1}^n (q_i - q_{i-1}) h(r, t - t_i) \quad (1.36)$$

où t_i (s) est le temps écoulé à la fin de la charge q_i . A noter que q_0 est nul.

Il n'y a aucune récurrence dans cette formule, la somme doit être recalculée à chaque pas de temps, d'où la nécessité d'agréger les charges pour réduire le temps de calcul relatif à la superposition temporelle.

Bernier et al. (2004) proposent la technique d'agrégation MLAA (Figure 1-13). Dans cette approche, seules les charges immédiates (les 6 dernières heures) ne sont pas agrégées. Les charges « lointaines » sont agrégées en 4 blocs : le bloc journalier, le bloc hebdomadaire, le bloc mensuel, suivi enfin du bloc annuel (qui rassemble les charges restantes).

Avec cette technique d'agrégation, la superposition temporelle se simplifie considérablement :

$$\begin{aligned}\Delta T(r, t) = & \sum_{j=2}^6 (q_{h_j} - q_{h_{j-1}}) h(r, t - t_{h_{j-1}}) + (q_{h_1} - q_d) h(r, t - t_d) \\ & + (q_d - q_w) h(r, t - t_w) + (q_w - q_m) h(r, t - t_m) \\ & + (q_w - q_y) h(r, t - t_y) + (q_y - 0) h(r, t - 0)\end{aligned}\quad (1.37)$$

La formule ne contient plus que 10 termes à sommer.

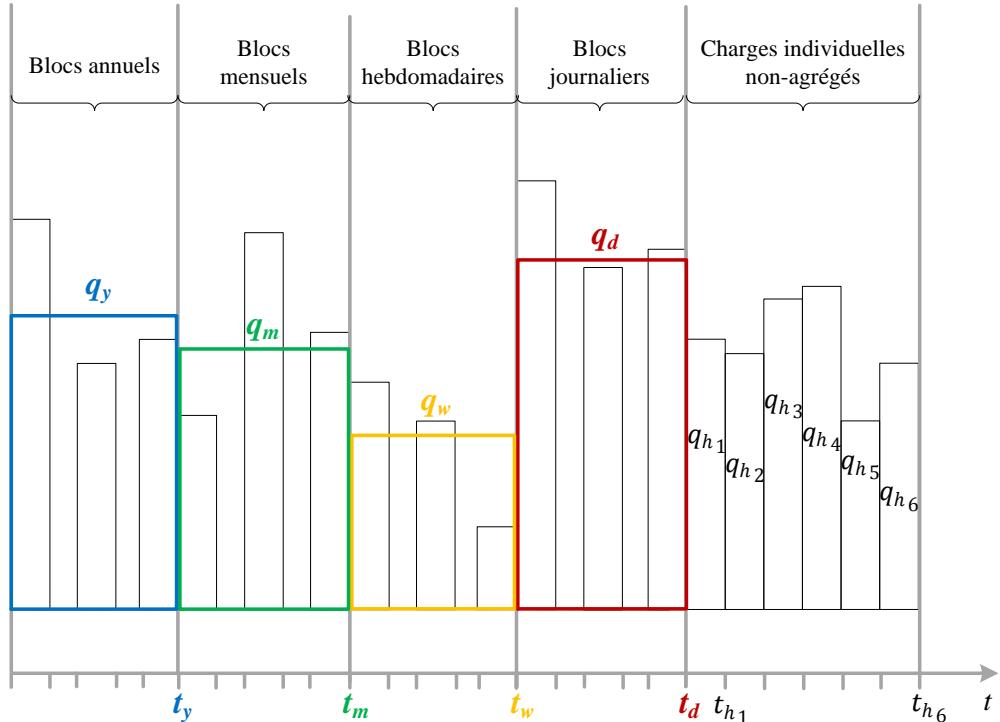


Figure 1-13: Illustration de la méthode MLAA (Bernier et al, 2004)

Une autre technique d'agrégation notable est celle de Liu (2005). L'approche de Liu consiste à moyennen les charges en des blocs de différentes tailles : petits, moyens et grands (Figure 1-14). Il y a une hiérarchie entre les blocs de différentes tailles. Les « petits blocs » proviennent de l'agrégation des charges individuelles. Les « moyens blocs » résultent de l'agrégation des petits blocs. Enfin, les « grands blocs » découlent de l'agrégation des moyens blocs.

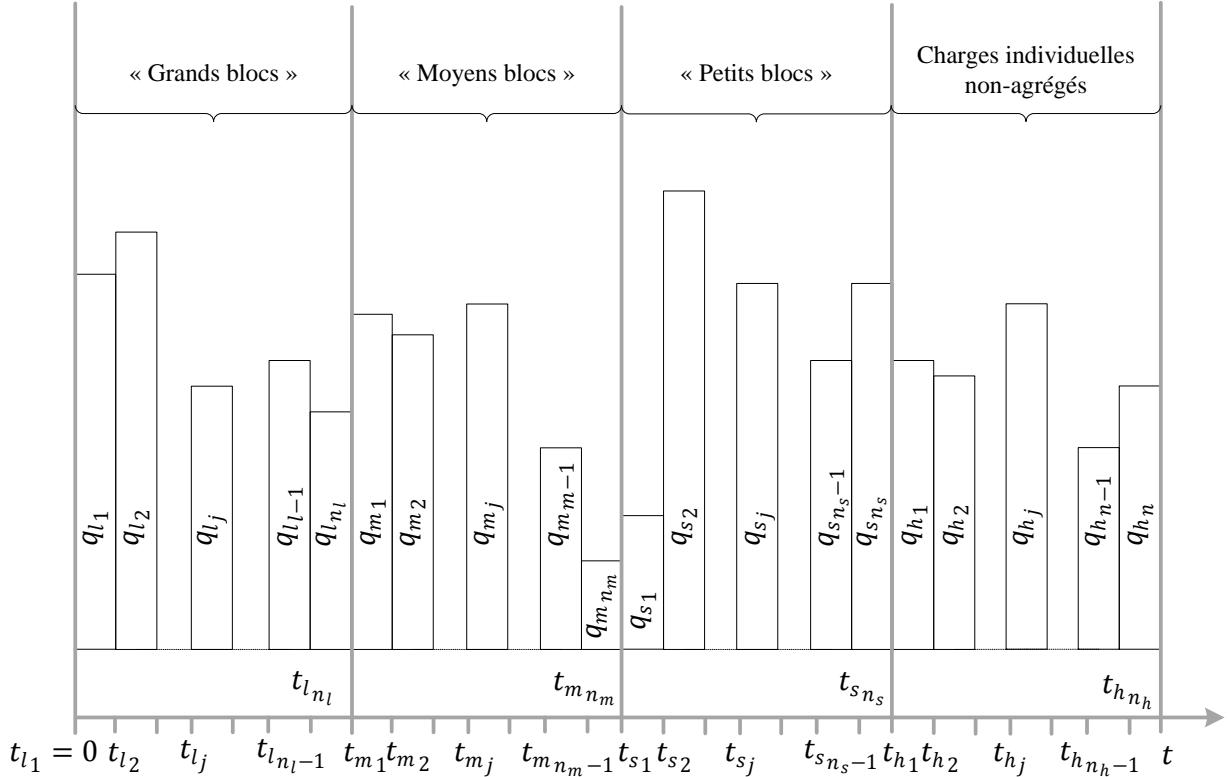


Figure 1-14: Illustration de la méthode d'agrégation de Liu (2005)

Afin de minimiser l'erreur causée par l'agrégation des charges, Liu a défini une période d'attente entre chaque niveau de hiérarchie. Les charges immédiates (les dernières heures) ne sont pas agrégées, il s'agit de la période d'attente pour passer des charges individuelles à un « petit bloc ». De même, un certain nombre de « petits blocs » (et « moyens de blocs ») sont conservés et ne sont pas moyennés lors du calcul d'un « moyen bloc » (et d'un « grand bloc »).

Pour des simulations avec un pas de temps d'une heure, Liu suggèrent de prendre des « petits blocs » issus de l'agrégation de 24 charges individuelles avec une période d'attende de 12 charges individuelles. Les « moyens blocs » sont composés de 5 « petits blocs » avec une période

d'attente de 3 « petits blocs ». Enfin les « grands blocs » proviennent de l'agrégation de 73 « moyens blocs » et la période d'attente associée est de 40 « moyens blocs ».

En d'autres termes, le premier « petit bloc » se calcule au bout de 36 h et correspond à la moyenne des charges horaires des 24 premières heures. Ensuite un nouveau « petit bloc » est calculé toutes les 24 h en conservant toujours intacte les 12 dernières charges immédiates qui ne sont pas agrégées.

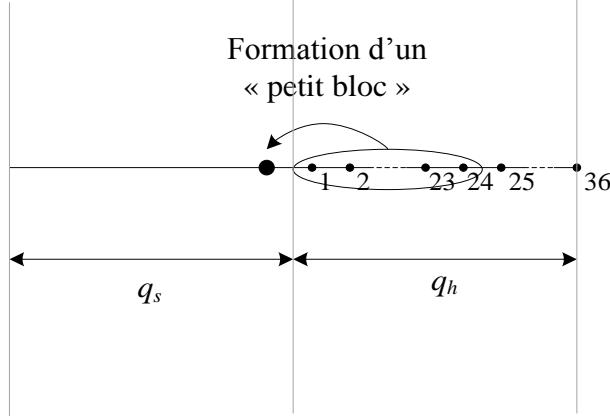


Figure 1-15: Formation d'un « petit bloc » dans l'agrégation de Liu (2005)

Le premier « moyen bloc » se calcule lorsqu'il y a 8 « petits blocs » formés et correspond à la moyenne des charges des 5 premiers « petits blocs ». Ensuite un nouveau « moyen bloc » est calculé tous les 5 « petits blocs » (soit toutes les 120 h) en conservant intacte les 3 derniers « petits blocs ».

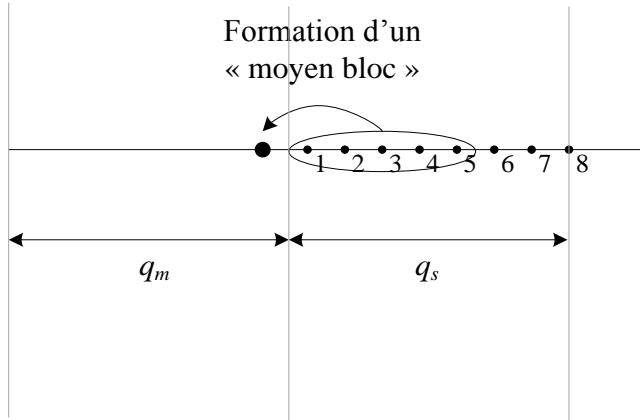


Figure 1-16: Formation d'un « moyen bloc » dans l'agrégation de Liu (2005)

Le principe est analogue pour la formation des « grands blocs ». Le premier « grand bloc » se calcule lorsqu'il y a 113 « moyens blocs » formés et correspond à la moyenne des charges des 73 premiers « moyens blocs ». Ensuite un nouveau « grand bloc » est calculé tous les 73 « moyens blocs » (toutes les 8760 h, soit tous les ans) en conservant intacte les 40 derniers « moyens blocs ».

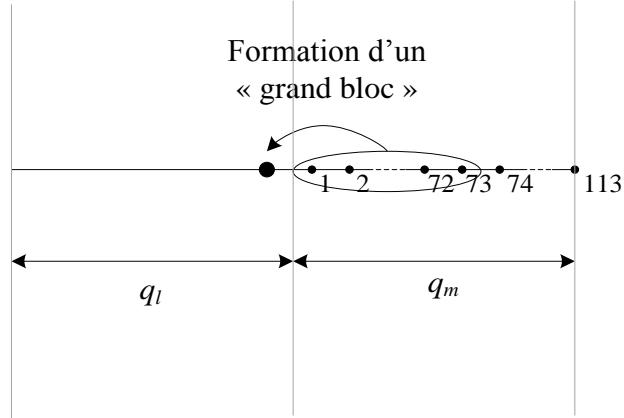


Figure 1-17: Formation d'un « grand bloc » dans l'agrégation de Liu (2005)

La formule d'agrégation de Liu (2005) s'écrit :

$$\begin{aligned} \Delta T(r, t) = & \sum_{j=2}^n (q_{h_j} - q_{h_{j-1}}) h(r, t - t_{h_{j-1}}) + (q_{h_1} - q_{s_{n_s}}) h(r, t - t_{s_{n_s}}) \\ & + \sum_{j=2}^{n_s} (q_{s_j} - q_{s_{j-1}}) h(r, t - t_{s_{j-1}}) + (q_{s_1} - q_{m_{n_m}}) h(r, t - t_{m_{n_m}}) \\ & + \sum_{j=2}^{n_m} (q_{m_j} - q_{m_{j-1}}) h(r, t - t_{m_{j-1}}) + (q_{m_1} - q_{l_{n_l}}) h(r, t - t_{l_{n_l}}) \\ & + \sum_{j=2}^{n_l} (q_{l_j} - q_{l_{j-1}}) h(r, t - t_{l_{j-1}}) + (q_{l_1} - 0) h(r, t - 0) \end{aligned} \quad (1.38)$$

Les tailles des blocs suggérées par Liu sont appropriées pour des simulations avec un pas de temps d'une heure. Ils devront être adaptés en fonction du pas de temps de la simulation. Le paramètre d'agrégation à modifier en priorité est la période d'attente associée au calcul d'un « petit bloc ». En effet, il est nécessaire de conserver intacte les charges individuelles immédiates pendant un certain temps. Bernier et al. (2004) préconisent de ne pas agréger les 6 dernières heures, tandis que Liu (2005) propose de converser les 12 dernières heures. Il est également

préférable de modifier le paramètre taille d'un « petit bloc », les autres paramètres d'agrégations peuvent quant à eux être conservés identiques.

Le Tableau 1-2 suggère les modifications à apporter à la taille des blocs si le pas de temps est différent d'une heure. Avec ces modifications, les 12 dernières heures ne sont pas agrégées et un « petit bloc » est créé toute les 24 h de simulation.

Tableau 1-2: Modification à apporter aux paramètres d'agrégations de Liu (2005) en fonction du pas de temps de la simulation

Pas de temps	Taille période d'attente "petit bloc" (-)	Taille "petit bloc" (-)
1 h	12	24
30 min	24	48
10 min	72	144
5 min	144	288
1 min	720	1440
30 s	1440	2880

1.4 Les modèles de puits géothermiques présentement implantés dans le logiciel TRNSYS

Il y a deux modèles de puits géothermiques couramment disponibles dans le logiciel TRNSYS : le modèle DST, et le modèle EWS. Un autre modèle, connue sous le nom de SBM ou TRNSBM existe également mais il est plus difficile à se procurer. Les deux premières sections de cette partie exposent les deux modèles DST et ESW tandis que la troisième section pointera leurs lacunes.

1.4.1 Le modèle DST

Le modèle DST (Duct ground heat Storage) est un modèle 2-D numérique d'échangeurs géothermiques verticaux en boucle fermée qui a été développé à l'université de Lund (Hellström,

1989). Le modèle DST était à l'origine destinée à la simulation du stockage saisonnier par puits géothermiques. Il est implanté dans le logiciel TRNSYS sous le nom « TYPE 557 ». Il contient 4 modes d'utilisation selon le type de tuyau utilisé (tubes en U, ou tubes coaxiaux), et la valeur de la résistance du puits (calculée par le modèle ou fixée par l'utilisateur).

Le modèle DST permet la modélisation d'un champ de puits, où les puits sont placés uniformément autour du centre du volume de stockage cylindrique, selon un arrangement de type hexagonal (Figure 1-18). L'utilisateur choisit le volume de stockage (ou l'espacement entre les puits), la profondeur et le nombre de puits. Le volume de stockage, V_{BTES} , et l'espacement entre les puits, B , sont reliés par la relation :

$$V_{BTES} = \pi r_{BTES}^2 H = \pi r_1^2 H N B H_{tot} \quad (1.39)$$

avec

$$r_1 = 0.525 B$$

où r_{BTES} est le rayon du volume de stockage, $N B H_{tot}$ est le nombre total de puits, H est la hauteur des puits et r_1 est le rayon du volume attribué à chaque puits.

Lorsque l'utilisateur spécifie l'espacement entre les puits, la valeur du volume de stockage est automatiquement ajustée selon l'Équation (1.39) et inversement. L'espacement entre deux puits adjacents sert donc à déterminer le volume de stockage et non à définir la position exacte des puits. C'est le modèle DST qui définit la répartition des puits autour du centre du volume de stockage lors de la génération du maillage subregion.

Le modèle DST modélise les transferts de chaleurs dans le sol, pour cela il utilise 3 niveaux de maillage. Le premier niveau de maillage est la subregion. Le maillage subregion recouvre le volume de stockage par un maillage 2D asymétrique, défini par rapport à l'axe central du volume de stockage. Il s'étend de la tête des puits (correspondant à la profondeur D) jusqu'aux pieds des puits (profondeur $D + H$). Dans le cas où tous les puits sont en parallèles, il n'y a qu'une seule région radiale. Le nombre de subregions est alors égal au nombre de régions verticales (spécifié par l'utilisateur). La hauteur des régions verticales n'est pas uniforme. Le modèle DST affine les

hauteurs sur le dessus et à la base du volume de stockage, là où les gradients de températures sont les plus élevés. Le maillage subregion sert de lien entre les maillages global et local.

Le second niveau de maillage est le maillage global. Le maillage global se déduit du maillage subregion à l'aide d'un algorithme qui est fonction des propriétés thermiques du sol et du nombre d'année de simulation. L'algorithme associe à chaque subregion un nombre entier de maille global. De plus, il étend radialement et verticalement le maillage global dans le sol environnant, au-delà du volume de stockage. Le maillage global sert à modéliser le transfert de chaleur dans le volume de stockage et dans le sol environnant.

Finalement, le troisième niveau de maillage est le maillage local. A chaque subregion est défini un maillage raffiné 1-D asymétrique qui correspond au maillage local. Le maillage local sert à modéliser les effets thermiques entourant les puits à court terme, causés par la circulation du fluide dans les puits.

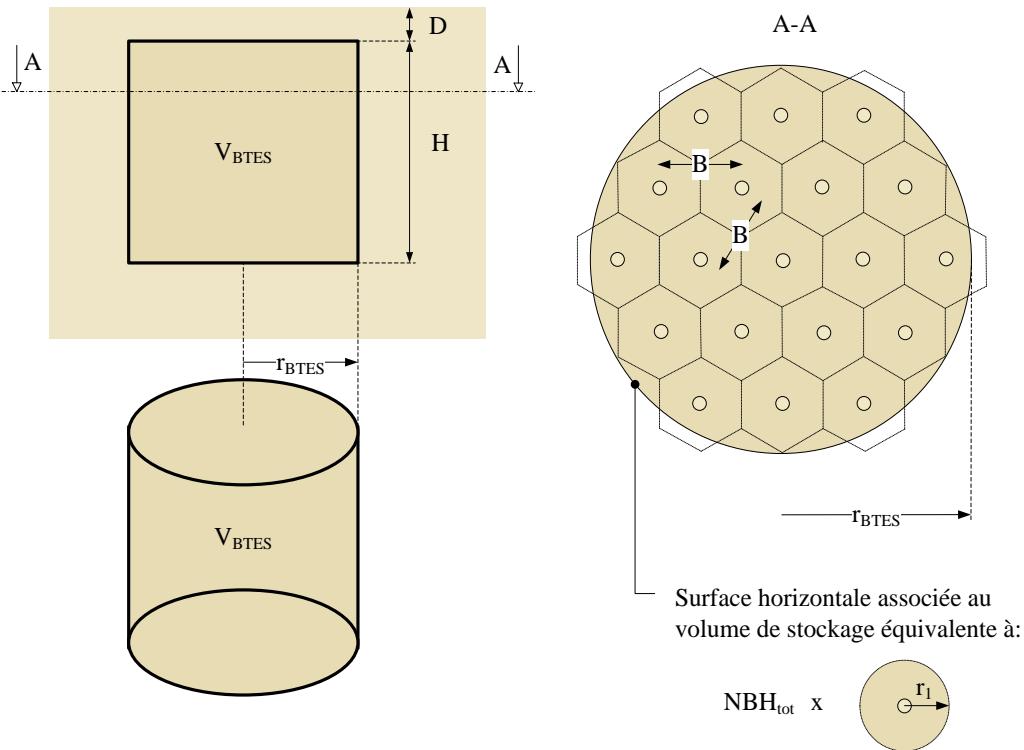


Figure 1-18: Arrangement des puits dans le modèle DST

Le transfert thermique dans le sol est résolu dans le maillage local et global par la méthode numérique des différences finies. A noter que les maillages global et local n'utilisent pas les

mêmes pas de temps de résolution. Le problème local est calculé plusieurs fois par pas de temps alors que le problème global est calculé à chaque pas de temps après un certain temps correspondant à $Fo = 0.2$.

Le transfert de chaleur dans les puits, i.e. entre le fluide et la paroi des puits, est calculé grâce à un modèle de résistance thermique du puits pouvant tenir compte ou non de l'interaction thermique entre les tuyaux. Il s'agit du modèle de résistance de la source linéique infinie d'Hellström (1991) présenté à l'Équation (1.19). Cette résistance est calculée une seule fois, pour des conditions nominales de débit et ne varie pas pendant la simulation en fonction du débit. A noter que la valeur de la résistance thermique peut également être paramétrée par l'utilisateur.

La température du sol est ensuite calculée par la superposition de trois sous-solutions :

- La solution dans le sol immédiatement autour des puits, solution dite locale,
- La solution dans le volume de stockage et le sol environnant, solution dite globale,
- La solution corrective qui redistribue la chaleur entre les mailles de la solution globale, solution dite steady flux.

Pour plus de détails sur le modèle DST, le lecteur est invité à se référer au mémoire de Chapuis (2009).

1.4.2 Le modèle EWS

Un autre modèle a été développé dans l'interface TRNSYS, il s'agit du modèle EWS (Wetter & Huber, 1997), implémenté dans le logiciel TRNSYS sous le nom TYPE 451.

Ce modèle utilise une approche capacité et résistance (voir section 1.2.3). Il permet de modéliser un puits géothermique constitué de deux réseaux de tubes en U identiques (mêmes températures, et mêmes débits d'entrés) en tenant compte de la capacité thermique du fluide et du coulis. Le puits est découpé en tranche axiale, et pour chaque tranche axiale le coulis est modélisé par un seul nœud auquel est associée une capacité thermique (C_1 sur la Figure 1-20).

Le profil de température du fluide caloporteur est déterminé par des bilans d'énergie successifs sur toutes les portions de tuyaux (voir Figure 1-19).

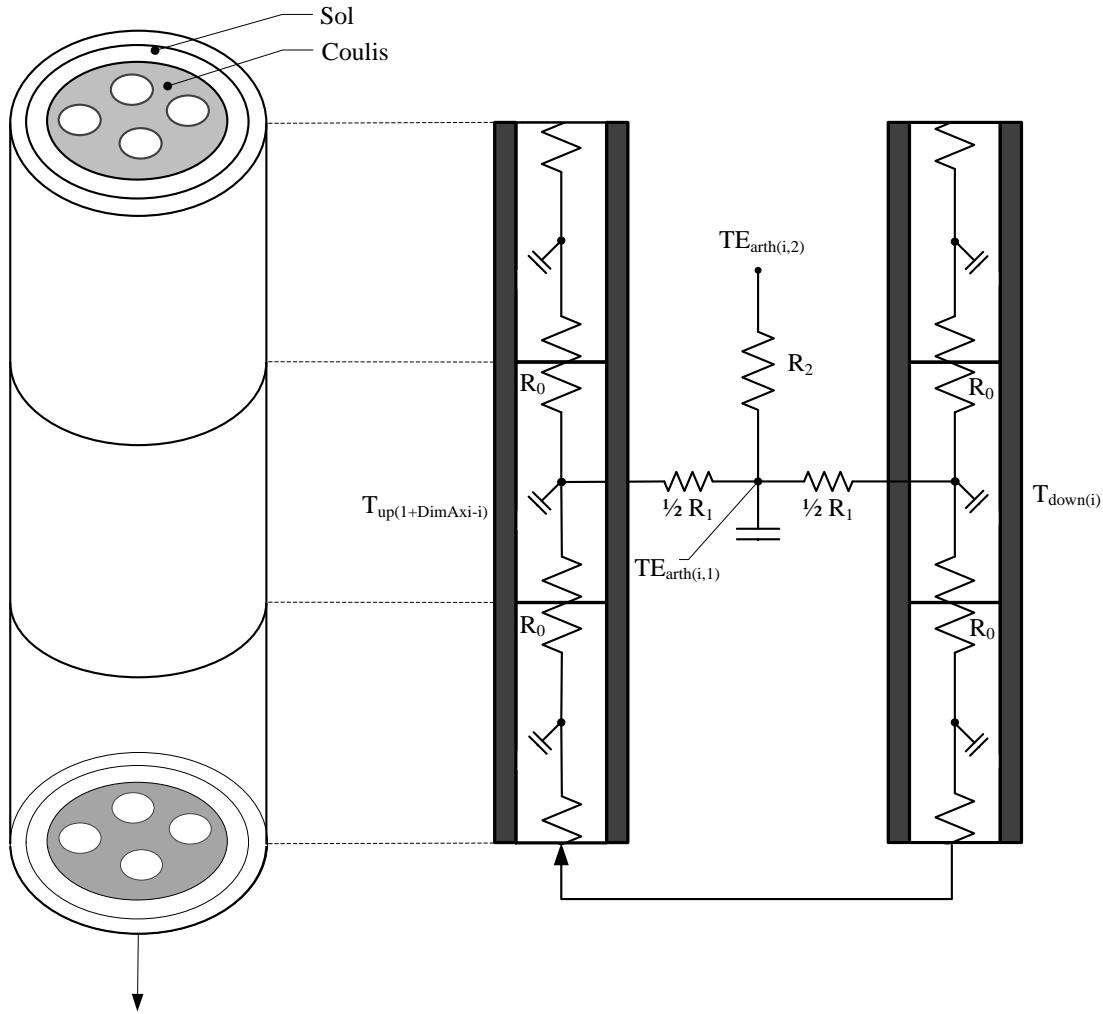


Figure 1-19: Représentation schématique du bilan d'énergie dans le modèle EWS (Wetter & Huber, 1997)

Tandis que radialement, le puits à 4 tuyaux est traité comme un puits à un seul tuyau (Figure 1-20). Le modèle EWS résout l'équation de transfert de chaleur à une dimension, et détermine la température à la frontière du domaine de simulation grâce à l'approximation de la source linéique infinie.

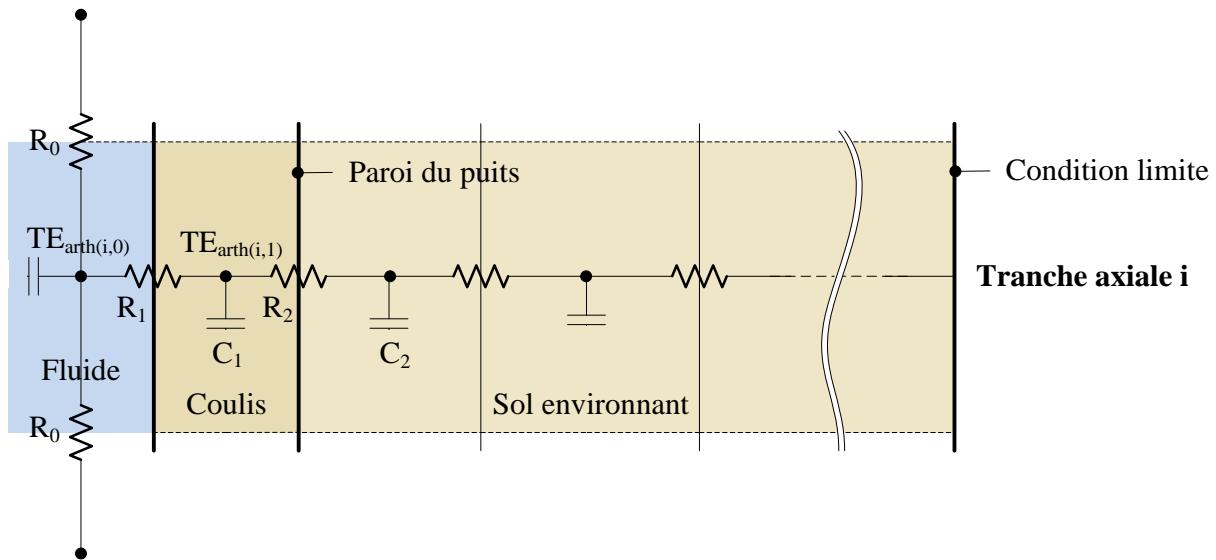


Figure 1-20: Représentation schématique du transfert de chaleur radial dans le modèle EWS
(Wetter & Huber, 1997)

1.4.3 Lacunes des modèles existants

Le modèle DST (Hellström, 1989) est souvent cité comme le modèle de référence pour la modélisation de puits géothermiques. Néanmoins, il présente certaines lacunes :

- La résistance thermique équivalente du puits est constante pendant les simulations. Cette dernière est paramétrée par l'utilisateur, ou calculée au premier pas de temps de la simulation pour un débit de référence. Or, lorsque le débit de fluide à l'entrée du puits géothermique n'est pas constant, la résistance convective du fluide, R_f , varie. Cette variation est significative lorsque l'écoulement passe d'un régime turbulent à un régime laminaire.
- L'utilisateur peut choisir le volume de stockage, la profondeur et le nombre de puits mais ne peut spécifier la configuration exacte du champ de puits. En effet, les puits sont placés uniformément autour du centre du volume de stockage cylindrique, selon un arrangement de type hexagonal (Figure 1-18) par le modèle DST.
- Le modèle DST ne tient pas compte des phénomènes transitoires à l'intérieur des puits géothermiques, en effet il néglige les capacités thermiques du fluide et du coulis.

Le modèle EWS (Wetter & Huber, 1997) répond au troisième point, mais il se limite à la modélisation d'un puits géothermique constitué de deux réseaux de tubes en U identiques (mêmes températures, et mêmes débits d'entrés). Il n'est donc pas possible de modéliser un champ de puits géothermiques. De plus, le modèle EWS utilise uniquement un nœud pour modéliser la capacité du coulis à chaque tranche.

CHAPITRE 2 MODÈLES DE CAPACITÉS ET DE RÉSISTANCES THERMIQUES PROPOSÉS

Dans le présent chapitre, un nouveau modèle d'échangeur géothermique vertical prenant compte de la capacité thermique du fluide caloporteur et du coulis est développé.

Le modèle proposé est basé sur le concept capacités et résistances thermiques, également appelé concept TRCM. L'intérieur du puits est modélisé par un circuit de capacités et de résistances thermiques. Le circuit retenu s'inspire des circuits TRCM proposé par Pasquier et Marcotte (2014), Bauer et al. (2011), et Zarella et al. (2011). L'extérieur du puits est modélisé par la solution analytique de la source cylindrique infinie. Le modèle TRCM proposé utilise une approche numérique pour représenter l'intérieur du puits et une approche analytique pour modéliser l'extérieur du puits.

Le modèle est d'abord présenté pour un puits géothermique à un tube en U, puis il est adapté pour un puits géothermique à deux tubes en U, avec deux circuits indépendants. A noter que le modèle TRCM à deux tuyaux a fait l'objet d'une publication (Godefroy & Bernier, 2014).

2.1 Modèle 2 tuyaux

2.1.1 Présentation de l'approche à deux tuyaux

Le modèle proposé est un modèle quasi 3-D où le puits est divisé en n_H tranches d'égales épaisseurs dans la direction axiale (Figure 2-1). Dans chaque tranche axiale, l'intérieur du puits est modélisé par un circuit de capacités et de résistances thermiques illustré à la Figure 2-2a. Pour un puits à un tube en U, le circuit de capacités et de résistances thermiques est constitué de huit nœuds, représentant autant de températures. Les huit nœuds sont identifiés par des points sur la Figure 2-2a.

Les nœuds T_1 et T_2 correspondent respectivement aux températures du fluide dans les tuyaux descendant et ascendant. Les nœuds T_{g1} et T_{g2} représentent les températures aux parois extérieures des tuyaux descendant et ascendant. Le coulis est modélisé par trois nœuds, T_{g3} , T_{g4} , et T_{g5} . Les nœuds, T_{g3} , et T_{g4} auxquels sont associées les capacités thermiques, C_g , correspondent aux températures dans les deux zones du coulis en forme de demi-lunes (V_{g1} et V_{g2} sur la Figure 2-2b) tandis que le nœud, T_{g5} , auquel est associée la capacité thermique, C_{gg} , correspond à la

température dans la zone centrale du coulis entre les tuyaux (V_{gg} sur la Figure 2-2b). Enfin le nœud T_b représente la température à la paroi du puits. La définition des zones du coulis sont inspirés des modèles TRCM proposés par Bauer et al. (2011) et Pasquier et Marcotte (2012).

Différentes configurations de circuit de capacités et de résistances thermiques ont été testées avant de retenir le circuit proposé. Des circuits plus détaillés, avec davantage de nœuds, ont été confrontés avec le circuit retenu. Cependant, le circuit à huit nœuds permet d'obtenir une précision suffisante lorsqu'il est comparé avec un modèle numérique détaillé 3-D, ou avec des données expérimentales. Ces comparaisons sont présentées à la section 3.3.2.

A noter que le circuit TRCM proposé ne prend pas compte de la capacité thermique des tuyaux. Cette dernière est négligée comme suggéré par Salim-Shirazi (2012).

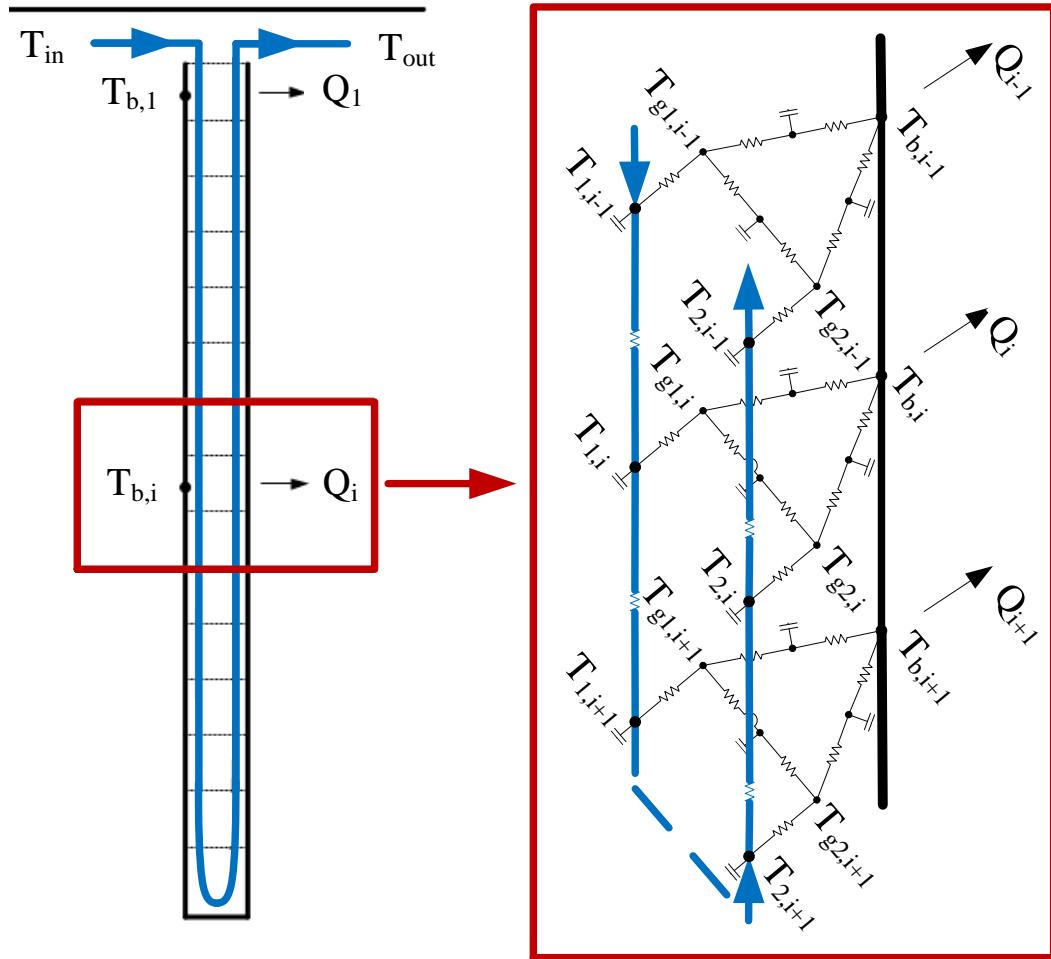


Figure 2-1: Représentation schématique du modèle proposé

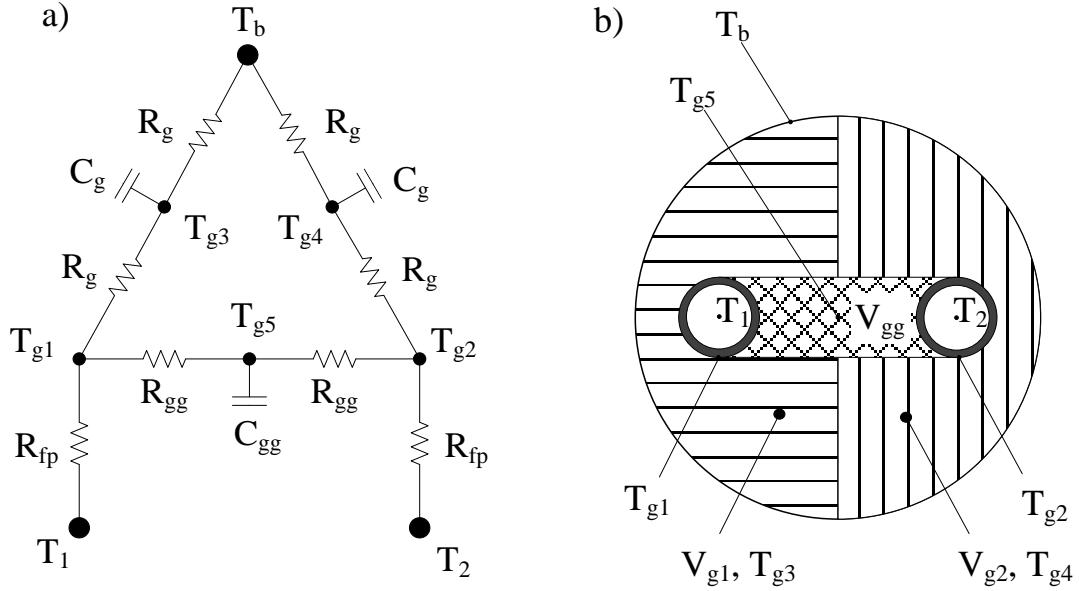


Figure 2-2: a) Circuit TRCM proposé, et b) définition des zones du coulis

La circulation du fluide caloporteur dans le tube en U est modélisée par des bilans d'énergie sur les sections de tuyaux. Le temps de résidence du fluide à l'intérieur du puits est ainsi pris en compte.

À l'extérieur du puits, les transferts de chaleur supposés radiaux, sont déterminés à l'aide de la solution analytique de la source cylindrique infinie. La température à la paroi du puits, $T_{b,i}$, et le taux d'injection de chaleur, Q_i , sont évalués pour chaque tranche axiale (Figure 2-1). La température du sol non perturbée, $T_{g,i}$, permet de renseigner la condition frontière dans le sol.

2.1.2 Calcul des résistances thermiques et des capacités thermiques

La résistance thermique R_{fp} combine la résistance de convection du fluide, R_f , et la résistance de conduction du tuyau R_p :

$$R_{fp} = R_f + R_p \quad (2.1)$$

Les résistances de convection et de conduction sont calculées, respectivement, grâce aux Équations (1.16) et (1.17). La résistance de convection est évaluée à chaque pas de temps en prenant la température moyenne du fluide au pas de temps précédent.

L'un des enjeux de ce modèle est de rendre compte précisément de deux types d'interactions thermiques à l'intérieur du puits. La première interaction, entre les tuyaux et la paroi du puits, est caractérisée par les résistances thermiques R_g . La seconde interaction, entre les deux tuyaux, est caractérisée par les résistances thermiques R_{gg} .

La partie 1.2.2 explique le calcul de la résistance thermique équivalente du puits R_b , et de la résistance thermique interne du puits, R_a . R_g et R_{gg} se déduisent de ces deux résistances :

$$R_g = \frac{1}{2} (2 R_b - R_{fp}) \quad (2.2)$$

$$R_{gg} = \frac{1}{2} \frac{4 R_g (R_a - 2 R_{fp})}{4 R_g - (R_a - 2 R_{fp})} \quad (2.3)$$

Les résistances du delta-circuit sont divisées en deux sous-résistances (R_g et R_{gg}) dans le circuit capacités et résistances proposé, d'où le facteur $\frac{1}{2}$ dans les Équations (2.2) et (2.3).

Les capacités thermiques sont données par :

$$C_g = V_g (\rho C_p)_g = \frac{\pi r_b^2 - 4 r_o D_s - \pi r_o^2}{2} (\rho C_p)_g \quad (2.4)$$

$$C_{gg} = V_{gg} (\rho C_p)_g = (4 r_o D_s - \pi r_o^2) (\rho C_p)_g \quad (2.5)$$

2.1.3 Équations du modèle

2.1.3.1 Nœuds du circuit capacités et résistances

Les équations sont décrites pour la $i^{\text{ème}}$ tranche du puits. A la paroi des tuyaux, les équations correspondant aux nœuds $T_{g1,i}$ et $T_{g2,i}$ s'écrivent :

$$\frac{T_{1,i} - T_{g1,i}}{R_{fp}} + \frac{T_{g3,i} - T_{g1,i}}{R_g} + \frac{T_{g5,i} - T_{g1,i}}{R_{gg}} = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{T_{2,i} - T_{g2,i}}{R_{fp}} + \frac{T_{g4,i} - T_{g2,i}}{R_g} + \frac{T_{g5,i} - T_{g2,i}}{R_{gg}} = 0 \quad (2.7)$$

À noter que ces équations ne contiennent pas de termes de capacité thermique puisque celle-ci est négligée dans les tuyaux.

Dans les deux zones du coulis en forme de demi-lunes, aux nœuds T_{g3} , et T_{g4} :

$$\frac{T_{g1,i} - T_{g3,i}}{R_g} + \frac{T_{b,i} - T_{g3,i}}{R_g} = C_g \frac{T_{g3,i} - T_{g3,i}^0}{\Delta t} \quad (2.8)$$

$$\frac{T_{g2,i} - T_{g4,i}}{R_g} + \frac{T_{b,i} - T_{g4,i}}{R_g} = C_g \frac{T_{g4,i} - T_{g4,i}^0}{\Delta t} \quad (2.9)$$

Dans la zone interne du coulis, entre les deux tuyaux, au nœud T_{g5} :

$$\frac{T_{g1,i} - T_{g5,i}}{R_{gg}} + \frac{T_{g2,i} - T_{g5,i}}{R_{gg}} = C_{gg} \frac{T_{g5,i} - T_{g5,i}^0}{\Delta t} \quad (2.10)$$

Dans les équations ci-dessus, Δt est le pas de temps de la simulation, et l'indice "⁰" réfère aux températures du pas de temps précédent.

2.1.3.2 Bilans d'énergie sur le fluide

Les tranches axiales échangent de l'énergie entre elles par l'intermédiaire du fluide caloporteur qui se déplace à l'intérieur du tube en U. Le tube est divisé en $2n_H$ sections, n_H sections sur la partie descendante et n_H sections sur la partie ascendante. Les bilans d'énergie sont écrits sur les $2n_H$ sections en supposant que la température du fluide caloporteur varie linéairement dans chaque section de tuyau.

Dans le sens descendant, le bilan d'énergie sur la $i^{\text{ème}}$ section de tuyau s'écrit (voir Figure 2-3a):

$$\frac{\dot{m} c_{p_f}}{dH} (T_{in-1,i} - T_{out-1,i}) - Q_{1 \rightarrow g1,i} = \pi r_i^2 \rho_f c_{p_f} \frac{T_{1,i} - T_{1,i}^0}{\Delta t} \quad (2.11)$$

où $T_{in-1,i}$ et $T_{out-1,i}$ sont respectivement les températures du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie de la $i^{\text{ème}}$ section de tuyau, et où $Q_{1 \rightarrow g1,i}$ (en W/m) est l'échange de chaleur par unité de longueur entre le fluide caloporteur dans le tuyau descendant (i.e. #1) et la paroi du tuyau de la $i^{\text{ème}}$ section de tuyau (Figure 2-3b).

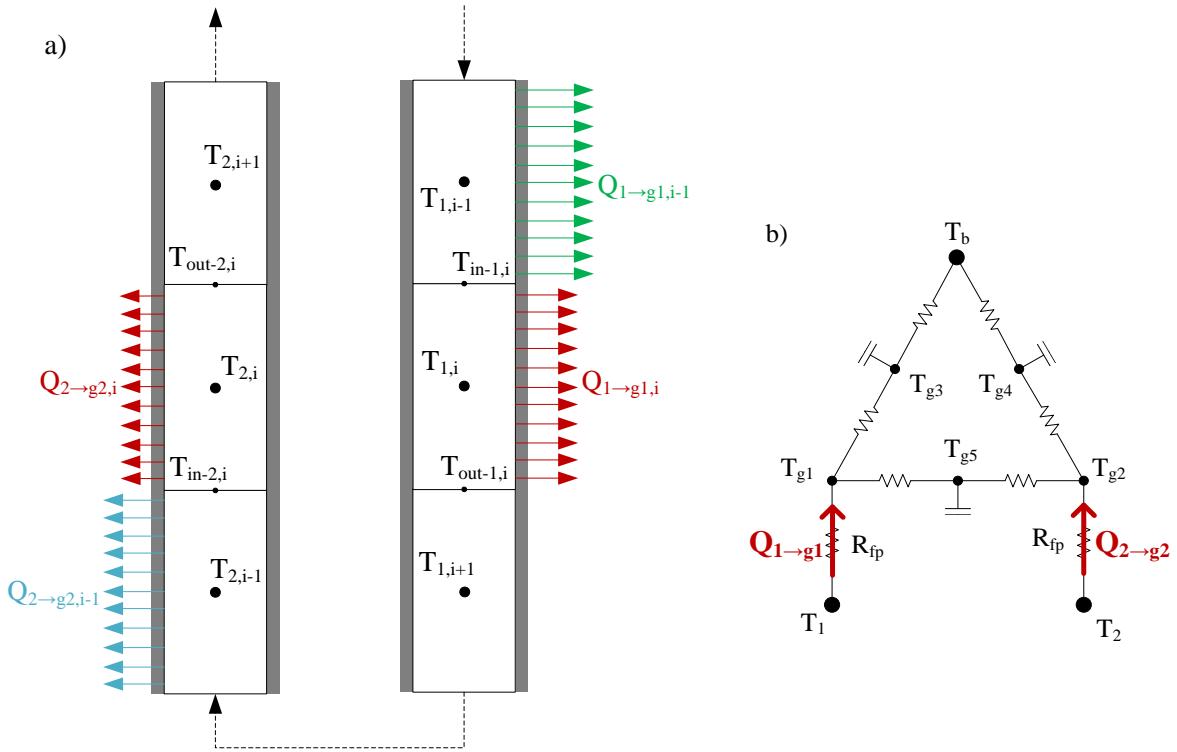


Figure 2-3: a) Représentation schématique des bilans d'énergie et b) des échanges de chaleur entre le fluide caloporteur et la paroi du tuyau

Ces grandeurs s'expriment de la façon suivante :

$$\begin{aligned}
 T_{in-1,i} &= T_{1,i-1} - \frac{Q_{1 \rightarrow g1,i-1} dH}{2 \dot{m} c_{pf}} \\
 T_{out-1,i} &= T_{1,i} - \frac{Q_{1 \rightarrow g1,i} dH}{2 \dot{m} c_{pf}} \\
 Q_{1 \rightarrow g1,i} &= \frac{T_{1,i} - T_{g1,i}}{R_{fp}}
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

Finalement l'Équation (2.11) s'écrit :

$$\frac{\dot{m} c_{pf}}{dH} (T_{1,i-1} - T_{1,i}) - \frac{T_{1,i} - T_{g1,i}}{2 R_{fp}} - \frac{T_{1,i-1} - T_{g1,i-1}}{2 R_{fp}} = \pi r_i^2 \rho_f c_{pf} \frac{T_{1,i} - T_{1,i}^0}{\Delta t} \tag{2.13}$$

Pour la 1^{ère} section de tuyau l'Équation (2.13) s'écrit différemment :

$$\frac{\dot{m} c_{p_f}}{dL} (T_{in} - T_{1,1}) - \frac{T_{1,1} - T_{g1,1}}{2 R_{fp}} = \pi r_i^2 \rho_f c_{p_f} \frac{T_{1,1} - T_{1,1}^0}{\Delta t} \quad (2.14)$$

où T_{in} est la température à l'entrée de l'échangeur géothermique (condition limite à l'entrée de l'échangeur géothermique).

Dans le sens ascendant, de façon analogue au sens descendant, le bilan d'énergie sur la i ^{ème} section de tuyau s'écrit:

$$\frac{\dot{m} c_{p_f}}{dH} (T_{2,i+1} - T_{2,i}) - \frac{T_{2,i} - T_{g2,i}}{2 R_{fp}} - \frac{T_{2,i+1} - T_{g2,i+1}}{2 R_{fp}} = \pi r_i^2 \rho_f c_{p_f} \frac{T_{2,i} - T_{2,i}^0}{\Delta t} \quad (2.15)$$

Pour la n_H ^{ème} section de tuyau l'Équation (2.15) s'écrit différemment :

$$\frac{\dot{m} c_{p_f}}{dH} (T_{in-2,n} - T_{2,n}) - \frac{T_{2,n} - T_{g2,n}}{2 R_{fp}} = \pi r_i^2 \rho_f c_{p_f} \frac{T_{2,n_H} - T_{2,n_H}^0}{\Delta t} \quad (2.16)$$

où, T_{in-2,n_H} , est calculé en écrivant la condition limite en bas du tube en U :

$$T_{in-2,n_H} = T_{out-1,n_H} \quad (2.17)$$

avec

$$T_{out-1,n_H} = T_{1,n_H} - \frac{T_{1,n_H} - T_{g1,n_H}}{R_{fp}} \frac{dH}{2 \dot{m} c_{p_f}} \quad (2.18)$$

Finalement l'Équation (216) s'écrit :

$$\frac{\dot{m} c_{p_f}}{dH} (T_{1,n_H} - T_{2,n_H}) - \frac{T_{2,n_H} - T_{g2,n_H}}{2 R_{fp}} - \frac{T_{1,n_H} - T_{g1,n_H}}{2 R_{fp}} = \pi r_i^2 \rho_f c_{p_f} \frac{T_{2,n_H} - T_{2,n_H}^0}{\Delta t} \quad (2.19)$$

Enfin, la température à la sortie de l'échangeur géothermique, T_{out} , est donné par :

$$T_{out} = T_{out-2,1} = T_{2,1} - \frac{T_{2,1} - T_{g2,1}}{R_{fp}} \frac{dH}{2 \dot{m} c_{p_f}} \quad (2.20)$$

2.1.3.3 Température à la paroi du puits

La température à la paroi de la $i^{\text{ème}}$ tranche du puits est donnée par :

$$T_{b,i}(t) = T_{g,i} + \Delta T_i(r_b, t) \quad (2.21)$$

Où $T_{g,i}$ est la température du sol non perturbé et ΔT_i est la variation de température à la paroi de la $i^{\text{ème}}$ tranche de puits, définie par :

$$\Delta T_i(r_b, t) = Q_i \cdot h(r_b, t) \quad (2.22)$$

Où h est le facteur de réponse déterminée grâce à la source cylindrique infinie et Q_i est le taux d'injection de chaleur à la paroi du puits.

Le taux d'injection de chaleur, Q_i , n'est pas constant dans le temps et il n'est pas uniforme sur la hauteur du puits, il faut donc recourir à la superposition temporelle des charges sur chaque tranche. La technique d'agrégation de Liu (2005) est utilisée pour réduire le temps de calcul (voir partie 1.3).

Pour une succession de taux d'injection de chaleur, $Q_i(t_j)$, débutant au temps t_{j-1} et finissant au temps t_j la variation de température à la paroi de la tranche axiale i du puits au temps t_n s'exprime de la façon suivante :

$$\Delta T_i(r_b, t_n) = \sum_{j=1}^n q_i(t_j) h(t_n - t_j) \quad (2.23)$$

Avec

$$q_i(t_j) = Q_i(t_j) - Q_i(t_{j-1}) \quad (2.24)$$

Uniquement le taux d'injection du dernier pas de temps $Q_i(t_n)$ est inconnu, il est donc intéressant de séparer ce terme de la somme précédente (Cimmino & Bernier, 2013) :

$$\Delta T_i(r_b, t_n) = \Delta T_i^*(r_b, t_n) + Q_i(t_n) h(t_n - t_{n-1}) \quad (2.25)$$

où

$$\Delta T_i^*(r_b, t_n) = \sum_{j=1}^{n-1} q_i(t_j) h(t_n - t_j) - Q_i(t_{n-1}) h(t_n - t_{n-1}) \quad (2.26)$$

Finalement, la température à la paroi à la $i^{\text{ème}}$ section du puits est calculée à partir de l'équation suivante :

$$T_{b,i}(t_n) = T_{g,i} + \Delta T_i^*(r_b, t_n) + Q_i(t_n) h(t_n - t_{n-1}) \quad (2.27)$$

La température du sol non perturbée, $T_{g,i}$, varie temporellement et spatialement selon la relation suivante:

$$T_{g,i}(t) = T_m + g z_i - T_0 e^{-z_i \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_s}}} \sin \left(\omega(t - t_{\text{décalage}}) - z_i \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_s}} \right) \quad (2.28)$$

où T_m ($^{\circ}\text{C}$) est la température moyenne annuelle de l'air, T_o ($^{\circ}\text{C}$) est l'amplitude annuelle de la température de l'air, ω correspond à la pulsation $\frac{2\pi}{365 \text{ jours}}$ (en rad/jour), z_i (m) est la profondeur à partir de la surface de la tranche axiale i , α_s (m^2/jour) est la diffusivité thermique du sol, $t_{\text{décalage}}$ (jour) représente le jour de la plus basse température (à compter du 1^{er} janvier) et g ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) est le gradient géothermique de la température dans le sol.

L'Équation (2.28) permet de tenir compte de la variation temporelle et spatiale de la température du sol, en supposant que la température de l'air varie sinusoïdalement pendant l'année. Elle permet également d'inclure le gradient géothermique dû au flux géothermique.

2.1.3.4 Taux d'injection de chaleur à la paroi du puits

Le taux d'injection de chaleur à la $i^{\text{ème}}$ section du puits avec le sol environnant est donné par (Figure 2-4):

$$Q_i = \frac{(T_{g3,i} - T_{b,i}) + (T_{g4,i} - T_{b,i})}{R_g} \quad (2.29)$$

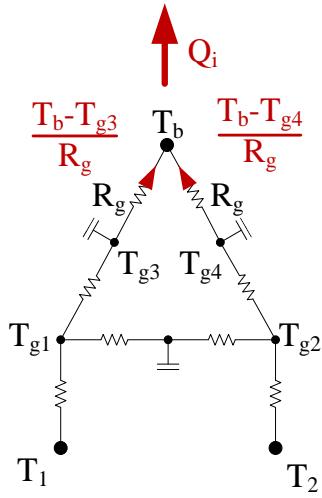


Figure 2-4: Représentation du taux d'injection de chaleur à la paroi du puits

Il est à noter que le taux d'injection est positif lorsque le puits injecte de la chaleur, et est négatif lorsque le puits extrait de la chaleur du sol environnant.

2.1.4 Procédure de résolution

Il y a 9 équations à résoudre par tranche axiale :

- Les équations aux nœuds du circuit capacité/résistance (Équations (2.6), (2.7), (2.8), (2.9), et (2.10)),
- Les bilans d'énergie (Équations (2.13) et (2.15)). A noter les exceptions pour la 1^{ère} section du tuyau descendant (Équation (2.14)) et pour la n_H ^{ème} section du tuyau ascendant (Equation (2.19)),
- La température à la paroi du puits (Équation (2.27)),
- Le taux d'injection de chaleur à la paroi du puits (Équation (2.29)).

Finalement, il s'agit de résoudre un système d'équations linéaires à $9n_H$ inconnus qui s'écrit sous la forme matricielle :

$$[A] \{X\} = \{B\} \quad (2.30)$$

Où $[A]$ est la matrice des coefficients, $\{X\}$ est le vecteur des inconnus, et $\{B\}$ est le vecteur de termes connus. Il suffit d'inverser la matrice $[A]$ pour déterminer les inconnus rangés dans le vecteur $\{X\}$:

$$\{X\} = [A]^{-1} \{B\} \quad (2.31)$$

Une fois le système matriciel résolu, la température à la sortie de l'échangeur géothermique est obtenue à l'aide de l'Équation (2.20).

Dans la partie 3.3, le modèle TRCM à deux tuyaux est implémenté dans le logiciel TRNSYS. Puis il est comparé avec d'autres modèles existants ainsi qu'avec des données expérimentales.

2.2 Modèle 4 tuyaux

2.2.1 Présentation de l'approche à 4 tuyaux

Le modèle TRCM deux tuyaux a été étendu pour les échangeurs géothermiques verticaux à quatre tuyaux : deux tubes en U avec deux circuits indépendants.

Comme pour le modèle à deux tuyaux, le puits est divisé en n_H tranches d'égales épaisseurs dans la direction axiale. Dans chaque tranche axiale, l'intérieur du puits est modélisé par un circuit de capacités et de résistances thermiques illustré à la Figure 2-5. Désormais, le circuit de capacités et de résistances thermiques est constitué de dix-huit nœuds, représentant autant de températures. Le premier tube en U est constitué des tuyaux #1 (descendant) et #3 (ascendant), tandis que le second tube en U (circuit indépendant du premier) est composé des tuyaux #2 (descendant) et #4 (ascendant).

La capacité thermique du coulis est prise en compte par neuf capacités thermiques. Les quatre capacités, C_g , correspondent aux zones périphériques du coulis (V_g sur la Figure 2-6), tandis que les capacités C_{gg}^{12} et C_{gg}^{13} sont associées respectivement aux zones V_{gg}^{12} et V_{gg}^{13} sur la Figure 2-6.

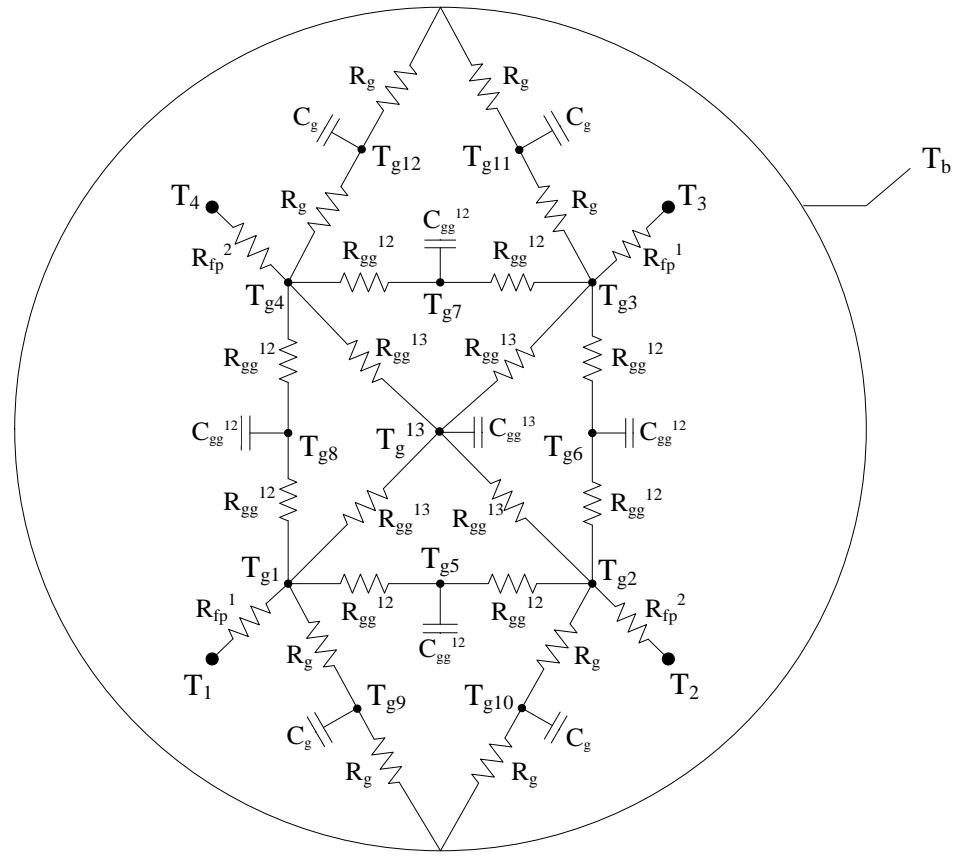


Figure 2-5 : Circuit TRCM proposé pour un puits géothermique à 4 tuyaux

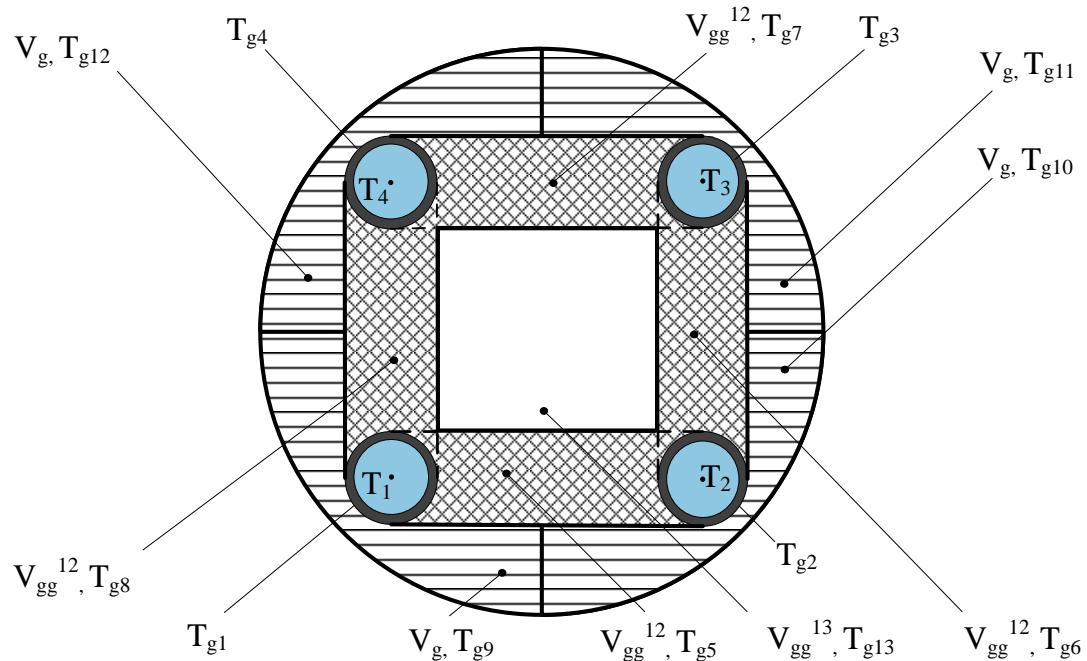


Figure 2-6: Définition des zones du coulis

2.2.2 Calcul des résistances thermiques et des capacités thermiques

Les résistances thermiques du circuit TRCM à quatre tuyaux sont ensuite déduites à l'aide des relations suivantes :

$$R_g = \frac{T_{g1} + T_{g2} + T_{g3} + T_{g4} - 4T_b}{4(q_1 + q_2 + q_3 + q_4)} \quad (2.32)$$

$$R_{gg}^{12} = \frac{2(T_{g1} - T_{g2} + T_{g3} - T_{g4})}{2(q_1 - q_2 + q_3 - q_4) + \frac{T_{g1} - T_{g2} + T_{g3} - T_{g4}}{R_g}} \quad (2.33)$$

$$R_{gg}^{13} = \frac{2}{2\frac{q_1 - q_2}{T_{g1} - T_{g3}} + 2\frac{q_2 - q_4}{T_{g2} - T_{g4}} - \frac{2}{R_g} - \frac{4}{R_{gg}^{12}}} \quad (2.34)$$

Dans ces équations ci-dessus, la « méthode multipole » (Bennet et al., 1987) est utilisée pour calculer les taux d'extraction de chaleur de tous les tuyaux, ainsi que les températures aux parois des tuyaux pour des températures de fluide données.

Les capacités thermiques sont données par :

$$C_{gg}^{12} = V_{gg}^{12} (\rho C_p)_g = (4 r_o D_s - \pi r_o^2) (\rho C_p)_g \quad (2.35)$$

$$C_{gg}^{13} = V_{gg}^{13} (\rho C_p)_g = 4(D_s - r_o)^2 (\rho C_p)_g \quad (2.36)$$

$$C_g = V_g (\rho C_p)_g = \frac{(\pi r_b^2 - 4\pi r_o^2) (\rho C_p)_g - 4C_{gg}^{12} - C_{gg}^{13}}{4} \quad (2.37)$$

2.2.3 Équations du modèle

2.2.3.1 Nœuds du circuit capacité/résistance

Les équations sont décrites pour la $i^{\text{ème}}$ tranche du puits.

A la paroi des tuyaux, les équations correspondant aux nœuds T_{g1}, T_{g2}, T_{g3} , et T_{g4} s'écrivent :

$$\frac{T_{1,i} - T_{g1,i}}{R_{fp}^1} + \frac{T_{g8,i} + T_{g5,i} - 2 T_{g1,i}}{R_{gg}^{12}} + \frac{T_{g9,i} - T_{g1,i}}{R_g} + \frac{T_{g13,i} - T_{g1,i}}{R_{gg}^{13}} = 0 \quad (2.38)$$

$$\frac{T_{2,i} - T_{g2,i}}{R_{fp}^2} + \frac{T_{g5,i} + T_{g6,i} - 2 T_{g2,i}}{R_{gg}^{12}} + \frac{T_{g10,i} - T_{g2,i}}{R_g} + \frac{T_{g13,i} - T_{g2,i}}{R_{gg}^{13}} = 0 \quad (2.39)$$

$$\frac{T_{3,i} - T_{g3,i}}{R_{fp}^1} + \frac{T_{g6,i} + T_{g7,i} - 2 T_{g3,i}}{R_{gg}^{12}} + \frac{T_{g11,i} - T_{g3,i}}{R_g} + \frac{T_{g13,i} - T_{g3,i}}{R_{gg}^{13}} = 0 \quad (2.40)$$

$$\frac{T_{4,i} - T_{g4,i}}{R_{fp}^2} + \frac{T_{g7,i} + T_{g8,i} - 2 T_{g4,i}}{R_{gg}^{12}} + \frac{T_{g12,i} - T_{g4,i}}{R_g} + \frac{T_{g13,i} - T_{g4,i}}{R_{gg}^{13}} = 0 \quad (2.41)$$

Entre les tuyaux, aux nœuds T_{g5}, T_{g6}, T_{g7} , et T_{g8} :

$$\frac{T_{g1,i} + T_{g2,i} - 2 T_{g5,i}}{R_{gg}^{12}} = C_{gg}^{12} \frac{T_{g5,i} - T_{g5,i}^0}{\Delta t} \quad (2.42)$$

$$\frac{T_{g2,i} + T_{g3,i} - 2 T_{g6,i}}{R_{gg}^{12}} = C_{gg}^{12} \frac{T_{g6,i} - T_{g6,i}^0}{\Delta t} \quad (2.43)$$

$$\frac{T_{g3,i} + T_{g4,i} - 2 T_{g7,i}}{R_{gg}^{12}} = C_{gg}^{12} \frac{T_{g7,i} - T_{g7,i}^0}{\Delta t} \quad (2.44)$$

$$\frac{T_{g4,i} + T_{g1,i} - 2 T_{g8,i}}{R_{gg}^{12}} = C_{gg}^{12} \frac{T_{g8,i} - T_{g8,i}^0}{\Delta t} \quad (2.45)$$

Enfin, dans les zones périphériques du coulis, aux nœuds T_{g9}, T_{g10}, T_{g11} , et T_{g12} :

$$\frac{T_{g1,i} + T_b - 2 T_{g9,i}}{R_g} = C_g \frac{T_{g9,i} - T_{g9,i}^0}{\Delta t} \quad (2.46)$$

$$\frac{T_{g2,i} + T_b - 2 T_{g10,i}}{R_g} = C_g \frac{T_{g10,i} - T_{g10,i}^0}{\Delta t} \quad (2.47)$$

$$\frac{T_{g3,i} + T_b - 2 T_{g11,i}}{R_g} = C_g \frac{T_{g11,i} - T_{g11,i}^0}{\Delta t} \quad (2.48)$$

$$\frac{T_{g4,i} + T_b - 2 T_{g12,i}}{R_g} = C_g \frac{T_{g12,i} - T_{g12,i}^0}{\Delta t} \quad (2.49)$$

Dans la zone interne du coulis, au nœud T_{g13} :

$$\frac{T_{g1,i} + T_{g2,i} + T_{g3,i} + T_{g4,i} - 4 T_{g13,i}}{R_{gg}^{13}} = C_{gg}^{13} \frac{T_{g13,i} - T_{g13,i}^0}{\Delta t} \quad (2.50)$$

2.2.3.2 Les bilans d'énergie

Chaque tube en U est divisé en $2n_H$ sections. Les bilans d'énergie sont écrits sur les 4 n_H sections de tuyau en supposant, comme pour le modèle à deux tuyaux, que la température du fluide caloporteur varie linéairement dans chaque section.

Dans le sens descendant, le bilan d'énergie sur la $i^{\text{ème}}$ section du tuyau 1 s'écrit :

$$\frac{\dot{m}_1 c_{p_{f1}}}{dH} (T_{1,i-1} - T_{1,i}) - \frac{T_{1,i} - T_{g1,i}}{2 R_{fp}^1} - \frac{T_{1,i-1} - T_{g1,i-1}}{2 R_{fp}^1} = \pi r_i^2 \rho_{f1} c_{p_{f1}} \frac{T_{1,i} - T_{1,i}^0}{\Delta t} \quad (2.51)$$

Idem, pour la $i^{\text{ème}}$ section du tuyau 2 :

$$\frac{\dot{m}_2 c_{p_{f2}}}{dH} (T_{2,i-1} - T_{2,i}) - \frac{T_{2,i} - T_{g2,i}}{2 R_{fp}^2} - \frac{T_{2,i-1} - T_{g2,i-1}}{2 R_{fp}^2} = \pi r_i^2 \rho_{f2} c_{p_{f2}} \frac{T_{2,i} - T_{2,i}^0}{\Delta t} \quad (2.52)$$

Pour la 1^{ère} section de tuyau les Equations (2.51) et (2.52) s'écrivent différemment :

$$\frac{\dot{m}_1 c_{p_{f1}}}{dH} (T_{in1} - T_{1,1}) - \frac{T_{1,1} - T_{g1,1}}{2 R_{fp}^1} = \pi r_i^2 \rho_{f1} c_{p_{f1}} \frac{T_{1,1} - T_{1,1}^0}{\Delta t} \quad (2.53)$$

$$\frac{\dot{m}_2 c_{p_{f2}}}{dH} (T_{in2} - T_{2,1}) - \frac{T_{2,1} - T_{g2,1}}{2 R_{fp}^2} = \pi r_i^2 \rho_{f2} c_{p_{f2}} \frac{T_{2,1} - T_{2,1}^0}{\Delta t} \quad (2.54)$$

Dans le sens ascendant, de façon analogue au sens descendant, les bilans d'énergie sur la $i^{\text{ème}}$ section des tuyaux 2 et 4 s'écrivent:

$$\frac{\dot{m}_1 c_{p,f_1}}{dH} (T_{3,i+1} - T_{3,i}) - \frac{T_{3,i} - T_{g3,i}}{2 R_{fp}^1} - \frac{T_{3,i+1} - T_{g3,i+1}}{2 R_{fp}^1} = \pi r_i^2 \rho_{f_1} c_{p,f_1} \frac{T_{3,i} - T_{3,i}^0}{\Delta t} \quad (2.55)$$

$$\frac{\dot{m}_2 c_{p,f_2}}{dH} (T_{4,i+1} - T_{4,i}) - \frac{T_{4,i} - T_{g4,i}}{2 R_{fp}^2} - \frac{T_{4,i+1} - T_{g4,i+1}}{2 R_{fp}^2} = \pi r_i^2 \rho_{f_2} c_{p,f_2} \frac{T_{4,i} - T_{4,i}^0}{\Delta t} \quad (2.56)$$

Pour la $n_H^{\text{ème}}$ section de tuyau les Equations (3.55) et (3.56) s'écrivent différemment :

$$\frac{\dot{m}_1 c_{p,f_1}}{dH} (T_{1,n_H} - T_{3,n_H}) - \frac{T_{3,n_H} - T_{g3,n_H}}{2 R_{fp}^1} - \frac{T_{1,n_H} - T_{g1,n_H}}{2 R_{fp}^1} = \pi r_i^2 \rho_{f_1} c_{p,f_1} \frac{T_{3,n_H} - T_{3,n_H}^0}{\Delta t} \quad (2.57)$$

$$\frac{\dot{m}_2 c_{p,f_2}}{dH} (T_{2,n_H} - T_{4,n_H}) - \frac{T_{4,n_H} - T_{g4,n_H}}{2 R_{fp}^2} - \frac{T_{2,n_H} - T_{g2,n_H}}{2 R_{fp}^2} = \pi r_i^2 \rho_{f_2} c_{p,f_2} \frac{T_{4,n_H} - T_{4,n_H}^0}{\Delta t} \quad (2.58)$$

2.2.3.3 Température à la paroi du puits

La démarche utilisée pour obtenir la température à la paroi du puits est identique à celle utilisée dans la partie 2.1.3.3. La température à la paroi à la $i^{\text{ème}}$ section du puits est obtenue par la relation suivante :

$$T_{b,i}(t_n) = T_{g,i} + \Delta T_i^*(r_b, t_n) + Q_i(t_n) h(t_n - t_{n-1}) \quad (2.59)$$

2.2.3.4 Taux d'injection de chaleur à la paroi du puits

Le taux d'injection de chaleur à la $i^{\text{ème}}$ section du puits avec le sol environnant est donné par:

$$Q_i = \frac{T_{g9,i} + T_{g10,i} + T_{g11,i} + T_{g12,i} - 4T_{b,i}}{R_g} \quad (2.60)$$

2.2.4 Procédure de résolution

Il y a 19 équations à résoudre par tranche axiale :

- Les équations aux nœuds du circuit capacité/résistance,
- Les bilans d'énergie. A noter les exceptions pour la 1^{ère} section du tuyau descendant et pour la n_H ^{ème} section du tuyau ascendant,
- La température à la paroi du puits,
- Le taux d'injection de chaleur à la paroi du puits.

Finalement, le problème peut être réécrit comme un système linéaire à $19n_H$ inconnus qui se résout facilement numériquement.

Comme pour le modèle 2 tuyaux, le modèle capacité/résistance 4 tuyaux proposé est implémenté dans le logiciel TRNSYS. Il est également comparé avec un autre modèle de la suite (voir section 3.4.2).

CHAPITRE 3 MODÈLES D'ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES VERTICAUX SIMPLES

Ce chapitre présente les quatre modèles d'échangeurs géothermiques verticaux simples (un seul puits) de la suite. Chaque modèle est implémenté dans l'environnement TRNSYS sous forme de composant, appelé TYPE. Ce chapitre est divisé en quatre volets correspondants aux quatre TYPES.

Le premier volet introduit un modèle d'échangeur géothermique élémentaire à deux tuyaux, le TYPE 241, dont l'intérêt est essentiellement pédagogique : initiation aux concepts associés aux échangeurs géothermiques, et à l'utilisation d'un outil de simulation d'échangeurs géothermiques. Le second volet présente un modèle d'échangeur géothermique à quatre tuyaux (deux tubes en U), avec deux circuits indépendants, le TYPE 242. Ce modèle est basé sur les travaux d'Eslami-nejad et Bernier (2011). Les deux autres volets sont consacrés à des modèles d'échangeurs géothermiques prenant en compte les phénomènes transitoires se produisant à l'intérieur du puits. Le TYPE 243, correspondant au modèle TRCM à deux tuyaux présenté dans le Chapitre 2, est introduit dans le troisième volet. Enfin, le TYPE 244, qui est l'adaptation du modèle TRCM pour un échangeur géothermique à quatre tuyaux avec deux circuits indépendants, est détaillé dans le quatrième et dernier volet.

3.1 TYPE 241

Le TYPE 241 est le premier modèle de la suite évolutive. Il s'agit d'un modèle d'échangeur géothermique élémentaire à deux tuyaux dont le but est de permettre à l'utilisateur de se familiariser avec les concepts liés aux puits géothermiques, et de s'initier à l'utilisation d'un TYPE TRNSYS. Le TYPE 241 a été implémenté dans TRNSYS par Massimo Cimmino, étudiant au doctorat dans le groupe de recherche du professeur Bernier. Cette section ajoute une description détaillée du TYPE ainsi que des cas validation.

3.1.1 Présentation du TYPE 241

Intérieur du puits

L'intérieur du puits est modélisé par la résistance thermique équivalente du puits, R_b . Cette résistance thermique permet de relier la température moyenne du fluide, T_f , la température

moyenne à la paroi du puits, T_b , et le taux d'injection de chaleur par unité de longueur de puits, Q , par l'expression:

$$T_f = T_b + Q R_b \quad (3.1)$$

avec

$$T_f = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$$

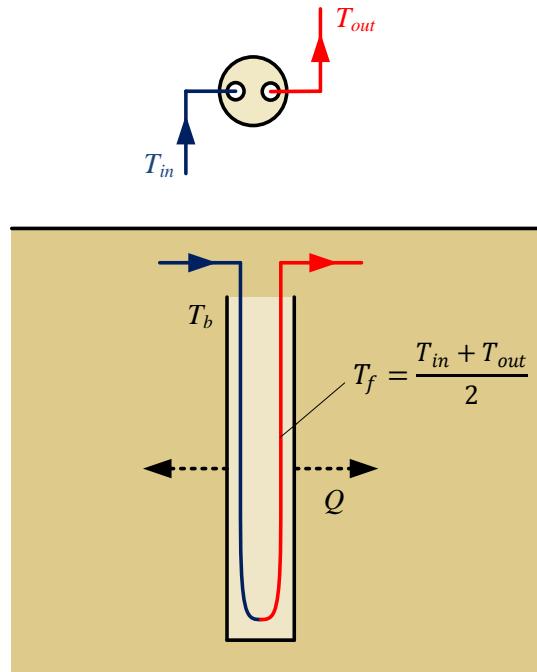


Figure 3-1: Illustration des paramètres de l'Équation (3.1)

Température à la paroi du puits

Pour un taux d'injection de chaleur par unité de longueur constant, la température à la paroi du puits, T_b , est donnée par :

$$T_b(t) = T_g + Q h(t) \quad (3.2)$$

où T_g est la température du sol non perturbée, et h est le facteur de réponse thermique. Dans le TYPE 241 la valeur de h peut être déterminée grâce à l'une des trois méthodes analytiques suivantes : source linéaire infinie, source cylindrique infinie ou source linéaire finie.

Au cours d'une simulation, le taux d'injection de chaleur par unité de longueur, Q , est susceptible de varier, il faut donc recourir à la superposition temporelle des charges. Pour une succession de taux d'injection de chaleur, $Q(t_i)$, débutant au temps t_{i-1} , et finissant au temps t_i , la température à la paroi du puits à un temps t_n est évaluée à l'aide de l'expression :

$$T_b(t_n) = T_g + \sum_{i=1}^n q(t_i) h(t_n - t_{i-1}) \quad (3.3)$$

avec

$$q(t_i) = Q(t_i) - Q(t_{i-1})$$

En dissociant le taux d'injection du dernier pas de temps, $Q(t_n)$, des taux d'injection des pas de temps précédents, il est possible d'exprimer la température à la paroi du puits de la façon suivante :

$$T_b(t_n) = T_b^* + Q(t_n) h(t_n - t_{n-1}) \quad (3.4)$$

avec

$$T_b^* = T_g + \Delta T^*(t_n)$$

où ΔT^* est la variation de température associée aux taux d'injections des pas de temps précédents :

$$\Delta T_i^*(t_n) = \sum_{i=1}^{n-1} q(t_i) h(t_n - t_{i-1}) - Q(t_{n-1}) h(t_n - t_{n-1}) \quad (3.5)$$

La technique d'agrégation des charges de Liu (2005) est utilisée pour simplifier la superposition temporelle et ainsi réduire le temps de calcul associée à la superposition temporelle des charges.

Calcul des facteurs de réponse thermique

L'utilisateur peut choisir parmi trois méthodes analytiques pour calculer les facteurs de réponse thermique. Ces trois méthodes sont détaillées dans la revue de littérature à la section 1.1.1.

Avec la méthode de la source linéique infinie, le facteur de réponse thermique est évalué à l'aide de l'expression suivante (Ingersoll & Plass, 1948) (1948) (1948) (1948) (1948) (1948) (1948) (1948) (1948) (1948) (1948) :

$$h_{SLI}(t) = \frac{1}{4 \pi k_s} \int_{\frac{R_b^2}{4 \alpha_s t}}^{\infty} \frac{e^{-\beta}}{\beta} d\beta \quad (3.6)$$

Avec la méthode de la source cylindrique infinie, le facteur de réponse de thermique s'exprime alors :

$$h_{SCI}(t) = \frac{G(Fo, p = 1)}{k_s} \quad (3.7)$$

où G , le G-factor, est calculé grâce à l'approximation de Cooper (1976) fournit à l'Équation (1.5).

Enfin avec la méthode de la source linéique finie, le facteur de réponse thermique s'exprime (Claesson & Javed, 2011) :

$$h_{SLF}(t) = \frac{1}{4 \pi k_s} \int_{\frac{1}{\sqrt{4 \alpha_s t}}}^{\infty} \exp(-r^2 s^2) \frac{Y(Hs, Ds)}{Hs^2} ds \quad (3.8)$$

où Y est fourni à l'Équation (1.9).

Le facteur de réponse thermique est déterminé de la même façon dans les autres modèles d'échangeur géothermiques verticaux simples de la suite TRNSYS, soit les TYPES 242, 243, et 244.

Bilan d'énergie sur le puits

Le bilan d'énergie sur le fluide caloporeur permet d'exprimer le taux d'injection de chaleur par unité de longueur de puits en fonction de la température du fluide à l'entrée, T_{in} , et à la sortie de l'échangeur géothermique, T_{out} :

$$Q(t_n) = \frac{\dot{m} c_{pf}}{H} (T_{in} - T_{out}) \quad (3.9)$$

Résolution

Finalement, le modèle se résume à un système de trois équations ((3.1), (3.4) et (3.9)) à trois inconnus (T_{out} , $Q(t_n)$, $T_b(t_n)$) qui s'écrit sous la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -1 & -R_b \\ 0 & 1 & -h \\ \frac{\dot{m} c_{pf}}{H} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out} \\ T_b(t_n) \\ Q(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{T_{in}}{2} \\ T_b^* \\ \frac{\dot{m} c_{pf}}{H} T_{in} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

La résolution du système d'Équations (3.10) conduit aux expressions suivantes :

$$\begin{aligned} T_{out} &= T_{in} - \frac{2 (T_{in} - T_b^*)}{2 \dot{m} c_{pf} (R_b + h(t_n))} \\ T_b(t_n) &= T_b^* + \frac{\frac{2 h(t_n) \dot{m} c_{pf}}{H} (T_{in} - T_b^*)}{1 + \frac{2 \dot{m} c_{pf}}{H} (R_b + h(t_n))} \\ Q(t_n) &= \frac{\frac{2 \dot{m} c_{pf}}{H} (T_{in} - T_b^*)}{1 + \frac{2 \dot{m} c_{pf}}{H} (R_b + h(t_n))} \end{aligned} \quad (3.11)$$

3.1.2 Variables du TYPE 241

Les différentes variables à configurer pour réaliser une simulation avec le TYPE 241 dans le logiciel TRNSYS sont détaillées ci-dessous. Les paramètres 10 à 15 concernant les paramètres de l'agrégation de Liu (2005) sont discutés à la section 1.3.

3.1.2.1 Paramètres du TYPE 241

	Nom	Unité
1	Longueur du puits (H)	m
2	Profondeur d'enterrement de la tête de puits (D)	m
3	Rayon du puits (r_b)	m
4	Résistance thermique équivalente du puits (R_b)	$\text{m} \cdot \text{K/W}$
	La résistance thermique équivalente du puits entre le fluide caloporteur et la paroi du puits (R_b), incluant la résistance convective du fluide (R_f), la résistance thermique des tuyaux (R_p) et la résistance thermique du coulis (R_g). Attention aux unités. Cette résistance s'exprime en $\text{m} \cdot \text{K/W}$, différent des unités de base comprises dans TRNSYS.	
5	Conductivité thermique du sol (k_s)	$\text{kJ/h} \cdot \text{m} \cdot \text{K}$
6	Capacité thermique volumique du sol ($\rho C_p)_s$	$\text{kJ/m}^3 \cdot \text{K}$
7	Température du sol non perturbée (T_g)	$^{\circ}\text{C}$
8	Capacité thermique massique du fluide (c_{p_f})	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
9	Densité du fluide (ρ_f)	kg/m^3
10	Taille du petit bloc	-
	Ce paramètre indique la taille des « petits bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont fusionnées pour former un « petit bloc ».	
11	Taille du moyen bloc	-
	Ce paramètre indique la taille des « moyens bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont fusionnées pour former un « moyen bloc ».	
12	Taille du grand bloc	-
	Ce paramètre indique la taille des « grands bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont fusionnées pour former un « grand bloc ».	
13	Période d'attende pour un petit bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des charges individuelles à un « petit bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont conservés intacts lors de la création d'un « petit bloc ».	
14	Période d'attende pour un moyen bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « petits blocs » à un « moyen bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui	

	sont conservés intactes lors de la création d'un « moyen bloc ».	
15	Période d'attente pour un grand bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « moyens blocs » à un « grand bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « grand bloc ».	
16	Modèle analytique	-
	Ce paramètre renseigne sur le modèle analytique utilisé pour calculer le facteur de réponse thermique :	
	1- Source linéaire finie (SLF) 2- Source cylindrique infinie (SCI) 3- Source linéaire infinie (SLI)	

3.1.2.2 Entrées du TYPE 241

	Nom	Unité
1	Température d'entrée (T_{in})	°C
2	Débit d'entrée (\dot{m})	kg/h

3.1.2.3 Sorties du TYPE 241

	Nom	Unité
1	Température de sortie (T_{out})	m
2	Débit de sortie (\dot{m})	kg/h
3	Température moyenne à la paroi du puits (T_b)	m
4	Taux d'injection de chaleur du puits (Q)	kJ/h

3.1.3 Validation du Type 241

Le TYPE 241 est comparé à des cas tests proposés par Bertagnolio et al. (2012). Ces derniers ont calculé la réponse thermique d'un échangeur géothermique vertical soumis à différents profils de charges avec les modèles analytiques SCI, SLI et SLF, ainsi qu'avec le modèle DST.

Pour le cas d'un échangeur géothermique simple, Bertagnolio et al. (2012) proposent quatre cas tests résumés dans le Tableau 3-1 correspondant aux profils de charges suivant : A : taux d'injection de chaleur constant, B : profil de charge périodique, C : profil de charge asymétrique

à dominante climatisation, et D : profil de charge constitué uniquement de charges en chauffage (sans charge en climatisation). Les charges normalisées ($q/2\pi k_s$ en °C) maximales de chacun des profils de charges sont également indiquées. Par exemple, pour le cas du test C, la charge normalisée maximale en climatisation du profil annuel est -5.42°C, et celle en chauffage est 2.81°C.

Tableau 3-1 : Les quatre cas tests proposés par Bertagnolio et al. (2012)

Cas test	Profil de charge	Charge normalisée ($q/2\pi k_s$ en °C)
A	Taux d'injection de chaleur constant	-1
B	Profil de charge périodique (de période 24 h)	-1/+1
C	Profil de charge asymétrique (à dominante climatisation)	-5.42/2.81
D	Profil de charge constitué uniquement de charges en chauffage	0/5.42

Dans la présente section, le TYPE 241 est utilisé pour reproduire les 4 cas tests. Cependant, avec TYPE 241, il n'est pas possible de spécifier directement le taux d'injection de chaleur de l'échangeur géothermique. Pour ce faire, dans l'assemblage TRNSYS utilisé pour réaliser les simulations, la température de sortie, T_{out} , est reliée à la température d'entrée de l'échangeur géothermique, T_{in} , en imposant la relation suivante :

$$T_{in} = T_{out} - \frac{q}{\dot{m}c_{p_f}} \quad (3.12)$$

où q est la charge indiquée dans le Tableau 3-1. Par exemple, pour le cas test A, l'Équation (3.12) permet d'indiquer que de la chaleur (d'intensité $-q = 2\pi k_s$ en W) est injectée au fluide caloporteur entre la sortie et l'entrée de l'échangeur géothermique.

Les résultats du TYPE 241 sont comparés aux résultats fournis par Bertagnolio et al. (2012). A noter que toutes les simulations ont été réalisées avec un pas de temps de 1 heure.

Dans les simulations qui suivent, on s'intéresse à la température à la paroi du puits, cette dernière est indépendante de la résistance thermique équivalente du puits, R_b . La résistance thermique du puits pourra donc prendre n'importe quelle valeur.

3.1.3.1 Taux d'injection de chaleur constant

Il s'agit du premier cas test, dans lequel l'échangeur géothermique est soumis à un taux d'injection de chaleur dans le sol constant. L'objectif est de déterminer l'évolution de la température à la paroi du puits, en fonction du temps adimensionné, $\ln(t/t_s)$, où t_s est un temps caractéristique ($t_s = H^2/9\alpha$).

La Figure 3-2 présente les résultats obtenus avec le TYPE 241 ainsi que ceux fournis par Bertagnolio et al. (2012). La réponse thermique du puits a été évaluée pour les trois modèles analytiques: la Figure 3-2a) correspond à la réponse thermique du puits calculée avec la solution de la source cylindrique infinie (paramètre 16 du TYPE 241 imposé à 2), la Figure 3-2b) avec la solution de la source cylindrique infinie (paramètre 16 du TYPE 241 imposé à 3), et la Figure 3-2c) avec la solution de la source linéique finie (paramètre 16 du TYPE 241 imposé à 1).

Tel que montré sur la Figure 3-2, le TYPE 241 reproduit les résultats de Bertagnolio et al. (2012) avec exactitude. Ce test permet de montrer que les facteurs de réponse thermique sont correctement calculés par le TYPE 241.

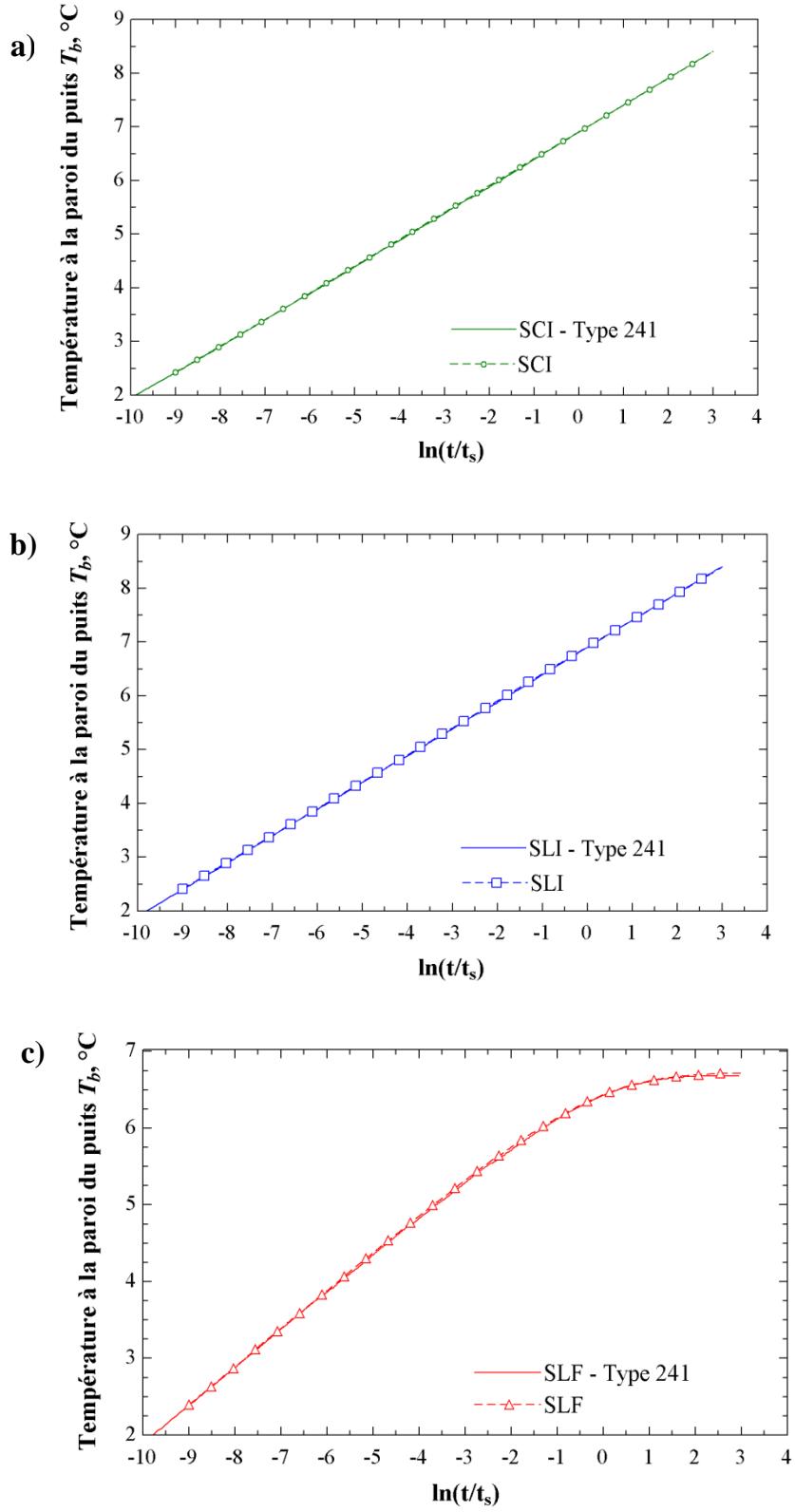


Figure 3-2 : Résultats du cas test A

3.1.3.2 Profil de charge périodique

Dans ce second cas test, le puits géothermique est soumis à des cycles d'injection et extraction de chaleur périodiques pendant 10 semaines au cours desquelles la charge normalisée, $q/2\pi k_s$, passe de $+1^\circ\text{C}$ à -1°C toutes les 12 heures.

La Figure 3-3 présente les résultats de la dernière semaine des 10 semaines de simulation, auxquels sont superposés les résultats de Bertagnolio et al. (2012).

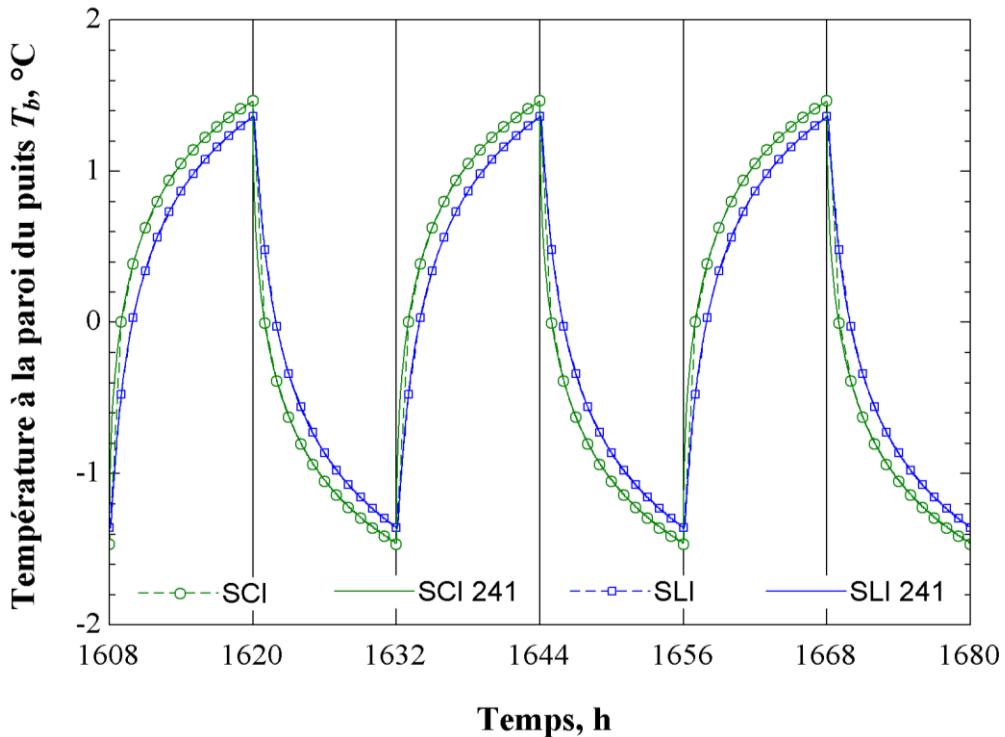


Figure 3-3: Résultats du cas test B

Tel qu'illustré à la Figure 3-3, la correspondance entre les températures simulées avec le TYPE 241 et les températures calculées par Bertagnolio et al. (2012) est excellente : pour la SCI, l'écart quadratique moyen est de 0.005°C , tandis que l'écart maximal est de 0.011°C ; pour la SLI, l'écart quadratique moyen est de 0.003°C , tandis que l'écart maximal de 0.012°C .

A noter que dans le cas test B, Bertagnolio et al. (2012) calculent la superposition temporelle des charges sans faire d'agrégation des charges. Pour sa part, le TYPE 241 utilise la technique d'agrégation de Liu. Les écarts minimes indiqués ci-dessus, sont sans doute causés par le recours à une méthode d'agrégation dans le TYPE 241.

3.1.3.3 Profil de charge asymétrique à dominante climatisation

Dans ce troisième cas test, le puits géothermique est soumis à un profil de charge asymétrique, illustré à la Figure 3-4. Les valeurs négatives indiquent qu'il s'agit de charges rejetées dans le sol environnant (le bâtiment est donc en climatisation). Annuellement, le profil de charge est à dominante climatisation. La charge moyenne annuelle est de -2.83 W/m.

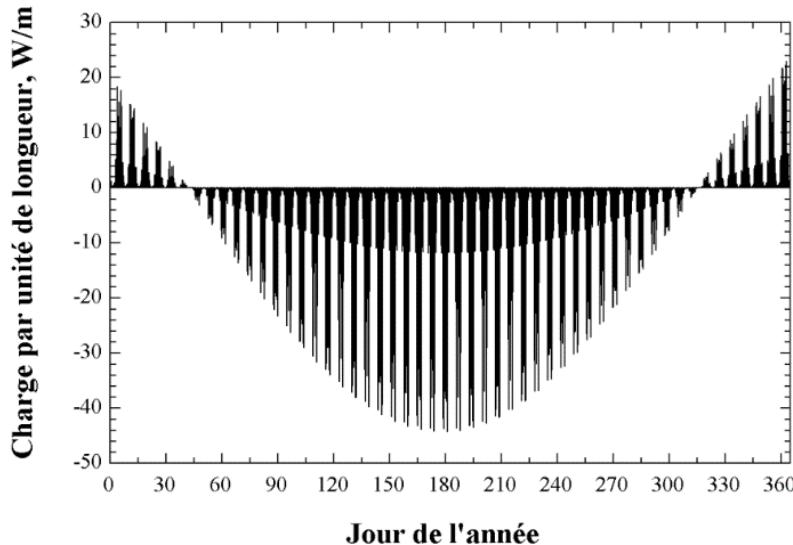


Figure 3-4: Profil de charge du cas test C

Une simulation sur une durée de 20 ans avec un pas de temps d'une heure a été réalisée avec le TYPE 241, en imposant à l'échangeur géothermique le profil de charge de la Figure 3-4. Les simulations ont été réalisées avec un ordinateur équipé d'un processeur Intel Core i7 (3.40 GHz) et d'une mémoire vive de 16 Go. Le temps de calcul de la simulation avec le TYPE 241 est de 15 s. À titre de comparaison, le temps de calcul est de 18 s avec le modèle DST (TYPE 557). Les résultats de la dernière année de simulation sont comparés aux résultats fournis par Bertagnolio et al. (2012) correspondant au modèle de la source cylindrique infinie couplée à la méthode d'agrégation MLAA, et au modèle DST. Il est à noter qu'il n'est pas possible d'obtenir directement la température à la paroi du puits avec le modèle DST. Dans le modèle DST, la résistance thermique équivalente du puits, R_b est fixée à une très petite valeur, et la température à la paroi du puits est supposée être égale avec la température moyenne du fluide à l'intérieur du puits.

Tel que présenté à la Figure 3-5, le TYPE 241 reproduit les résultats du modèle DST avec un écart toujours inférieur à $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, et avec un écart moyen quadratique de 0.09°C . En comparaison, l'écart entre le modèle proposé par Bertagnolio et al. (2012), noté par l'acronyme SCI-MLAA sur la Figure 3-5, et le modèle DST est toujours inférieur à $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$, avec un écart quadratique moyen de 0.26°C .

Le TYPE 241 qui a recours à la méthode d'agrégation des charges de Liu est plus proche du modèle DST que le modèle SCI-MLAA qui utilise la méthode d'agrégation des charges MLAA.

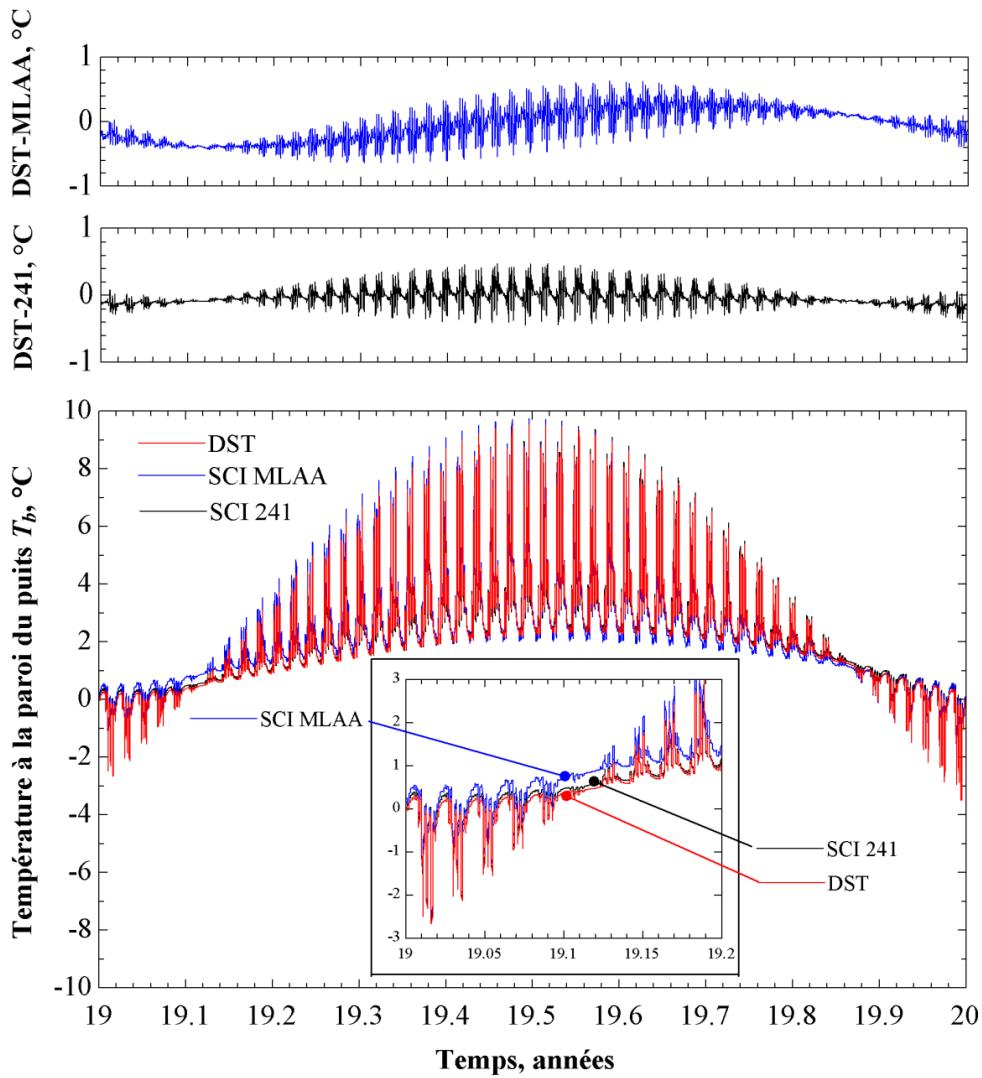


Figure 3-5: Résultats du cas test C

3.1.3.4 Profil de charge constitué uniquement de charges en chauffage

Dans le quatrième et dernier cas test, le profil de charge, illustré à la Figure 3-6, contient uniquement des sollicitations en chauffage avec une longue période d'inactivité en été.

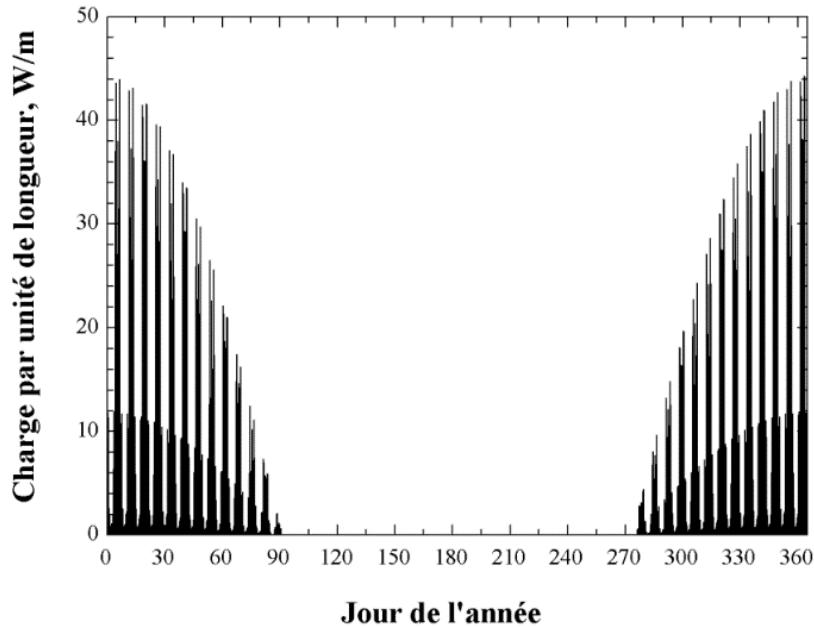


Figure 3-6: Profil de charge du cas test D

Une simulation sur une durée de 20 ans a été réalisée avec le TYPE 241, en imposant à l'échangeur géothermique le profil de charge illustré à la Figure 3-6. Les résultats de la dernière année de simulation, sont présentés et analysés à la Figure 3-7. De plus, ils sont comparés aux résultats fournis par Bertagnolio et al. (2012) correspondants au modèle de la source cylindrique infinie couplée à la méthode d'agrégation MLAA, et au modèle DST.

Comme pour le cas test C, les résultats issus de la simulation avec le TYPE 241 suivent les mêmes tendances que ceux fournis par le modèle DST. En effet, le TYPE 241 reproduit les résultats du modèle DST avec un écart toujours inférieur à $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$, et avec un écart moyen quadratique de 0.07°C . Finalement, tel que montré avec les cas tests C et D, après 20 années de simulations, le TYPE 241 approche les résultats du modèle DST avec un écart maximal de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Le TYPE 241 parvient donc à donner des résultats convenables par rapport à l'un des modèles d'échangeur géothermique de référence.

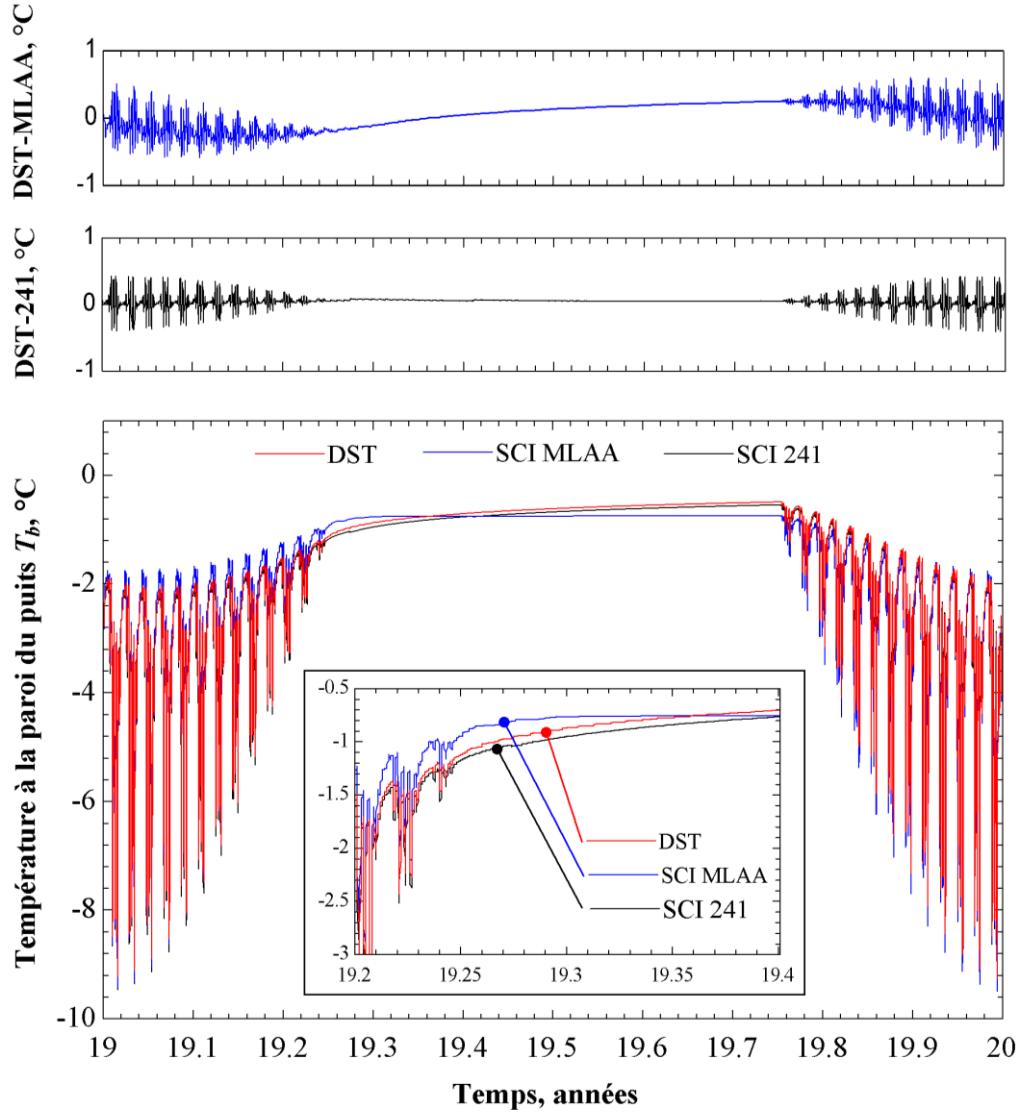


Figure 3-7: Résultats du cas test D

3.2 TYPE 242

Le TYPE 242 modélise un échangeur géothermique simple, à quatre tuyaux (deux tubes en U), avec deux circuits indépendants (débits massiques et températures d’entrées différents). Il est basé sur l’approche de Eslami-nejad et Bernier (2011).

Le TYPE 242 a été implémenté dans TRNSYS par Massimo Cimmino, étudiant au doctorat dans le groupe du professeur Bernier. Cette section ajoute une description détaillée du TYPE ainsi que quelques cas de validation réalisés dans le cadre de ce mémoire

3.2.1 Présentation du modèle

Le modèle d'Eslami-nejad et Bernier (2011) est basé sur les approches de Hellström (1991) et de Zeng et al. (2003) dans lesquels l'intérieur du puits est modélisé par un réseau de résistances thermiques représenté à la Figure 3-8. Le premier circuit est constitué des tuyaux #1 (descendant) et #3 (ascendant), tandis que le circuit est composé des tuyaux #2 (descendant) et #4 (ascendant). A partir de la représentation de la Figure 3-8, il est possible d'établir le système d'équations suivant :

$$\begin{aligned} T_1(z) - T_b &= R_{11}q_1 + R_{12}q_2 + R_{13}q_3 + R_{12}q_4 \\ T_2(z) - T_b &= R_{12}q_1 + R_{11}q_2 + R_{12}q_3 + R_{13}q_4 \\ T_3(z) - T_b &= R_{13}q_1 + R_{12}q_2 + R_{11}q_3 + R_{12}q_4 \\ T_4(z) - T_b &= R_{12}q_1 + R_{13}q_2 + R_{12}q_3 + R_{11}q_4 \end{aligned} \quad (3.13)$$

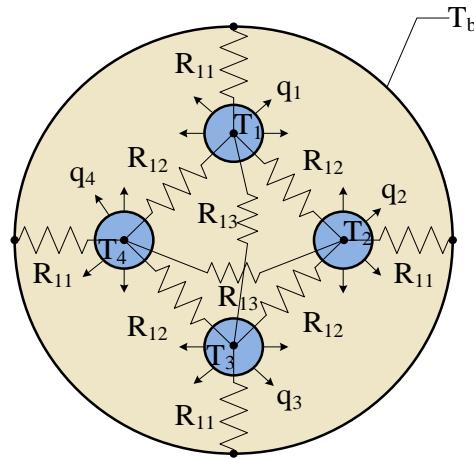


Figure 3-8: Nomenclature utilisée dans l'Équation (3.13)

Hellström (1991) propose des expressions pour les résistances thermiques R_{11} , R_{12} , et R_{13} basées sur la solution de la source linéique infinie :

$$R_{11} = \frac{1}{2\pi k_g} \left[\ln \left(\frac{r_b}{r_o} \right) - \frac{k_g - k_s}{k_g + k_s} \ln \left(\frac{{r_b}^2 - {D_s}^2}{{r_b}^2} \right) \right] + R_{fp} \quad (3.14)$$

$$R_{12} = \frac{1}{2\pi k_g} \left[\ln \left(\frac{r_b}{\sqrt{2}D_s} \right) - \frac{k_g - k_s}{2(k_g + k_s)} \ln \left(\frac{{r_b}^4 + {D_s}^4}{{r_b}^4} \right) \right]$$

$$R_{13} = \frac{1}{2\pi k_g} \left[\ln \left(\frac{r_b}{2D_s} \right) - \frac{k_g - k_s}{k_g + k_s} \ln \left(\frac{{r_b}^2 + {D_s}^2}{{r_b}^2} \right) \right]$$

où R_{fp} est la résistance thermique entre le fluide caloporteur et la paroi externe d'un tuyau. Elle combine la résistance convective du fluide et la résistance thermique du tuyau.

La température du fluide caloporteur varie le long du puits. Les taux d'injection de chaleur par unité de longueur de chaque tuyau peuvent être exprimés en fonction de la variation de température axiale du fluide :

$$\begin{aligned} q_1 &= -(\dot{m} C_f)_{1-3} \frac{\partial T_1(z)}{\partial z} \\ q_2 &= -(\dot{m} C_f)_{2-4} \frac{\partial T_2(z)}{\partial z} \\ q_3 &= (\dot{m} C_f)_{1-3} \frac{\partial T_3(z)}{\partial z} \\ q_4 &= (\dot{m} C_f)_{2-4} \frac{\partial T_4(z)}{\partial z} \end{aligned} \tag{3.15}$$

À noter que dans l'approche de Eslami-nejad et Bernier (2011) le produit $(\dot{m} C_f)_{1-3}$ peut être différent de $(\dot{m} C_f)_{2-4}$. Ainsi, les débits massiques à l'entrée des deux tubes en U peuvent être différents. Finalement, le système d'Équations (3.13) peut être réécrit comme un système d'équations différentielles linéaires :

$$\begin{aligned} -(\dot{m} C_f)_{1-3} \frac{\partial T_1(z)}{\partial z} &= \frac{T_1(z) - T_b}{R_1^\Delta} + \frac{T_1(z) - T_2(z)}{R_{12}^\Delta} + \frac{T_1(z) - T_3(z)}{R_{13}^\Delta} + \frac{T_1(z) - T_4(z)}{R_{12}^\Delta} \\ -(\dot{m} C_f)_{2-4} \frac{\partial T_2(z)}{\partial z} &= \frac{T_2(z) - T_1(z)}{R_{12}^\Delta} + \frac{T_2(z) - T_b}{R_1^\Delta} + \frac{T_2(z) - T_3(z)}{R_{12}^\Delta} + \frac{T_2(z) - T_4(z)}{R_{13}^\Delta} \\ (\dot{m} C_f)_{1-3} \frac{\partial T_3(z)}{\partial z} &= \frac{T_3(z) - T_1(z)}{R_{13}^\Delta} + \frac{T_3(z) - T_2(z)}{R_{12}^\Delta} + \frac{T_3(z) - T_b}{R_1^\Delta} + \frac{T_3(z) - T_4(z)}{R_{12}^\Delta} \\ (\dot{m} C_f)_{2-4} \frac{\partial T_4(z)}{\partial z} &= \frac{T_4(z) - T_1(z)}{R_{12}^\Delta} + \frac{T_4(z) - T_2(z)}{R_{13}^\Delta} + \frac{T_4(z) - T_3(z)}{R_{12}^\Delta} + \frac{T_4(z) - T_b}{R_1^\Delta} \end{aligned} \tag{3.16}$$

où

$$\begin{aligned}
 R_1^\Delta &= R_{11} + R_{13} + 2R_{12} \\
 R_{12}^\Delta &= \frac{R_{11}^2 + R_{13}^2 + 2R_{11}R_{13} - 4R_{12}^2}{R_{12}} \\
 R_{13}^\Delta &= \frac{(R_{11} - R_{13})(R_{11}^2 + R_{13}^2 + 2R_{11}R_{13} - 4R_{12}^2)}{R_{13}^2 + R_{11}R_{13} - 2R_{12}^2}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

À noter que la température à la paroi du puits, T_b , est supposée uniforme sur la circonférence et sur la hauteur du puits.

Eslami-nejad et Bernier (2011) ont résolu analytiquement le système d'équation (3.15). Cependant, leur solution ne peut être utilisée directement dans le TYPE 242. En effet, dans leur modèle ils supposent la température à la paroi connue, et proposent des expressions des températures à la sortie de l'échangeur géothermique qui sont fonction de la température à la paroi. Or dans le TYPE 242, la température à la paroi du puits est une inconnue. C'est pourquoi le modèle de Eslami-nejad et Bernier (2011) a dû être adapté pour être implémenté dans le logiciel de simulation TRNSYS. L'adaptation est détaillée en Annexe A.

3.2.2 Variables du TYPE 242

Les différentes variables à configurer pour réaliser une simulation avec le TYPE 242 dans le logiciel TRNSYS sont détaillées ci-dessous. Les paramètres 25 à 30 concernant les paramètres de l'agrégation de Liu (2005) sont discutés à la section 1.3.

3.2.2.1 Paramètres du TYPE 242

	Nom	Unité
1	Longueur du puits (H)	m
2	Profondeur d'enterrement de la tête de puits (D)	m
3	Rayon du puits (r_b)	m
4	Diamètre intérieur du tube en U ($2r_o$)	m
5	Diamètre extérieur du tube en U ($2r_i$)	m

6	Demi-espacement entre les centres des tuyaux (D_s)	m
7	Conductivité thermique du sol (k_s)	kJ/h · m · K
8	Capacité thermique volumique du sol ($\rho C_p)_s$	kJ/m ³ · K
9	Conductivité thermique du coulis (k_g)	kJ/h · m · K
10	Conductivité thermique du tuyau (k_p)	kJ/h · m · K
11	Rugosité du tuyau (ϵ)	mm
12	Antigel dans le tuyau 1	-
	L'utilisateur a le choix entre 3 types d'antigels :	
13	<ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol • 2 : Éthylène glycol • 3 : Méthylène glycol <p>L'utilisateur peut également choisir l'eau (0), ou définir lui-même les propriétés thermiques du fluide caloporteur (-1). Dans ce cas, les propriétés thermiques du fluide caloporteur sont définies à l'aide des paramètres 15 à 18.</p>	
	Concentration de l'antigel dans le tuyau 1	%
14	L'utilisateur doit spécifier la concentration d'antigel :	
	<ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol ($15.2 < Conc < 57$) • 2 : Éthylène glycol ($11.1 < Conc < 60.1$) • 3 : Méthylène glycol ($7.8 < Conc < 44.3$) 	
15	Capacité thermique massique du fluide dans le tuyau 1	kJ/kg · K
16	Conductivité thermique du fluide dans le tuyau 1	kJ/h · m · K
17	Masse volumique du fluide dans le tuyau 1	kg/m ³
18	Viscosité dynamique du fluide dans le tuyau 1	kg/ m · h
	Antigel dans le tuyau 2	-
19	L'utilisateur a le choix entre 3 types d'antigels :	
	<ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol • 2 : Éthylène glycol • 3 : Méthylène glycol <p>L'utilisateur peut également choisir l'eau (0), ou définir lui-même les propriétés thermiques du fluide caloporteur (-1). Dans ce cas, les propriétés thermiques du fluide caloporteur sont définies à l'aide des paramètres 15 à 18.</p>	

	Concentration de l'antigel dans le tuyau 2	%
19	L'utilisateur doit spécifier la concentration d'antigel : <ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol ($15.2 < Conc < 57$) • 2 : Éthylène glycol ($11.1 < Conc < 60.1$) • 3 : Méthylène glycol ($7.8 < Conc < 44.3$) 	
20	Capacité thermique massique du fluide dans le tuyau 2	kJ/kg · K
21	Conductivité thermique du fluide dans le tuyau 2	kJ/h · m · K
22	Masse volumique du fluide dans le tuyau 2	kg/m ³
23	Viscosité dynamique du fluide dans le tuyau 2	kg/ m · h
24	Température du sol non perturbée (T_g)	C
25	Taille du petit bloc Ce paramètre indique la taille des « petits bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont fusionnées pour former un « petit bloc ».	-
26	Taille du moyen bloc Ce paramètre indique la taille des « moyens bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont fusionnées pour former un « moyen bloc ».	-
27	Taille du grand bloc Ce paramètre indique la taille des « grands bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont fusionnées pour former un « grand bloc ».	-
28	Période d'attende pour un petit bloc Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des charges individuelles à un « petit bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont conservés intactes lors de la création d'un « petit bloc ».	-
29	Période d'attende pour un moyen bloc Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « petits blocs » à un « moyen bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « moyen bloc ».	-
30	Période d'attende pour un grand bloc Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « moyens blocs » à un « grand bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « grand bloc ».	-

31	Modèle analytique	-
	Ce paramètre renseigne sur le modèle analytique utilisé pour calculer le facteur de réponse thermique :	

- 1- Source linéaire finie (SLF)
- 2- Source cylindrique infinie (SCI)
- 3- Source linéaire infinie (SLI)

3.2.2.2 Entrées du TYPE 242

	Nom	Unité
1	Température à l'entrée du tube en U #1 (T_{in-1})	°C
2	Débit à l'entrée du tube en U #1 (\dot{m}_1)	kg/h
3	Température à l'entrée du tube en U #2 (T_{in-2})	°C
4	Débit à l'entrée du tube en U #2 (\dot{m}_2)	kg/h

3.2.2.3 Sorties du TYPE 242

	Nom	Unité
1	Température à la sortie du tube en U #1 (T_{out-1})	m
2	Débit à la sortie du tube en U #1 (\dot{m}_1)	kg/h
3	Température à la sortie du tube en U #2 (T_{out-2})	m
4	Débit à la sortie du tube en U #2 (\dot{m}_2)	kg/h
5	Température à la paroi du puits (T_b)	m
6	Taux d'injection de chaleur du puits (Q)	kJ/h
7	Temps de résidence du fluide caloporteur à l'intérieur dans le tube en U #1	h
8	Nombre de Reynolds dans le tube en U #1	-
9	Perte de charge à l'intérieur du tube en U #1	kPa
10	Temps de résidence du fluide caloporteur à l'intérieur dans le tube en U #2	h
11	Nombre de Reynolds dans le tube en U #2	-
12	Perte de charge à l'intérieur du tube en U #2	kPa

3.2.3 Validation du TYPE 242

Aucune donnée sur les échangeurs géothermiques à deux tubes en U avec deux circuits indépendants n'a pu être trouvée dans la littérature. Il est donc difficile de comparer le TYPE 242 à d'autres résultats, aussi bien à des mesures expérimentales qu'à des données provenant de simulation d'autres modèles existant.

C'est pourquoi le TYPE 242 sera seulement comparé au modèle TRCM à deux tubes en U avec deux circuits indépendants, correspondant au TYPE 244. La comparaison se trouve à la section 3.4.2.

3.3 TYPE 243

Le TYPE 243 est un modèle d'échangeur géothermique à deux tuyaux, intégrant les phénomènes transitoires se produisant à l'intérieur du puits. La théorie du modèle est présentée dans le Chapitre 2. Le TYPE 243 a fait l'objet d'une publication (Godefroy & Bernier, 2014).

3.3.1 Variables du TYPE 243

Les différentes variables à configurer pour réaliser une simulation avec le TYPE 243 dans le logiciel TRNSYS sont détaillées ci-dessous. Les paramètres 23 à 29 concernant les paramètres de l'agrégation de Liu (2005) sont discutés à la section 1.3.

3.3.1.1 Paramètres du TYPE 243

	Nom	Unité
1	Longueur du puits (H)	m
2	Profondeur d'enterrement de la tête de puits (D)	m
3	Rayon du puits (r_b)	m
4	Rayon extérieur du tube en U (r_o)	m
5	Rayon intérieur du tube en U (r_i)	m
6	Demi-espacement entre les centres des tuyaux (D_s)	m
7	Conductivité thermique du sol (k_s)	kJ/h · m · K
8	Capacité thermique volumique du sol ($\rho C_p)_s$	kJ/m ³ · K

9	Conductivité thermique du coulis (k_g)	kJ/h · m · K
10	Capacité thermique volumique du coulis ($\rho C_p)_g$	kJ/m ³ · K
11	Conductivité thermique du tuyau (k_p)	kJ/h · m · K
12	Rugosité du tuyau (ϵ)	mm
13	Antigel L'utilisateur a le choix entre 3 types d'antigel : <ul style="list-style-type: none">• 1 : Propylène glycol• 2 : Éthylène glycol• 3 : Méthylène glycol L'utilisateur peut également choisir l'eau (0), ou définir lui-même les propriétés thermiques du fluide caloporteur (-1). Dans ce cas, les propriétés thermiques du fluide caloporteur sont définies à l'aide des paramètres 15 à 18.	-
14	Concentration de l'antigel (Conc) L'utilisateur doit spécifier la concentration d'antigel : <ul style="list-style-type: none">• 1 : Propylène glycol ($15.2 < Conc < 57$)• 2 : Éthylène glycol ($11.1 < Conc < 60.1$)• 3 : Méthylène glycol ($7.8 < Conc < 44.3$)	%
15	Capacité thermique massique du fluide (c_{p_f})	kJ/kg · K
16	Conductivité thermique du coulis (k_f)	kJ/h · m · K
17	Masse volumique du fluide (ρ_f)	kg/m ³
18	Viscosité dynamique du fluide (μ_f)	kg/m.s
19	Gradient géothermique	K/m
20	Température ambiante moyenne annuelle	°C
21	Amplitude de la température ambiante annuelle	°C
22	Décalage temporel (nombre de jours entre le 1^{er} janvier et le jour le plus froid de l'année)	Jour
23	Premier jour de la simulation	Jour
24	Taille du petit bloc Ce paramètre indique la taille des « petits bacs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont fusionnées pour former un « petit bloc ».	-

25	Taille du moyen bloc	-
	Ce paramètre indique la taille des « moyens bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont fusionnées pour former un « moyen bloc ».	
26	Taille du grand bloc	-
	Ce paramètre indique la taille des « grands bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont fusionnées pour former un « grand bloc ».	
27	Période d'attende pour un petit bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des charges individuelles à un « petit bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont conservés intactes lors de la création d'un « petit bloc ».	
28	Période d'attende pour un moyen bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « petits blocs » à un « moyen bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « moyen bloc ».	
29	Période d'attende pour un grand bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « moyens blocs » à un « grand bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « grand bloc ».	
30	Nombres de tranches axiales (n_H)	-
31	Prise en compte de la capacité thermique du fluide	-
	Par défaut, la capacité thermique du fluide est prise en compte (correspond à la valeur 1). L'utilisateur peut demander au TYPE 243 de négliger les effets de la capacité thermique du fluide en imposant ce paramètre à la valeur 0.	

3.3.1.2 Entrées du TYPE 243

	Nom	Unité
1	Température d'entrée (T_{in})	°C
2	Débit d'entrée (\dot{m})	kg/h

3.3.1.3 Sorties du TYPE 243

	Nom	Unité
1	Température de sortie (T_{out})	°C
2	Débit à la sortie (\dot{m})	kg/h

3	Taux d'injection de chaleur du puits (Q)	kJ/h
4	Température moyenne à la paroi du puits (T_b)	°C
5	Résistance thermique équivalente du puits (R_b)	m · K/W
6	Résistance thermique interne du puits (R_a)	m · K/W
7	Résistance thermique R_g	m · K/W
8	Résistance thermique R_{gg}	m · K/W
9	Résistance thermique R_{fp}	m · K/W
10	Temps de résidence du fluide caloporteur à l'intérieur du puits	h
11	Nombre de Reynolds (Re)	-
12	Perte de charge à l'intérieur du puits (ΔP)	kPa
13 à $13+n_H$	Température du fluide descendant dans la tranche i ($T_{1,i}$)	°C
$13+n_H+1$ à $13+2n_H$	Température du fluide ascendant dans la tranche i ($T_{2,i}$)	°C

3.3.2 Validation du TYPE 243

Cette section présente quatre cas de validation du TYPE 243. Dans un premier temps, le TYPE 243 est comparé à d'autres modèles d'échangeurs géothermiques. Puis, il est ensuite comparé à des données expérimentales.

3.3.2.1 Comparaison avec d'autres modèles existants (Godefroy et Bernier, 2014)

Le TYPE 243 est comparé à trois modèles existants qui tiennent compte du comportement transitoire à l'intérieur de l'échangeur géothermique : le « General Elliptical Multi-Block Solver » (GEMS2D et GEMS3D) de He (2012) et le modèle EWS de Wetter et Huber (1997) connu sous le nom « TYPE 451 » dans TRNSYS.

Le « General Elliptical Multi-Block Solver » repose sur la résolution numérique de l'équation d'advection et de diffusion de chaleur. Le modèle GEMS2D traite la modélisation d'un échangeur géothermique comme un problème 2D. Le modèle GEMS3D tient compte des phénomènes axiaux, et modélise l'échangeur géothermique comme un problème à trois dimensions. Il simule l'écoulement du fluide dans le tube en U, ainsi que les transferts de chaleur axiaux à l'intérieur du puits et dans le sol.

Le modèle EWS (Wetter & Huber, 1997) utilise le concept des capacités/résistances. Ce modèle est présenté dans la revue de littérature à la section 1.4.2. Pour réaliser une comparaison rigoureuse entre le TYPE 243 et le modèle EWS, le TYPE 451 a été modifié et adapté pour modéliser un échangeur géothermique à un seul tube en U.

La comparaison présentée dans cette section est basée sur un cas test proposé par He et al. (2009). Il s'agit de modéliser le comportement d'un puits géothermique dans lequel circule un fluide soumis à des changements brusques de température, passant de 10°C à 20°C toutes les 15 min. Les caractéristiques du puits et des propriétés thermiques du sol sont données dans le Tableau 3-2. Le comportement du puits géothermique a été simulé à l'aide du TYPE 243, et du TYPE 451. Les résultats de ces simulations ont été superposés aux résultats de He et al. (2009) sur la Figure 3-9 afin de comparer le TYPE 243 au modèle EWS et aux modèles GEMS2D/GEMS3D.

Tableau 3-2: Paramètres utilisés pour la comparaison avec d'autres modèles existants

Paramètre	Valeur	Unité
L	100	m
r_b	0.15	m
r_i	0.013	m
r_o	0.016	m
D_s	0.032	m
k_f	0.6	W/m·K
$(\rho C_p)_f$	4.2	MJ/m ³ ·K
k_p	0.39	W/m·K
$(\rho C_p)_p$	1.77	MJ/m ³ ·K
k_g	0.75	W/m·K
$(\rho C_p)_g$	3.9	MJ/m ³ ·K
k_s	2.5	W/m·K
$(\rho C_p)_s$	2.5	MJ/m ³ ·K
T_g	10	°C
v	1	m/s

Le modèle GEMS3D est un modèle numérique 3D détaillé, dont les résultats sont utilisés ici comme référence. Les résultats issus de la simulation avec le TYPE 243 suivent les mêmes tendances que ceux fournis par le modèle GEMS3D. Ils approchent avec une meilleure concordance le modèle GEMS3D que les résultats du TYPE 451. En effet l'écart moyen entre les résultats du TYPE 243 et du modèle GEMS3D est de 0.59°C , tandis que l'écart moyen entre les résultats du TYPE 451 et du modèle GEMS3D est de 1.20°C .

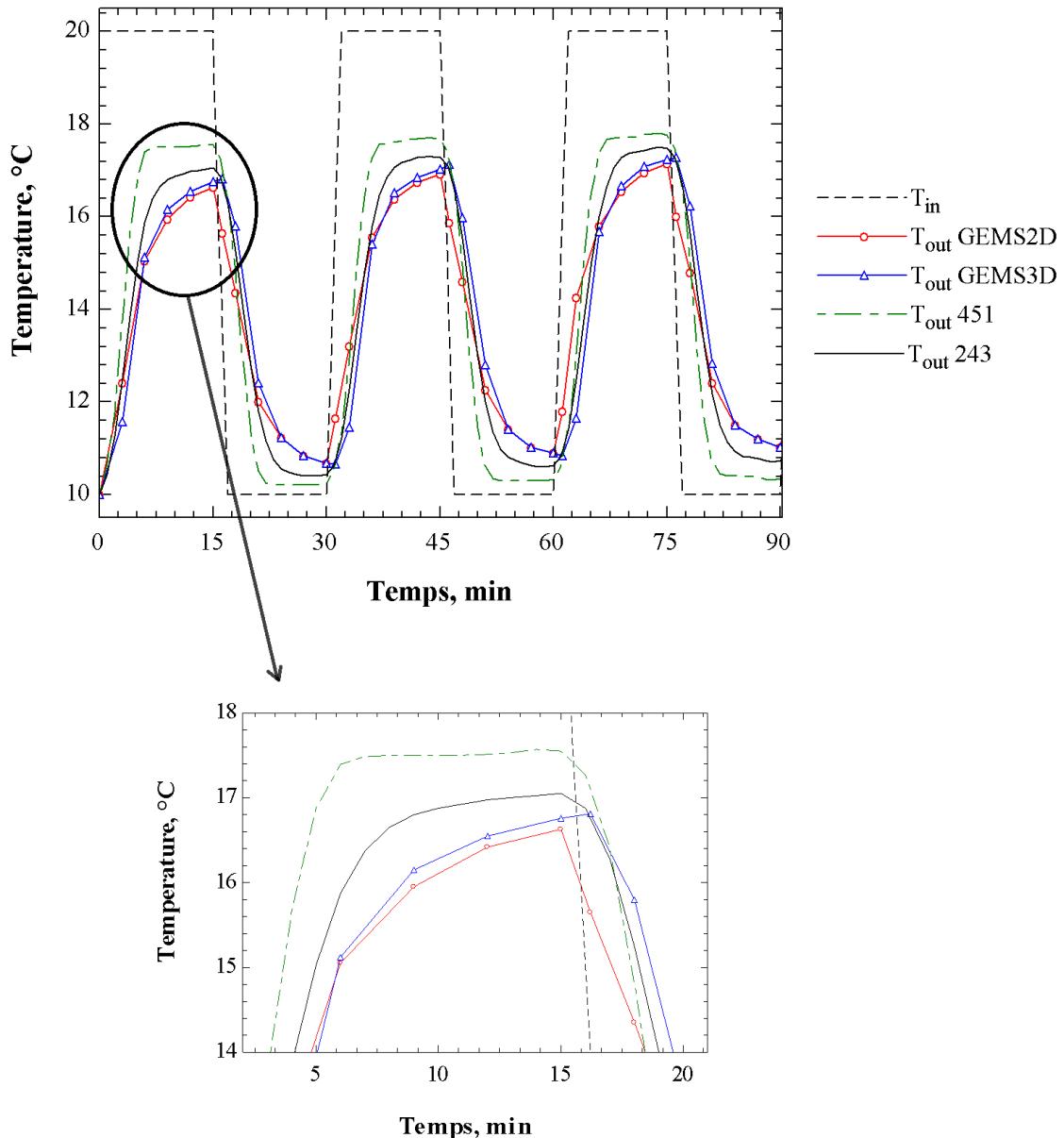


Figure 3-9 : Comparaison du TYPE 243 avec le TYPE 451 (Wetter & Huber, 1997) et les modèles GEMS2D/GEMS3D de He (2012)

Un modèle d'échangeur géothermique entièrement discrétré tel que le modèle GEMS3D serait normalement préconisé pour sa précision. Cependant, un tel modèle nécessite un temps de calcul trop important pour être utilisé dans un logiciel de simulation énergétique pour réaliser des simulations annuelles. A cet égard, le TYPE 243 apparaît comme un bon compromis entre temps de calcul et précision des résultats.

3.3.2.2 Validation avec les données du Centre Canadien des Technologies Résidentielles (CCTR)

La présente section traite de la validation du TYPE 243 à partir de mesures expérimentales réalisées par le Centre Canadien des Technologies Résidentielles (CCTR). Ces mesures ont été effectuées sur des puits géothermiques verticaux installés sur le site du Conseil National de Recherches Canada (CNRC), à Ottawa (Yang et al., 2007).

Deux séries de mesures sont utilisées :

- Un essai de réponse thermique réalisé du 7 au 9 septembre 2006.
- Des mesures relevées pendant 49 jours consécutifs du 2 novembre au 20 décembre 2006 (jour 306 à 354) sur deux puits géothermiques couplés à deux pompes à chaleurs.

L'essai de réponse thermique est utilisé pour déterminer les propriétés thermiques du sol. Ces propriétés sont ensuite exploitées pour reproduire le comportement des puits géothermiques et comparer les résultats du TYPE 243 avec les mesures expérimentales.

Interprétation de l'essai de réponse thermique

L'essai de réponse thermique a été réalisé sur un puits géothermique de 75 m de profondeur et de diamètre 150 mm dans lequel est installé un tube en U en polyéthylène haute densité, de conductivité thermique $k_g = 0.4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (dont le diamètre extérieur vaut 25 mm, et le diamètre intérieur 20.4 mm). Les deux tuyaux sont espacés d'une distance (centre à centre) de 102 mm à l'aide d'entretoises. Un coulis de sable et de bentonite (de concentration 20%) est utilisé pour combler le puits. Il est supposé que la conductivité thermique k_g est de 0.8 W/m·K, et la capacité thermique volumique, $(\rho C_p)_g$ de 3900 kJ/m³·K. Le fluide circulant dans les tuyaux est de l'eau.

Pendant ce test, 5950 W sont transmis au fluide pendant 48 h d'affilé. Yang et al. (2007) ont proposé une première interprétation de l'essai de réponse thermique dans lequel ils estiment la

conductivité thermique du sol, $k_s = 2.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, et la température moyenne du sol, $T_g = 11.3 \text{ }^\circ\text{C}$. Lors du forage du puits, trois couches distinctes ont été identifiées : en surface le sol se compose d'une couche d'argile jusqu'à une profondeur d'environ 15 m, suivi d'une couche de gravier, puis d'une couche de calcaire jusqu'en bas du puits. En se référant à la table des propriétés thermiques des roches de l'ASHRAE Handbook (2011), la diffusivité thermique du calcaire est comprise entre $0.084 \text{ m}^2/\text{jour}$ et $0.13 \text{ m}^2/\text{jour}$.

L'essai de réponse thermique a été reproduit avec le TYPE 243 en utilisant un pas de temps d'une minute. Plusieurs simulations ont été réalisées pour différentes valeurs de conductivité thermique et de diffusivité thermique du sol. Les valeurs qui permettent de reproduire l'essai de thermique avec le moins d'écart sont $k_s = 2.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, et $\alpha_s = 0.086 \text{ m}^2/\text{jour}$ (ce qui donne une capacité thermique volumique $(\rho C_p)_s = 2510 \text{ kJ/m}^3\cdot\text{K}$). L'évolution de la température moyenne du fluide simulé avec le TYPE 243, en utilisant ces valeurs des propriétés thermiques du sol, est tracée sur la Figure 3-10. Le TYPE 243 reproduit les températures mesurées avec un écart moyen de $0.12 \text{ }^\circ\text{C}$ ce qui est tout à fait acceptable.

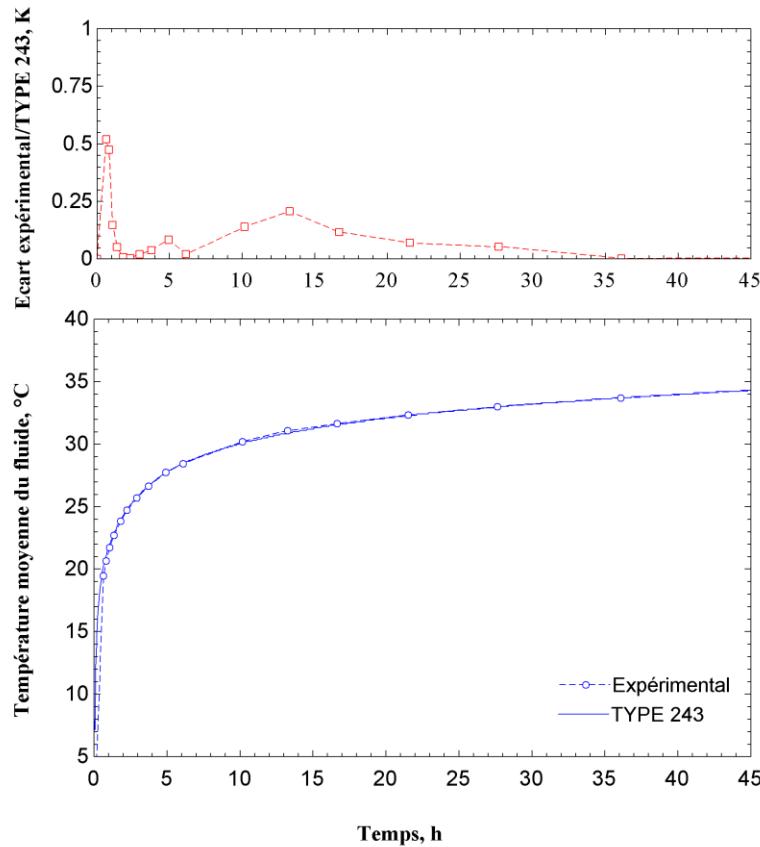


Figure 3-10 : Comparaison avec les données de l'essai de réponse thermique

Comparaison du TYPE 243 avec les données expérimentales

Les mesures expérimentales ont été menées sur deux puits géothermiques, de profondeur 56 m, espacés de 9.2 m. Ces deux puits sont situés près du puits de 75 m ayant servi à l'essai de réponse thermique. Les deux puits sont couplés à deux pompes à chaleur, de puissances nominales 3.52 kW (1 ton), installées en parallèle (voir Figure 3-11). Ces pompes à chaleur chauffe (et climatise) une maison. La pompe à chaleur n°1 est démarrée en premier, si elle ne permet pas de répondre à la charge en chauffage (ou en climatisation) de la maison, alors la pompe à chaleur n°2 est également activée.

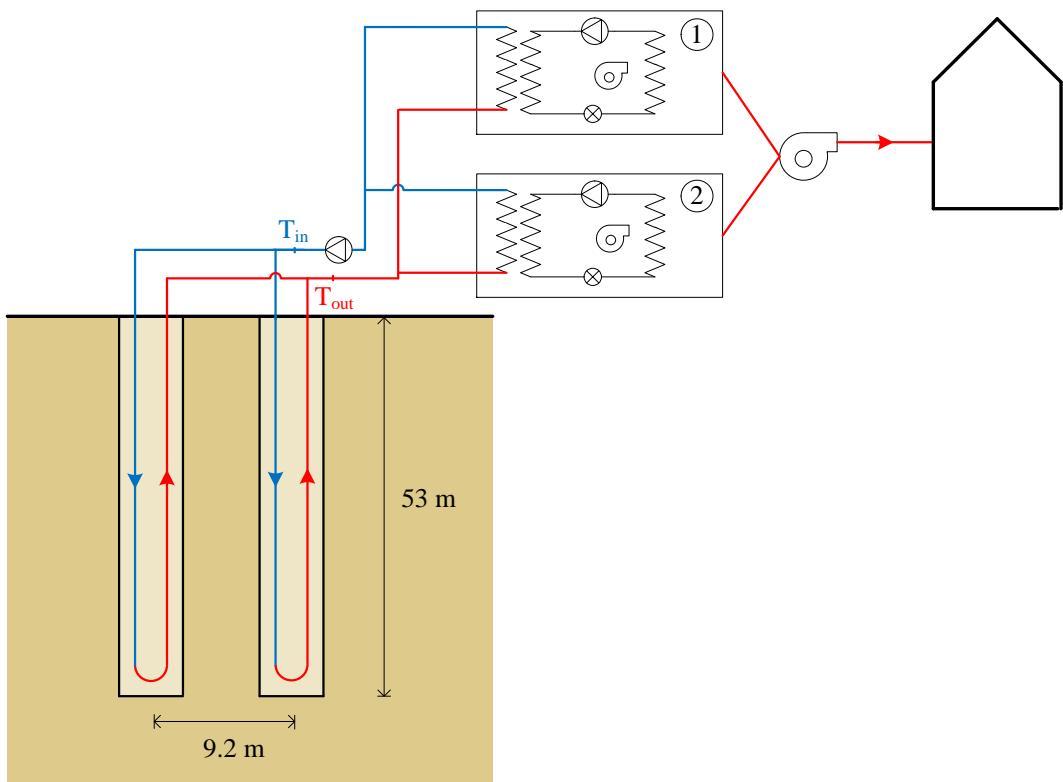


Figure 3-11: Présentation du système géothermique

Le fluide caloporteur du circuit géothermique (mélange d'eau et de propylène glycol 50%) circule quand au moins une des pompes à chaleur est en opération, autrement la pompe de circulation est à l'arrêt et le débit est nul. La pompe de circulation fournit un débit nominal de 0.22 L/s à chacune des pompes à chaleur, le débit est ensuite divisé en deux dans les puits géothermiques (ainsi si une PAC fonctionne chaque puits reçoit 0.11 L/s, si les deux PACs fonctionnent chaque puits reçoit 0.22 L/s). Les caractéristiques des puits sur lesquels sont

réalisées les mesures sont supposés identiques à celles du puits utilisé pour l'essai de réponse thermique, excepté la profondeur. Les puits sont désormais profonds de 53 m.

Le circuit a été instrumenté de façon à relever les données pertinentes du circuit géothermique. Les données enregistrées sont :

- Le débit volumique à l'entrée des deux puits géothermiques ($\pm 1.5\%$ d'incertitude).
- La température à l'entrée et à la sortie du circuit géothermique (avec des thermocouples de type T, $\pm 0.5^\circ\text{C}$ d'incertitude). A noter que les thermocouples sont situés à l'intérieur de la maison, à 5 m de la tête des puits. Par conséquent, quand la pompe est à l'arrêt, les températures du fluide tendent vers la température de la maison.

Les mesures ont été réalisées pendant 49 jours consécutifs du 2 novembre au 20 décembre 2006 (journées 308 à 354). Ces données ont été mesurées toutes les 5 minutes, ce qui représente environ 14 000 mesures. Pendant la période de mesure, les deux puits n'ont pas le temps d'interférer thermiquement entre eux.

L'objectif est de reproduire le comportement des deux puits géothermiques pendant les 49 jours de mesures avec le TYPE 243. Une simulation de 1169 h a été réalisée avec TRNSYS, avec un pas de temps de 1 min, dans laquelle chaque puits est modélisé avec un TYPE 243 différent. Les puits sont découpés en 20 tranches axiales. Les propriétés thermiques du sol déterminées à l'aide de l'essai de réponse thermique sont utilisées. La puissance extraite par la pompe à chaleur et le débit mesuré ont été utilisés comme données d'entrée au TYPE 243.

La simulation a été réalisée avec un ordinateur équipé d'un processeur Intel Core i7 (3.40 GHz) et d'une mémoire vive de 16 Go. Le temps de calcul de la simulation est de 2 min.

Il est difficile de présenter l'ensemble des résultats sous un seul graphique étant donné le nombre de données à traiter. La Figure 3-12 illustre un passage représentatif où la pompe à chaleur fonctionne de façon intermittente du 24 au 27 novembre. Sur cette figure sont tracées les températures mesurées à l'entrée et à la sortie des puits, les températures prédictes par le TYPE 243, l'écart entre la température de sortie mesurée et la température de sortie simulée, et la puissance extraite par les pompes à chaleur (P_{PAC}).

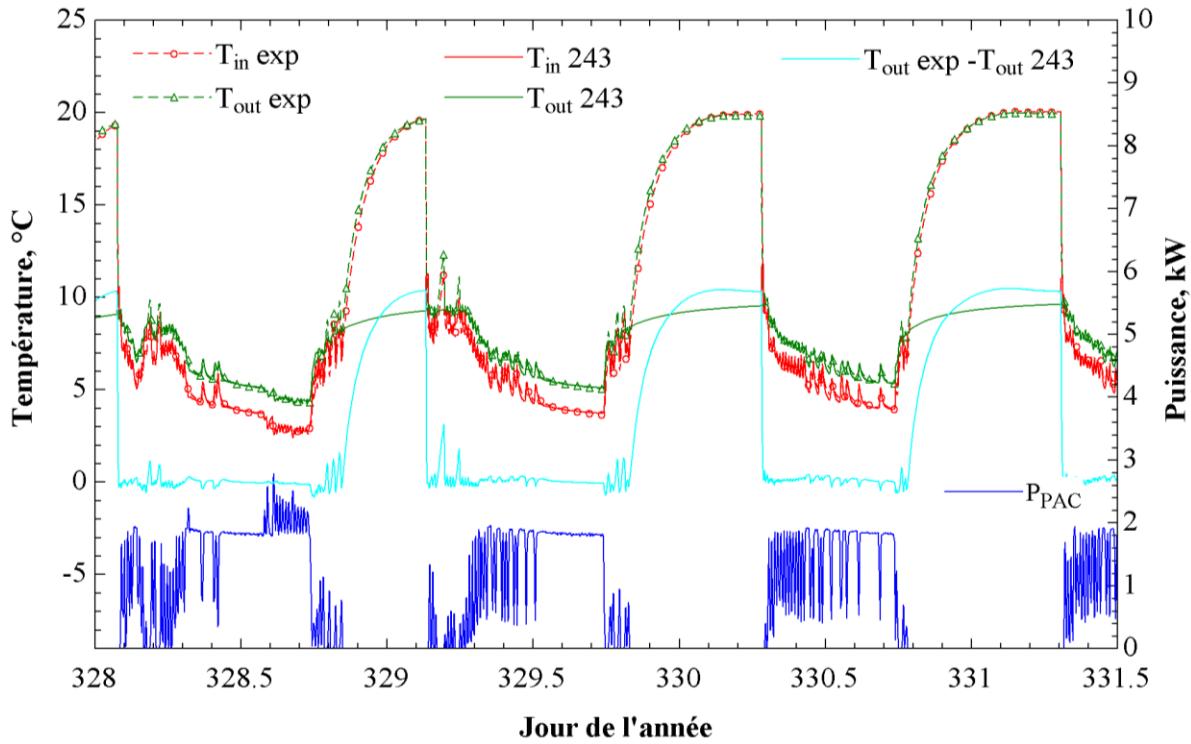


Figure 3-12: Comparaison des résultats entre le 24 Novembre et le 27 Novembre

Tel que montré sur la Figure 3-12, l'écart entre la température de sortie mesurée et la température de sortie simulée augmente brusquement lorsque les pompes à chaleur sont à l'arrêt (i.e. lorsque P_{PAC} est nulle). Comme indiqué précédemment, les thermocouples sont installés à l'intérieur de la maison. Le fluide caloporteur prend donc la température de la maison. La température de sortie calculée par le TYPE 243 lorsqu'il n'y a pas de débit est la température du fluide dans la dernière tranche de puits dans le tuyau ascendant. Dans le cas où les pompes à chaleur sont à l'arrêt, ces températures ne peuvent être comparées. C'est pourquoi ces passages sont exclus pour la suite de la comparaison. Pour filtrer de tels passages un critère sur le débit volumique a été établi, le débit circulant dans le circuit doit être au moins de 0.11 L/s représentant la moitié du débit nominal d'une des pompes à chaleur, pour que les mesures expérimentales soient considérées.

En dehors des passages où les pompes à chaleur sont à l'arrêt, le TYPE 243 reproduit correctement les données expérimentales, les profils de températures ont la même allure et l'écart est relativement faible. Il est en moyenne de 0.16 °C pendant l'intervalle représenté. Un zoom permet de se rendre compte de la précision du TYPE 243 (Figure 3-13). Toutes les oscillations de températures sont reproduites avec exactitude, et l'écart est toujours relativement minime.

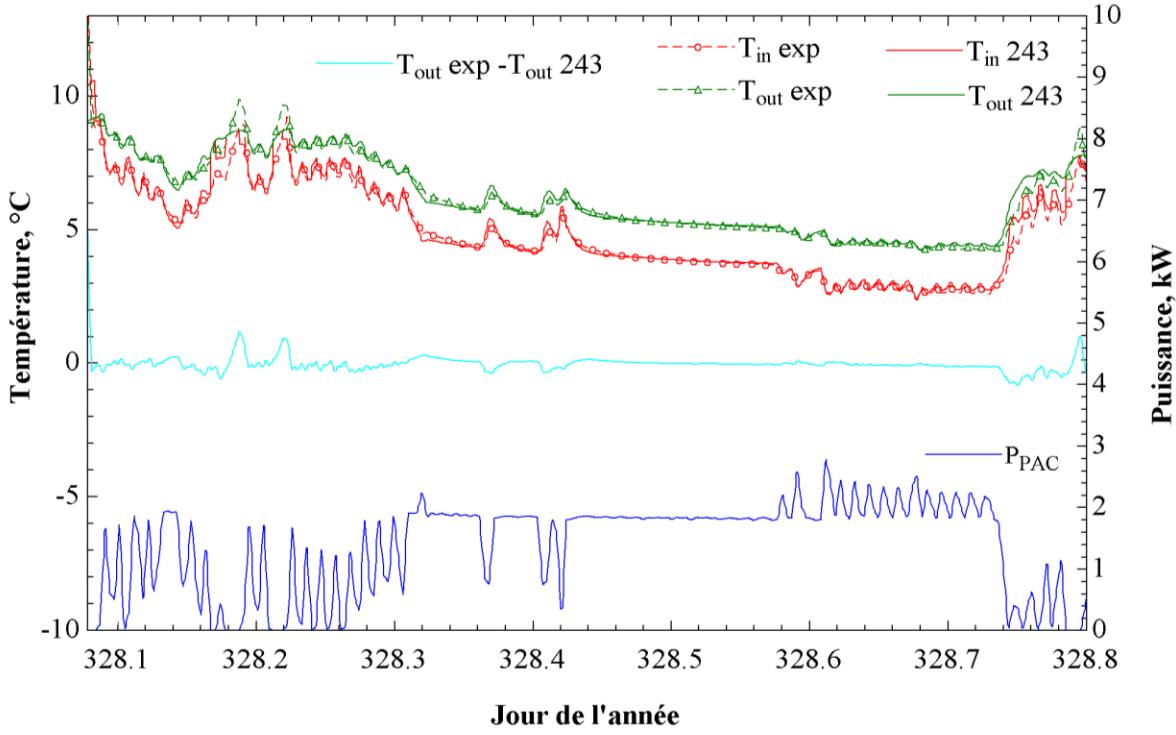


Figure 3-13: Zoom de la Figure 3-12

La Figure 3-14 s'intéresse à l'ensemble de la simulation. L'écart moyen journalier entre le modèle et les mesures expérimentales y est représenté. Pendant les 47 jours de mesure, l'écart reste faible, il est en moyenne de 0.23°C . L'écart le plus important se produit le 344^{ème} jour avec une valeur de 0.47°C . Les journées où les pompes à chaleur fonctionnent peu, l'écart est plus important (voir les jours 323 et 336). Ceci est en partie due au problème soulevé précédemment relatif à l'emplacement des thermocouples à l'intérieur de la maison.

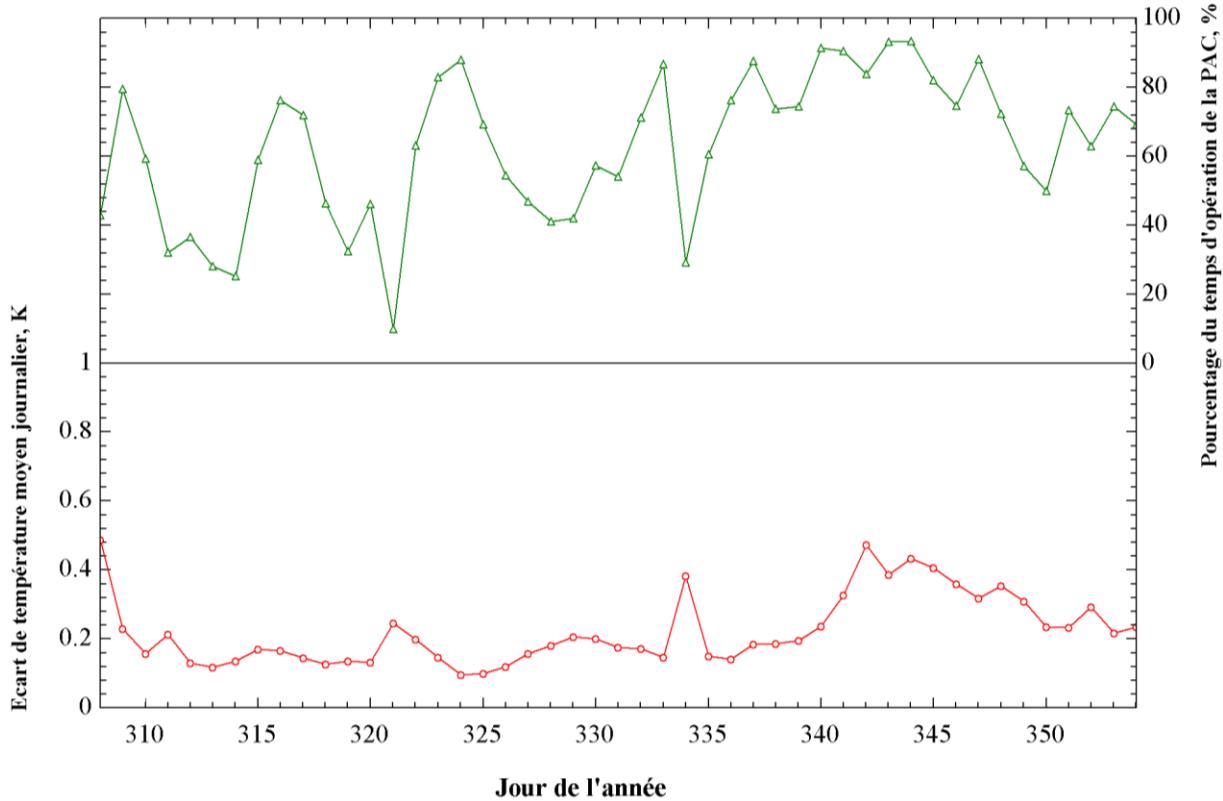


Figure 3-14: Représentation de l'écart moyen journalier

3.3.2.3 Validation avec l'essai de réponse thermique de Beier al. (2011)

Beier et al. (2011) ont conçu un échangeur géothermique instrumenté permettant de réaliser des mesures expérimentales dans un environnement contrôlé. Ils ont publié des résultats d'essais de réponse thermique réalisés à partir de ce dispositif expérimental. Ces résultats sont utilisés dans cette section comme données de référence pour la validation du TYPE 243.

Le dispositif expérimental est constitué d'un échangeur géothermique de 18.3 m de long, installé dans un réservoir horizontal de section carrée $1.8 \times 1.8 \text{ m}^2$. Les caractéristiques de l'échangeur géothermique sont détaillées dans le Tableau 3-3. Certaines caractéristiques, notamment les valeurs des capacités thermiques ne sont pas fournies par Beier et al. (2011). Pasquier et Marcotte (2014) ont proposé des valeurs pour les caractéristiques manquantes. À noter également que le puits est cerclé d'un tube en aluminium.

Tableau 3-3 : Paramètres de l'échangeur géothermique conçu par Beier et al. (2011)

Paramètre	Valeur	Unité
Longueur du puits	18.3	m
Rayon interne du tube d'aluminium	0.063	m
Epaisseur du tube d'aluminium	0.002	m
Conductivité thermique du tube d'aluminium	237*	W/m·K
Demi-espacement centre à centre entre les tubes en U	0.0265	m
Rayon interne des tubes en U	0.0137	m
Rayon externe des tubes en U	0.0167	m
Conductivité thermique des tubes en U	0.39	W/m·K
Conductivité thermique du sol	2.88	W/m·K
Capacité thermique volumique du sol	2550*	kJ/m ³ ·K
Conductivité thermique du coulis	0.9	W/m·K
Capacité thermique volumique du coulis	3800*	kJ/m ³ ·K
Température du sol non perturbée	22.09	°C

* : Valeurs proposés par Pasquier et Marcotte (2014)

Pour l'essai de réponse thermique, de l'eau circule avec un débit de 0.197 L/s dans l'échangeur géothermique. Deux éléments chauffants fournissent environ 1100 W à l'eau en circulation.

Des capteurs mesurent les températures de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'échangeur géothermique ($\pm 0.03^\circ\text{C}$ d'incertitude), le débit d'eau ($\pm 5\%$ d'incertitude), et la puissance électrique des éléments chauffants ($\pm 1\%$ d'incertitude). Les mesures sont enregistrées toutes les minutes.

Cet essai de réponse thermique a été reproduit avec le TYPE 243 en utilisant un pas de temps de 1 min et 20 tranches axiales. Les résultats de la simulation sont présentés à la Figure 3-15. La correspondance entre les températures mesurées et les températures simulées avec le TYPE 243 est excellente. L'écart quadratique moyen entre les températures mesurées et simulées est de 0.097°C , tandis que l'écart maximal est de 0.61°C .

Pasquier et Marcotte (2014) ont également reproduit l'essai de réponse thermique avec leur modèle TRCM quasi-3D. En comparaison, ils ont obtenu un écart quadratique moyen de 0.079°C , et un écart maximal de 0.34°C . Le modèle TRCM quasi-3D de Pasquier et Marcotte (2014) obtient des résultats légèrement meilleurs puisqu'il repose sur un modèle plus détaillé. En effet, dans le modèle de Pasquier et Marcotte (2014), le puits est découpé en 50 tranches axiales, et chaque tranche axiale est modélisée par 62 nœuds.

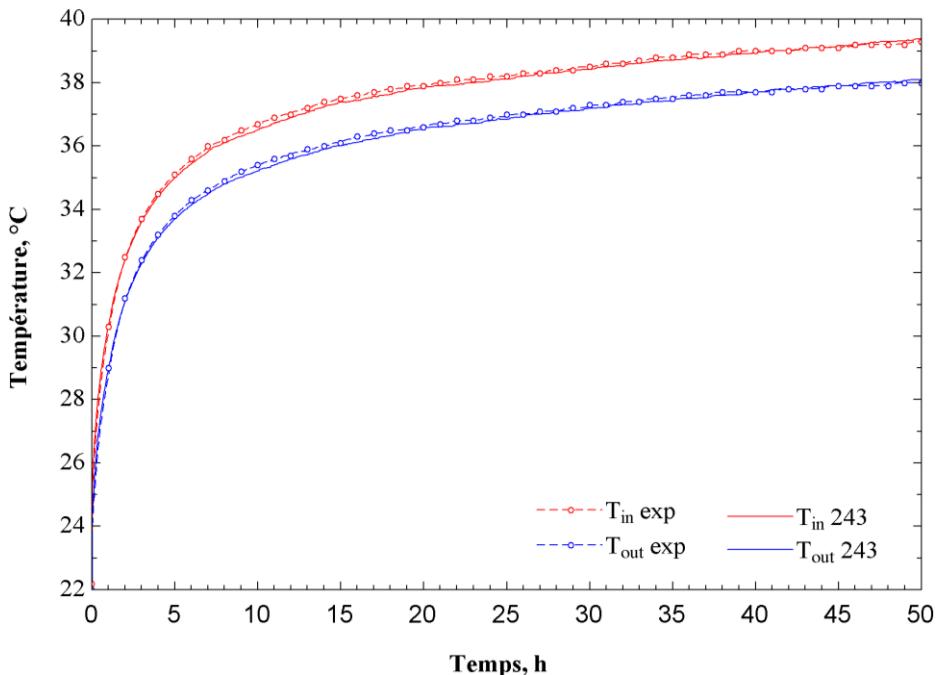


Figure 3-15 : Comparaison du TYPE 243 avec les données expérimentales de Beier et al. (2011)

3.3.2.4 Validation avec des données expérimentales sur un puits géothermique court (Bernier & Cauret, 2014)

Ce cas de validation est extrait d'un article de Bernier et Cauret (2014).

Electricité de France R&D dispose d'une plateforme expérimentale, constituée de 16 puits géothermiques, répartis en 4 rangées de 4 puits en séries (Figure 3-16). Il s'agit de puits courts, de 9 m de profondeur, enterrés 1 m sous la surface du sol. Dans chaque puits est installé un tube en U comblé par un coulis à haute conductivité thermique. Les caractéristiques du champ de puits sont données dans le Tableau 3-4. Le champ de puits est équipé de capteurs permettant de mesurer la température du fluide dans le puits n°1 et n°4 de la première rangée. Un puits

instrumenté situé au milieu du champ de puits équipés de capteurs installés à 1, 2, 5, et 9 m de profondeur permet de prélever les températures du sol. Rancourt-Ouimet (2012) présente des informations plus détaillées sur le dispositif expérimental.

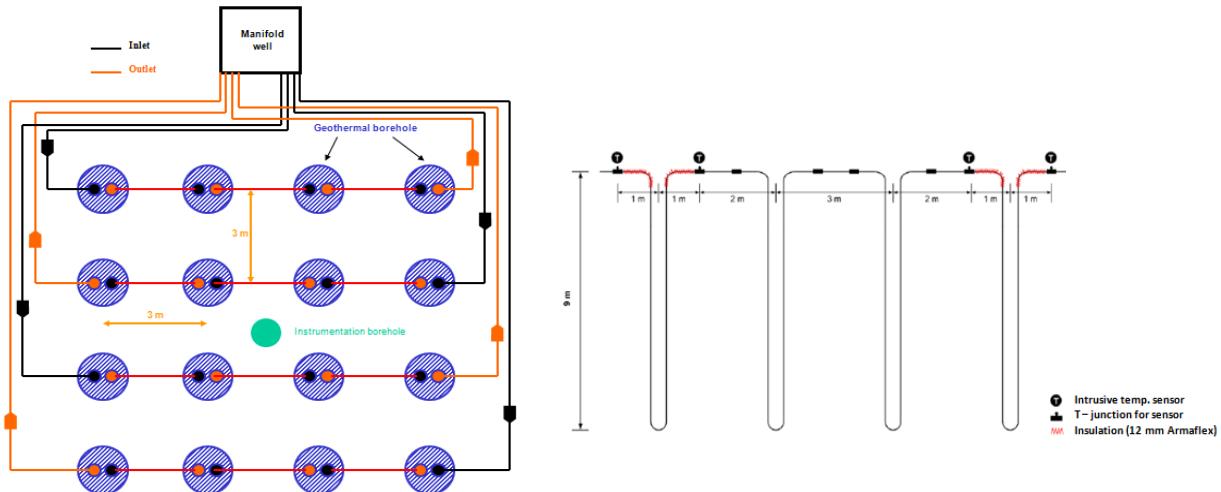


Figure 3-16 : Représentation de la plateforme expérimentale d'EDF R&D

Tableau 3-4: Caractéristiques du champ de puits expérimental d'EDF R&D

Paramètre	Valeur	Unité
Longueur du puits	9	m
Diamètre du puits	0.14	m
Profondeur d'enterrement	1	m
Espacement entre les puits	3	m
Conductivité thermique du sol	2.52	W/m·K
Capacité thermique volumique du sol	2600	kJ/m ³ ·K
Rayon interne du tuyau	0.0102	m
Rayon externe du tuyau	0.013	m
Conductivité thermique du tuyau	0.4	W/m·K
Espacement entre les tuyaux	0.045	m
Conductivité thermique du coulis	2	W/m·K
Capacité thermique volumique du coulis	3900	kJ/m ³ ·K
Teneur en propylène glycol	30	%

Des essais ont été réalisés sur le puits n°4, pendant une période de 1900 heures, au début de la première année de chauffage du dispositif. Pendant cette période, l'interaction thermique entre les différents puits est considérée comme négligeable. Pour réaliser une comparaison avec ces données expérimentales, le modèle TRCM original a été légèrement modifié. Un nouveau modèle a été développé, dans lequel il est possible de spécifier les températures du sol non perturbé en fonction de la profondeur pour chacune des tranches axiales (Figure 3-17). Le nouveau modèle a été implémenté dans l'environnement TRNSYS sous l'appellation TYPE 243bis.

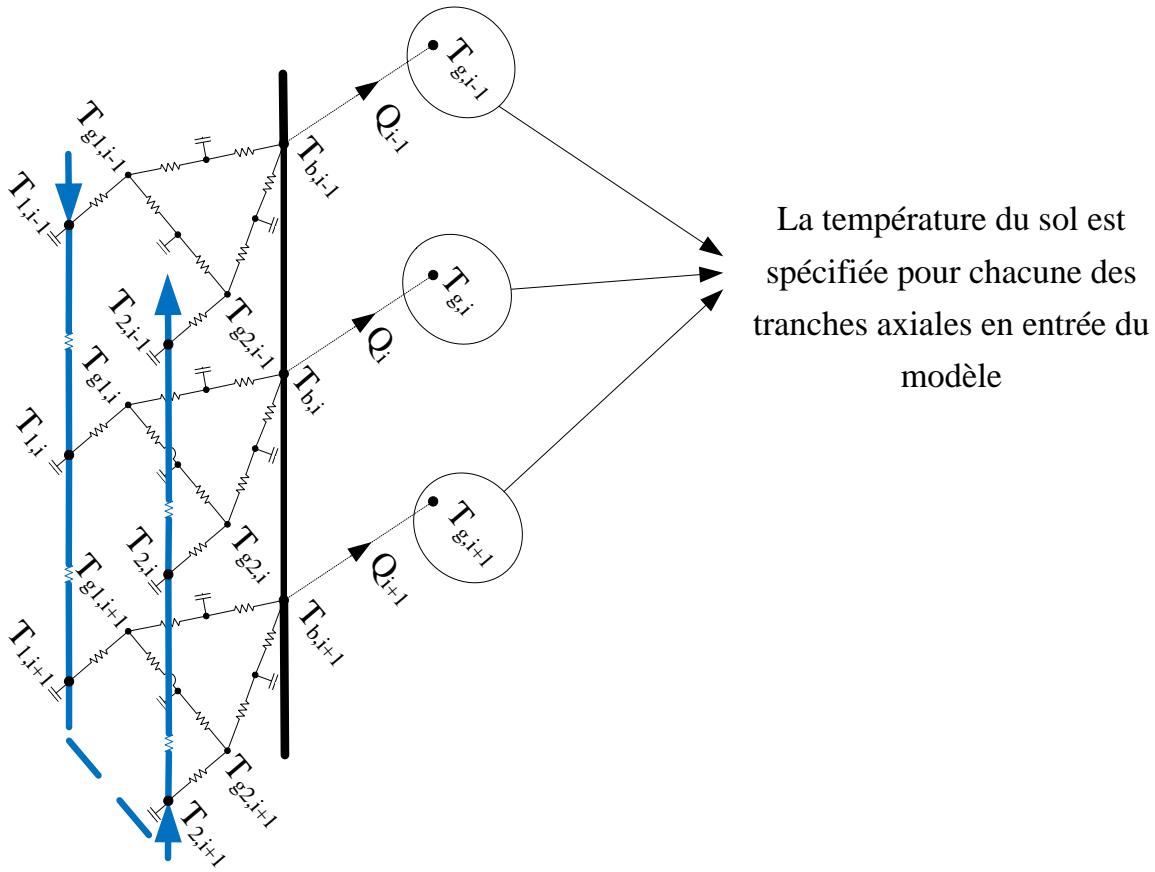


Figure 3-17: Illustration du TYPE 243bis

Pour réaliser la comparaison avec les données expérimentales mesurées sur le puits n°4, une simulation a été lancée avec le TYPE 243bis avec un pas de temps de 1 min. Les paramètres correspondent aux caractéristiques présentés dans le Tableau 3-4. Le nombre de couches axiales a été fixé à 10. Les entrées du TYPE 243bis correspondent au débit massique, à la température du fluide mesurée à l'entrée du puits n°4 et aux températures du sol non perturbé dans chaque

tranche axiale. Les températures mesurées par le puits instrumenté permettent de renseigner les températures du sol dans chaque tranche axiale (tranche n°1 = température du sol (TSOL) à 1 m ; tranches n°2 et n°3=TSOL à 2 m ; tranches n°4, n°5, n°6, et n°7=TSOL à 5 m ; tranches n°8, n°9, et n°10=TSOL à 9 m). Comme illustré à la Figure 3-18, la température du sol est significativement différente pour ces 4 profondeurs, elle prend pour valeur 7.4°C, 9.2°C, 12.6°C et 12.5°C à 1, 2, 5, et 9 m de profondeur.

Des résultats représentatifs de la simulation, après 1531 heures d'opération, sont montrés à la Figure 3-18. La température calculée avec le TYPE 243bis se compare favorablement avec la température mesurée à la sortie du puits n°4. En particulier lorsque la pompe à chaleur est en opération, la courbe de température calculée par le TYPE 243bis se superpose relativement bien avec la courbe de température mesurée.

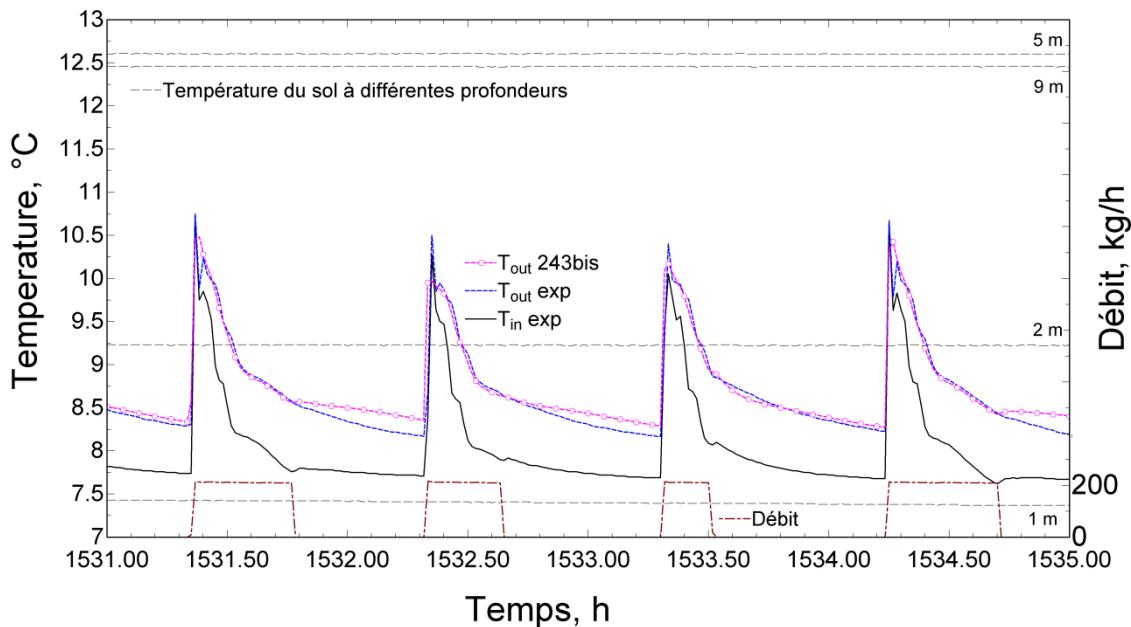


Figure 3-18: Comparaison entre la température de sortie simulée avec le TYPE 243bis, et la température de sortie mesurée expérimentalement sur le puits n°4

A la Figure 3-19, la température à la sortie du puits n°4 est également calculée en utilisant la température moyenne du sol sur toute la hauteur du puits. Pour cela les 4 valeurs TSOL ont été moyennées pour donner une température moyenne du sol de 10.4°C. Comme montré à la Figure 3-19, la température de sortie prédictive en utilisant la température moyenne du sol n'est pas précise comparée à celle calculée en renseignant le profil de température dans le sol. En particulier,

lorsque la pompe à chaleur est à l'arrêt, la température de sortie estimée tend vers la température moyenne du sol (10.4°C) et s'écarte significativement de la température mesurée. La Figure 3-19 démontre l'importance de prendre en considération la variation de température dans le sol pour la modélisation de puits géothermiques courts.

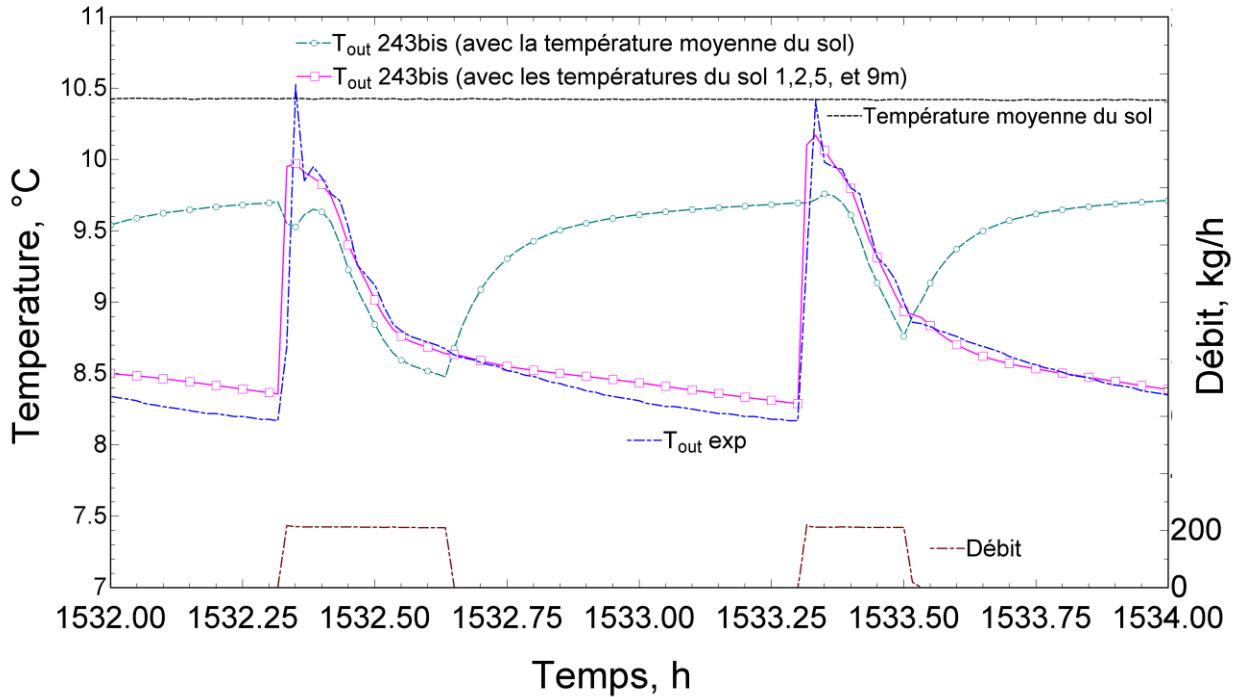


Figure 3-19: Illustration de l'importance de prendre en considération la variation de température dans le sol

3.4 TYPE 244

Le TYPE 244 est un modèle d'échangeur géothermique à deux tubes en U, avec deux circuits indépendants, intégrant les phénomènes transitoires se produisant à l'intérieur du puits. La théorie du modèle est présentée dans le chapitre 2.

3.4.1 Variables du TYPE 244

Les différentes variables à configurer pour réaliser une simulation avec le TYPE 244 dans le logiciel TRNSYS sont détaillées ci-dessous. Les paramètres 23 à 29 concernant les paramètres de l'agrégation de Liu (2005) sont discutés à la section 1.3.

3.4.1.1 Paramètres du TYPE 244

	Nom	Unité
1	Longueur du puits (H)	m
2	Profondeur d'enterrement de la tête de puits (D)	m
3	Rayon du puits (r_b)	m
4	Rayon extérieur du tube en U (r_o)	m
5	Rayon intérieur du tube en U (r_i)	m
6	Demi-espacement entre les centres des tuyaux (D_s)	m
7	Conductivité thermique du sol (k_s)	kJ/h · m · K
8	Capacité thermique volumique du sol ($\rho C_p)_s$	kJ/m ³ · K
9	Conductivité thermique du coulis (k_g)	kJ/h · m · K
10	Capacité thermique volumique du coulis ($\rho C_p)_g$	kJ/m ³ · K
11	Conductivité thermique du tuyau (k_p)	kJ/h · m · K
12	Rugosité du tuyau (ϵ)	mm
13	Antigel dans le tuyau 1	-
	L'utilisateur a le choix entre 3 types d'antigels :	
14	<ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol • 2 : Éthylène glycol • 3 : Méthylène glycol <p>L'utilisateur peut également choisir l'eau (0), ou définir lui-même les propriétés thermiques du fluide caloporteur (-1). Dans ce cas, les propriétés thermiques du fluide caloporteur sont définies à l'aide des paramètres 15 à 18.</p>	
	Concentration de l'antigel dans le tuyau 1	%
15	L'utilisateur doit spécifier la concentration d'antigel :	
	<ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol ($15.2 < Conc < 57$) • 2 : Éthylène glycol ($11.1 < Conc < 60.1$) • 3 : Méthylène glycol ($7.8 < Conc < 44.3$) 	
15	Capacité thermique massique du fluide dans le tuyau 1	kJ/kg · K
16	Conductivité thermique du fluide dans le tuyau 1	kJ/h · m · K

17	Masse volumique du fluide dans le tuyau 1	kg/m ³
18	Viscosité dynamique du fluide dans le tuyau 1	kg/ m · h
19	Antigel dans le tuyau 2	-
	L'utilisateur a le choix entre 3 types d'antigels : <ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol • 2 : Éthylène glycol • 3 : Méthylène glycol L'utilisateur peut également choisir l'eau (0), ou définir lui-même les propriétés thermiques du fluide caloporteur (-1). Dans ce cas, les propriétés thermiques du fluide caloporteur sont définies à l'aide des paramètres 15 à 18.	
20	Concentration de l'antigel dans le tuyau 2	%
	L'utilisateur doit spécifier la concentration d'antigel : <ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol ($15.2 < Conc < 57$) • 2 : Éthylène glycol ($11.1 < Conc < 60.1$) • 3 : Méthylène glycol ($7.8 < Conc < 44.3$) 	
21	Capacité thermique massique du fluide dans le tuyau 2	kJ/kg · K
22	Conductivité thermique du fluide dans le tuyau 2	kJ/h · m · K
23	Masse volumique du fluide dans le tuyau 2	kg/m ³
24	Viscosité dynamique du fluide dans le tuyau 2	kg/ m · h
25	Gradient géothermique	K/m
26	Température ambiante moyenne annuelle	°C
27	Amplitude de la température ambiante annuelle	°C
28	Décalage temporelle (nombre de jours entre le 1^{er} janvier et le jour le plus froid de l'année)	Jour
29	Premier jour de la simulation	Jour
	Taille du petit bloc	-
30	Ce paramètre indique la taille des « petits bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont fusionnées pour former un « petit bloc ».	
	Taille du moyen bloc	-
31	Ce paramètre indique la taille des « moyens bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu.	

	Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont fusionnées pour former un « moyen bloc ».	
32	Taille du grand bloc	-
	Ce paramètre indique la taille des « grands bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont fusionnées pour former un « grand bloc ».	
33	Période d'attende pour un petit bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des charges individuelles à un « petit bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont conservés intactes lors de la création d'un « petit bloc ».	
34	Période d'attende pour un moyen bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « petits blocs » à un « moyen bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « moyen bloc ».	
35	Période d'attente pour un grand bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « moyens blocs » à un « grand bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « grand bloc ».	
36	Nombres de tranches axiales (n_H)	-
37	Prise en compte de la capacité thermique du fluide	-
	Par défaut, la capacité thermique du fluide est prise en compte (correspond à la valeur 1). L'utilisateur peut demander au TYPE 244 de négliger les effets de la capacité thermique du fluide en imposant ce paramètre à la valeur 0.	

3.4.1.2 Entrées du TYPE 244

	Nom	Unité
1	Température à l'entrée du tube en U #1 (T_{in-1})	°C
2	Débit à l'entrée du tube en U #1 (\dot{m}_1)	kg/h
3	Température à l'entrée du tube en U #2 (T_{in-2})	°C
4	Débit à l'entrée du tube en U #2 (\dot{m}_2)	kg/h

3.4.1.3 Sorties du TYPE 244

	Nom	Unité
1	Température à la sortie du tube en U #1 (T_{out-1})	m

2	Débit à la sortie du tube en U #1 (\dot{m}_1)	kg/h
3	Température à la sortie du tube en U #2 (T_{out-2})	m
4	Débit à la sortie du tube en U #2 (\dot{m}_2)	kg/h
5	Température moyenne à la paroi du puits (T_b)	m
6	Taux d'injection de chaleur du puits (Q)	kJ/h
7	Résistance thermique équivalente du puits (R_b)	m · K/W
8	Résistance thermique R_g	m · K/W
9	Résistance thermique R_{gg}^{12}	m · K/W
9	Résistance thermique R_{gg}^{13}	m · K/W
10	Résistance thermique R_{fp}^1	m · K/W
11	Résistance thermique R_{fp}^2	m · K/W
12	Temps de résidence du fluide caloporeur à l'intérieur dans le tube en U #1	h
13	Nombre de Reynolds dans le tube en U #1	-
14	Perte de charge à l'intérieur du tube en U #1	kPa
15	Temps de résidence du fluide caloporeur à l'intérieur dans le tube en U #2	h
16	Nombre de Reynolds dans le tube en U #2	-
17	Perte de charge à l'intérieur du tube en U #2	kPa
18 à $18+n_H$	Température du fluide descendant dans la tranche i dans le tube en U #1 ($T_{1,i}$)	°C
$18+n_H+1$ à $18+2n_H$	Température du fluide ascendant dans la tranche i dans le tube en U #1 ($T_{3,i}$)	°C
$18+2n_H+1$ à $18+3n_H$	Température du fluide descendant dans la tranche i dans le tube en U #2 ($T_{2,i}$)	°C
$18+3n_H+1$ à $18+4n_H$	Température du fluide ascendant dans la tranche i dans le tube en U #2 ($T_{4,i}$)	°C

3.4.2 Comparaison avec le TYPE 242

Le TYPE 244 est comparé au modèle d’Eslami-nejad et Bernier (2011), correspondant au TYPE 242 de la suite TRNYS.

Il s’agit de modéliser le comportement d’un puits géothermique à deux tubes en U, avec deux circuits indépendants, dans lequel on fait circuler un fluide chaud à 40°C dans le circuit #1, et un fluide froid à 0°C dans le circuit #2. Dans chacun des circuits, une pompe entraînant le fluide, fonctionne par cycle. Elle alterne entre une période de marche de 6h, et une période d’arrêt de 6h. Les caractéristiques du puits et des propriétés thermiques du sol sont données dans le Tableau 3-5.

Le comportement du puits a été simulé pendant 10 semaines à l’aide du TYPE 242, et du TYPE 244. Le TYPE 242 ne permettant pas de modéliser la capacité thermique du coulis, deux simulations ont été réalisées avec le TYPE 244 soit avec et sans la capacité thermique du coulis. Les résultats à la fin des 10 semaines de simulations sont représentés sur la Figure 3-20.

Tableau 3-5: Paramètres utilisés pour la comparaison avec d’autres modèles existants

Paramètre	Valeur	Unité
L	100	m
r_b	0.11	m
r_i	0.013	m
r_o	0.016	m
D_s	0.03	m
k_f	0.6	W/m·K
$(\rho C_p)_f$	4.2	MJ/m ³ ·K
k_p	0.4	W/m·K
k_g	1	W/m·K
$(\rho C_p)_g$	3.9	MJ/m ³ ·K
k_s	1.5	W/m·K
$(\rho C_p)_s$	4.2	MJ/m ³ ·K
T_g	10	°C
\dot{m} (identique dans les circuits #1 et #2)	0.2	kg/s

Les résultats issus de la simulation avec le TYPE 244 suivent les mêmes tendances que ceux fournis par le modèle TYPE 242, excepté lorsque la pompe de circulation est à l'arrêt (i.e. signal pompe = 0). Dans le cas où les débits sont nuls, les températures de sorties indiquées par le TYPE 242 correspondent à la température à la paroi du puits tandis que les températures de sorties calculées par le TYPE 244 sont les températures du fluide dans la dernière tranche de puits, dans les tuyaux ascendants. Les comportements des TYPES 242 et 244 ne peuvent donc pas être comparés quand les débits sont nuls.

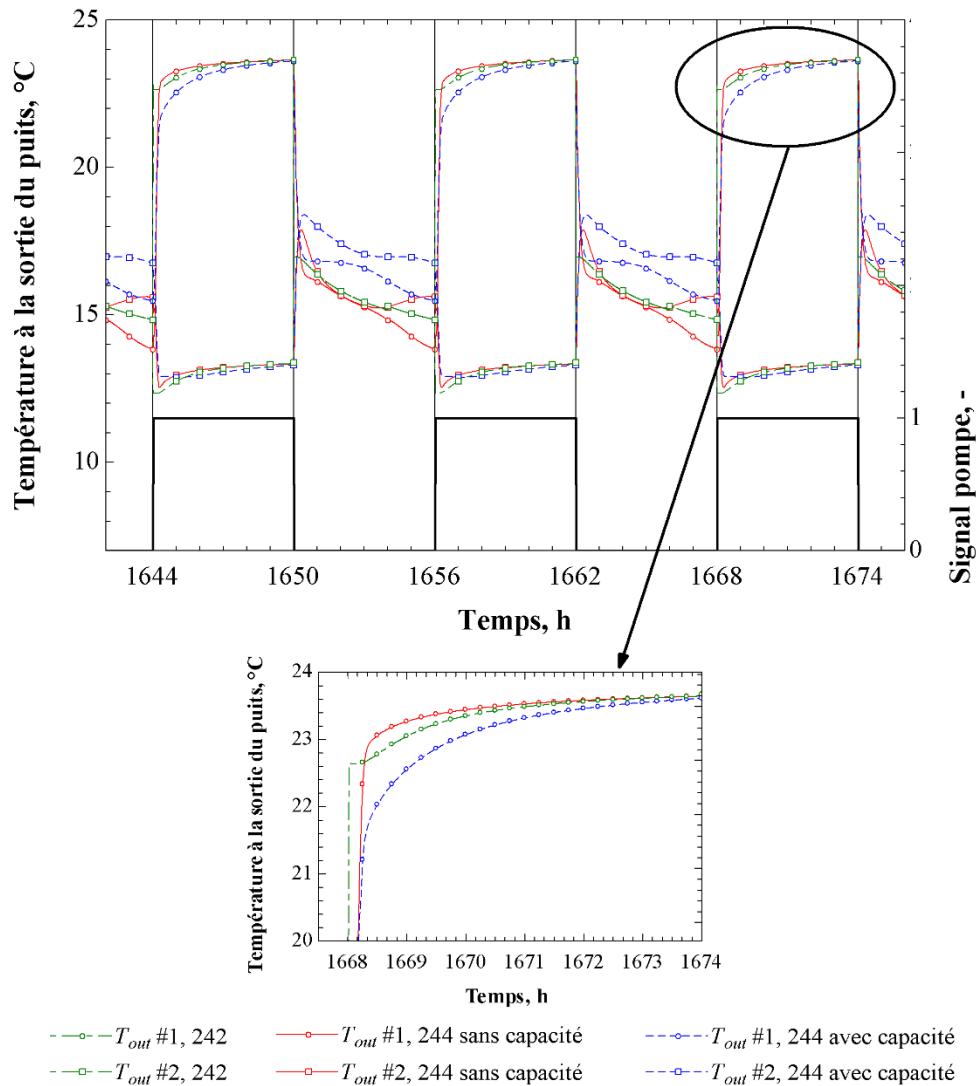


Figure 3-20 : Comparaison du TYPE 242 avec le TYPE 244 (avec et sans la capacité thermique du coulis)

En dehors de ces passages, le TYPE 242 et TYPE 244 donnent des résultats semblables avec un écart relativement faible. A noter l'importance de prendre en compte la capacité thermique du coulis, qui entraîne un régime transitoire à chaque début de cycle.

Cette comparaison ne permet pas de pleinement valider les TYPES 242 et 244. Il serait nécessaire de les comparer à des données expérimentales relevées sur un échangeur géothermique à 4 tuyaux.

3.5 Résumé

Ce chapitre présente les quatre premiers TYPES de la suite TRNSYS dont l'intérêt est triple : permettre à un utilisateur non-initié à la géothermie de se familiariser avec l'utilisation d'un modèle d'échangeur géothermique (TYPE 241); inclure des modèles d'échangeurs géothermiques à deux tubes en U, avec deux circuits indépendants (TYPE 242 et TYPE 244); inclure un modèle d'échangeurs géothermiques prenant en compte les phénomènes transitoires à l'intérieur d'un puits à deux tuyaux (TYPE 243) et également d'un puits à 4 tuyaux (TYPE 244).

Ces quatre TYPES se limitent à la modélisation d'échangeurs géothermiques simples, c'est-à-dire à un seul puits. Dans le chapitre qui suit, ils sont adaptés à la modélisation d'échangeurs multi-puits, ce qui conduit à l'élaboration de quatre nouveaux TYPES.

CHAPITRE 4 MODÈLES D'ECHANGEURS GÉOTHERMIQUES VERTICAUX MULTI-PUITS

Ce quatrième et dernier chapitre présente les quatre modèles d'échangeurs géothermiques verticaux multi-puits de la suite. Il s'agit de l'adaptation des modèles d'échangeurs géothermiques simples présentés au chapitre 3 pour des échangeurs multi-puits connectés en parallèle.

L'adaptation est réalisée grâce à l'utilisation du concept des g-functions proposé par Cimmino et Bernier (2014) permettant de calculer les facteurs de réponse thermique d'un champ de puits.

4.1 g-function généré par préprocesseur

Pour modéliser des échangeurs géothermiques multi-puits, les modèles d'échangeurs simples présentés au Chapitre 3 sont désormais couplés au concept des g-functions proposé par Cimmino et Bernier (2014).

Pour calculer la g-function d'un champ de puits, Cimmino et Bernier (2014) proposent une méthodologie semi-analytique basée sur la solution de la source linéaire finie. Ils suggèrent de diviser les puits en segments et de modéliser tous les segments de puits par des sources lignes finies en imposant la condition frontière BC III : température uniforme à la paroi des puits et identique pour chaque puits. Les interactions thermiques « segment à segment » sont superposés spatialement et temporellement pour former un système d'équations dans le domaine de Laplace. La résolution de ce système d'équations permet d'obtenir la g-function du champ de puits. Le modèle de Cimmino et Bernier (2014) est détaillé dans la revue de littérature à la section 1.1.2.

Cimmino et Bernier (2013) ont implémenté leur modèle semi-analytique de g-function dans un préprocesseur Matlab permettant de générer les g-functions pour n'importe quelle configuration de champ de puits. Comme ce préprocesseur est essentiel pour utiliser les TYPEs multi-puits, il sera décrit brièvement dans les paragraphes ci-dessous.

Tel qu'illustré à la Figure 4-1, l'interface graphique du préprocesseur se divise en 5 sections (c'est la version 2.1 du préprocesseur qui est introduit ci-dessous). La section (A) permet de spécifier le rayon des puits géothermiques et la diffusivité thermique du sol environnant. La position, la longueur et la profondeur des puits sont définies à la section (C). Il est possible de

charger ou d'enregistrer la géométrie du champ de puits dans un fichier texte par l'intermédiaire des boutons « save field » et « load field ». Le champ de puits peut être visualisé à la section (E). La g-function est calculée puis tracée en cliquant sur le bouton de la section (D). A noter qu'il est possible de choisir parmi deux types de conditions frontières : BC III ou BC II (Taux d'extraction uniforme à la paroi des puits et température moyenne à la paroi des puits identiques pour tous les puits). Pour les modèles de la suite TRNSYS, la condition frontière BC III sera toujours utilisée. Une fois la g-function générée, il est possible d'exporter les valeurs de la g-function dans un fichier texte grâce à la section (B). Pour les besoins de la suite, il faut exporter l'ensemble de la g-function. Ainsi, en utilisant « Export subsampled g-function », le préprocesseur calcule un certain nombre de valeurs de la g-function sur l'ensemble de la courbe de la g-function. Le fichier texte se compose de deux colonnes, la première indique le temps adimensionné, $\ln(t/t_s)$, et la seconde donne la valeur de la g-function au temps correspondant. La Figure 4-2 donne un aperçu de ce fichier de sortie.

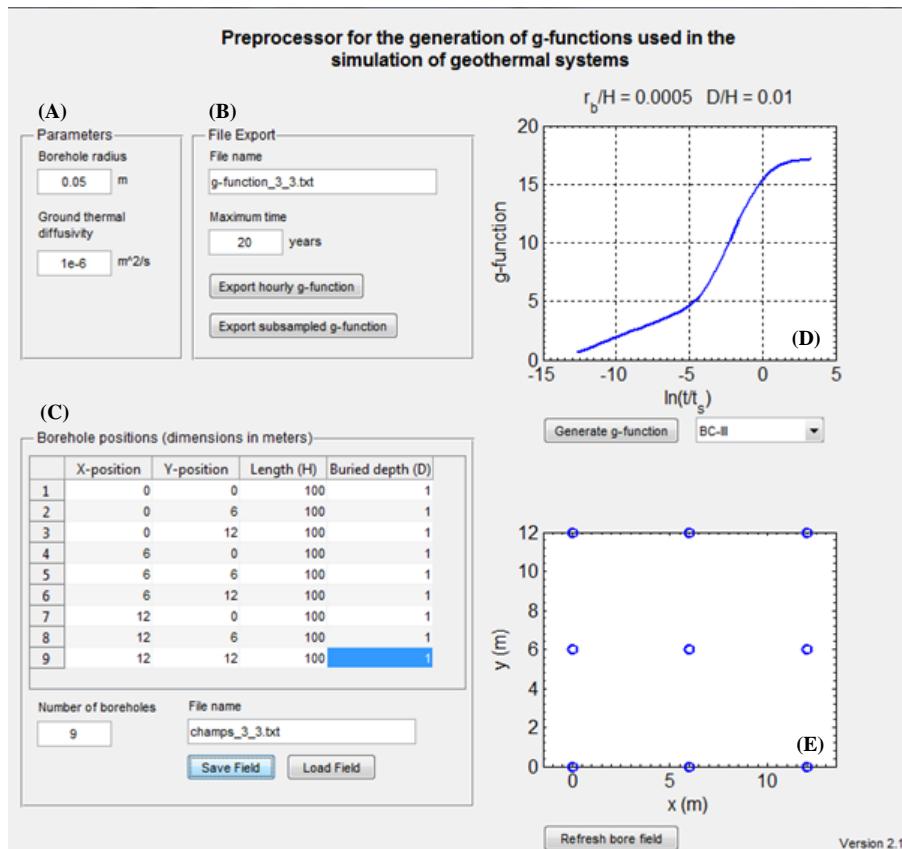


Figure 4-1: Interface graphique du préprocesseur

La Figure 4-1 présente le calcul de la g-function d'un champ de puits 3x3, dans lequel les puits sont espacés de 6 m. L'un des avantages majeurs du préprocesseur est qu'il ne se limite pas à des géométries de champs de puits régulières. En effet, il est possible de générer la g-function de n'importe quelle configuration de champ de puits. Pour cela, il suffit de spécifier la géométrie du champ de puits dans la section (C), puis de calculer la g-function. Le préprocesseur permet d'obtenir la g-function du champ de puits, en seulement quelques minutes de temps de calcul.

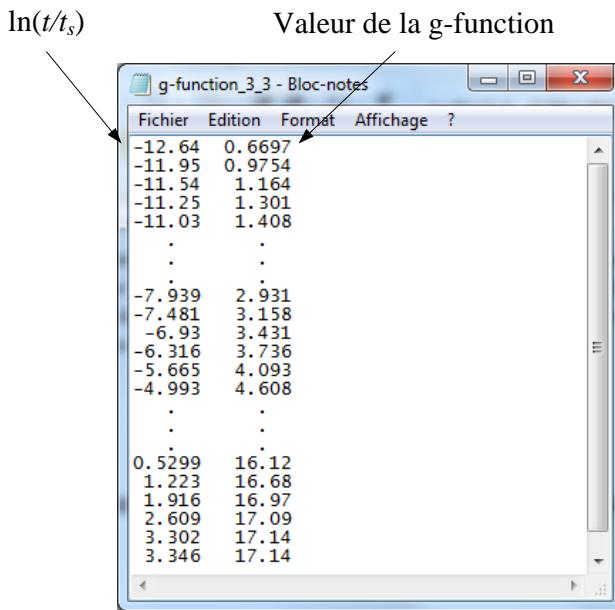


Figure 4-2: Fichier texte de la g-function d'un champ de puits 3x3 généré par le préprocesseur

Dans le cadre de la suite TRNSYS, le préprocesseur est utilisé pour générer le fichier texte de la g-function. Les TYPES présentés dans ce quatrième chapitre feront appel au fichier texte de la g-function dans lequel les valeurs des facteurs de réponse thermique du champ de puits à modéliser seront interpolées.

Les transferts de chaleur à l'intérieur des puits ne seront évalués que pour un seul puits puisque tous les puits ont les mêmes températures et débits d'entrée et les mêmes températures à la paroi tel qu'imposées par la condition frontière BC III.

4.2 TYPE 245

Le TYPE 245 est l'adaptation du TYPE 241 pour la modélisation d'un échangeur géothermique multi-puits. Le TYPE 245 a été implémenté dans TRNSYS par Massimo Cimmino, étudiant au

doctorat dans le groupe de recherche professeur Bernier. Cette section ajoute une description détaillée du TYPE ainsi qu'un cas de validation.

4.2.1 Présentation du TYPE 245

Le TYPE 241 utilise les solutions analytiques de la source linéaire infinie, de la source cylindrique infinie, ou de la source linéaire finie pour modéliser les transferts de chaleur dans le sol. Alors que le TYPE 245 utilise les g-functions comme facteur de réponse pour la modélisation d'un échangeur géothermique multi-puits. Les facteurs de réponse sont calculés grâce aux g-function proposés par Cimmino et Bernier (2014), et générés à l'aide du préprocesseur introduit à la section 4.1. Les facteurs de réponse thermique, h , se déduisent des valeurs de la g-function du champ de puits, g , par la relation :

$$h = \frac{g\left(t/t_s, r_b/H, B/H, D/H, \text{configuration du champs}\right)}{2 \pi k_s} \quad (4.1)$$

Les valeurs de la g-function sont interpolées dans le fichier texte préalablement généré par le préprocesseur.

Hormis la méthode de calcul des facteurs de réponse thermique, le TYPE 245 est identique au TYPE 241.

4.2.2 Variables du TYPE 245

Les différentes variables à configurer pour réaliser une simulation avec le TYPE 245 dans le logiciel TRNSYS sont détaillées ci-dessous. Les paramètres 15 à 20 concernant les paramètres de l'agrégation de Liu (2005) sont discutés à la section 1.3.

4.2.2.1 Paramètres du TYPE 245

	Nom	Unité
1	Nombre de puits	-
2	Longueur d'un puits (H)	m
3	Profondeur d'enterrement de la tête des puits (D)	m
4	Rayon des puits (r_b)	m

	Résistance thermique équivalente des puits (R_b)	m · K/W
5	La résistance thermique équivalente du puits entre le fluide caloporteur et la paroi du puits (R_b), incluant la résistance convective du fluide (R_f), la résistance thermique des tuyaux (R_p) et la résistance thermique du coulis (R_g). Attention aux unités. Cette résistance s'exprime en m · K/W, différent des unités de base comprises dans TRNSYS.	
6	Conductivité thermique du sol (k_s)	kJ/h · m · K
7	Capacité thermique volumique du sol (ρC_p)_s	kJ/m ³ · K
8	Température du sol non perturbée (T_g)	°C
9	Antigel	-
	L'utilisateur a le choix entre 3 types d'antigels : <ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol • 2 : Éthylène glycol • 3 : Méthylène glycol 	
10	Concentration de l'antigel	%
	L'utilisateur doit spécifier la concentration d'antigel : <ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol (15.2 < Conc < 57) • 2 : Éthylène glycol (11.1 < Conc < 60.1) • 3 : Méthylène glycol (7.8 < Conc < 44.3) 	
11	Capacité thermique massique du fluide dans le tuyau	kJ/kg · K
12	Conductivité thermique du fluide dans le tuyau	kJ/h · m · K
13	Masse volumique du fluide dans le tuyau	kg/m ³
14	Viscosité dynamique du fluide dans le tuyau	kg/ m · h
	Taille du petit bloc	-
15	Ce paramètre indique la taille des « petits bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont fusionnées pour former un « petit bloc ».	
	Taille du moyen bloc	-
16	Ce paramètre indique la taille des « moyens bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont fusionnées pour former un « moyen bloc ».	
	Taille du grand bloc	-
17	Ce paramètre indique la taille des « grands bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont fusionnées pour former un « grand bloc ».	

18	Période d'attende pour un petit bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des charges individuelles à un « petit bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont conservés intactes lors de la création d'un « petit bloc ».	
19	Période d'attende pour un moyen bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « petits blocs » à un « moyen bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « moyen bloc ».	
20	Période d'attende pour un grand bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « moyens blocs » à un « grand bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « grand bloc ».	
21	« Logical unit for g-function file »	-
	Ce paramètre ne doit pas être modifié.	

4.2.2.2 Entrées du TYPE 245

	Nom	Unité
1	Température d'entrée (T_{in})	°C
2	Débit total à l'entrée des puits (\dot{m})	kg/h

4.2.2.3 Sorties du TYPE 245

	Nom	Unité
1	Température de sortie (T_{out})	m
2	Débit total à la sortie des puits (\dot{m})	kg/h
3	Température à la paroi des puits (T_b)	m
4	Taux d'injection de chaleur du champ de puits (Q)	kJ/h

4.2.2.4 Fichier externe

Le fichier texte de la g-function du champ de puits à modéliser et générer par le préprocesseur doit être attaché au TYPE 245 dans l'onglet « external file ». Il faut faire attention à faire concorder les propriétés du champ de puits à modéliser dans TRNSYS avec ceux paramétrés dans le préprocesseur pour générer la g-function (en particulier la diffusivité thermique du sol).

4.2.3 Validation du TYPE 245

Le TYPE 245 est comparé au modèle DST dans cette section. Avec le modèle DST, l'usager ne peut spécifier l'emplacement des puits, il peut seulement indiquer l'espacement entre les puits. C'est le modèle DST qui définit la répartition exacte des puits autour du centre du volume de stockage de façon axisymétrique. Dans le cas particulier d'un champ de 19 puits disposés de façon hexagonale, l'emplacement des puits prend la forme d'une disposition axisymétrique (Figure 4-3). C'est cette répartition qui a été retenue pour comparer le TYPE 245 avec le modèle DST.

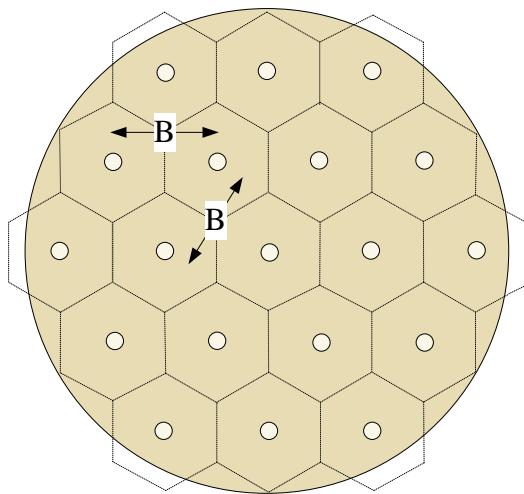


Figure 4-3: Disposition d'un champ de 19 puits avec le modèle DST

Les 19 puits, d'une longueur de 110 m, installés 1 m sous la surface du sol, sont espacés de 5 m. Le rayon des puits est de 0.055 m. La diffusivité thermique du sol est de 0.0624 m²/jour, tandis que la conductivité thermique du sol est 1.3 W/m·K. Afin de modéliser le comportement du champ de puits avec le TYPE 245, la g-function du champ de puits a préalablement été calculée avec le préprocesseur (Figure 4-4).

Une simulation sur une durée de 20 ans avec un pas de temps d'une heure a été réalisée avec le TYPE 245 et avec le modèle DST, en imposant à l'échangeur géothermique le profil de charges du cas test C présenté au Tableau 3-1, et illustré à la Figure 3-4. Il s'agit d'un profil de charge asymétrique à dominante climatisation. Les résultats de la dernière année de simulation sont comparés à la Figure 4-5.

Les simulations ont été réalisées avec un ordinateur équipé d'un processeur Intel Core i7 (3.40 GHz) et d'une mémoire vive de 16 Go. Le temps de calcul de la simulation avec le TYPE 245 est de 27 s, tandis qu'il est de 43 s avec le modèle DST.

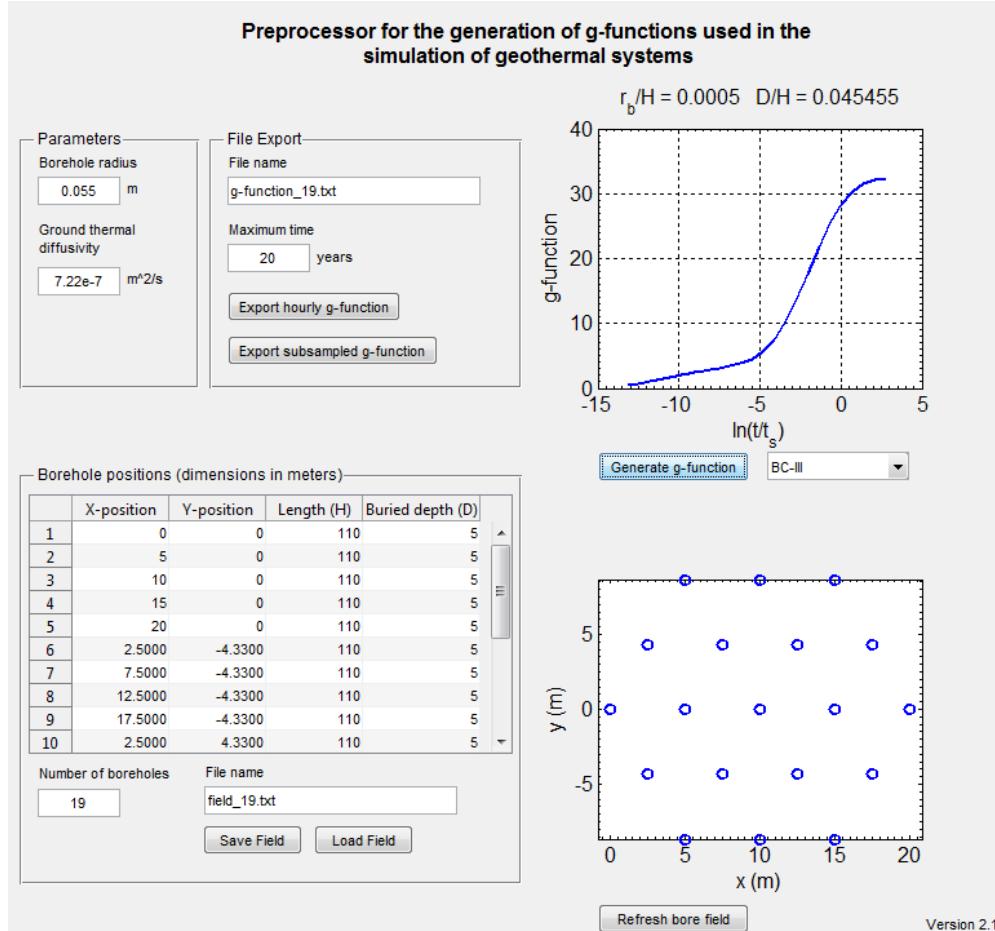


Figure 4-4: Calcul de la g-function d'un champ de 19 puits repartis de façon hexagonale

Tel qu'illustré à la Figure 4-5, la correspondance entre les températures à la paroi des puits simulées avec le TYPE 245 et avec le modèle DST est excellente. Le TYPE 245 reproduit les résultats du modèle DST avec un écart toujours inférieur à $\pm 0.7^\circ\text{C}$, et avec un écart moyen quadratique de 0.10°C . Même après 20 années de simulation, le TYPE 245 parvient à donner des résultats convenables par rapport à l'un des modèles d'échangeur géothermique de référence.

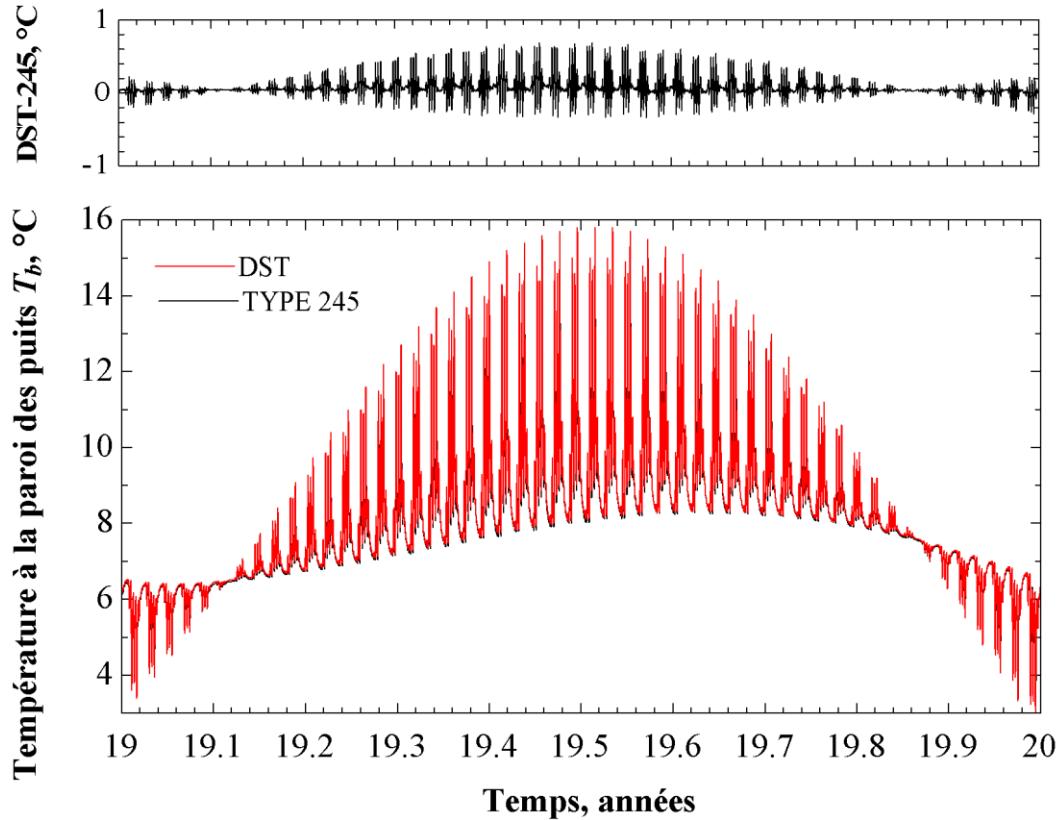


Figure 4-5: Comparaison du TYPE 245 avec le modèle DST

4.3 TYPE 246

Le TYPE 246 est l'adaptation du TYPE 242 pour la modélisation d'un échangeur géothermique multi-puits. Il modélise un échangeur constitué de puits à quatre tuyaux (deux tubes en U), avec deux circuits indépendants (débits massiques et températures d'entrées différents). L'intérieur des puits est modélisé par l'approche proposée par Eslami-nejad et Bernier (2011). Le TYPE 246 a été implémenté dans TRNSYS par Massimo Cimmino, étudiant au doctorat dans le groupe de recherche professeur Bernier. Cette section ajoute une description détaillée du TYPE ainsi qu'un exemple d'utilisation (voir section 4.6).

4.3.1 Présentation du TYPE 246

Par rapport au TYPE 242, seule la méthode de calcul des facteurs de réponse thermique change (voir section 4.2.1). Les facteurs de réponse thermique sont désormais calculés grâce aux g-

fonction proposées par Cimmino et Bernier (2014), et générées à l'aide du préprocesseur introduit à la section 4.1.

4.3.2 Variables du TYPE 246

Les différentes variables à configurer pour réaliser une simulation avec le TYPE 246 dans le logiciel TRNSYS sont détaillées ci-dessous. Les paramètres 26 à 31 concernant les paramètres de l'agrégation de Liu (2005) sont discutés à la section 1.3.

4.3.2.1 Paramètres du TYPE 246

	Nom	Unité
1	Nombre de puits	-
2	Longueur des puits (H)	m
3	Profondeur d'enterrement de la tête des puits (D)	m
4	Rayon des puits (r_b)	m
5	Diamètre intérieur du tube en U ($2r_o$)	m
6	Diamètre extérieur du tube en U ($2r_i$)	m
7	Demi-espacement entre les centres des tuyaux (D_s)	m
8	Conductivité thermique du sol (k_s)	kJ/h · m · K
9	Capacité thermique volumique du sol (ρC_p)_s	kJ/m ³ · K
10	Conductivité thermique du coulis (k_g)	kJ/h · m · K
11	Conductivité thermique du tuyau (k_p)	kJ/h · m · K
12	Rugosité du tuyau (ϵ)	mm
13	Antigel dans le tuyau #1	-
	L'utilisateur a le choix entre 3 types d'antigels :	
	<ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol • 2 : Éthylène glycol • 3 : Méthylène glycol 	
	L'utilisateur peut également choisir l'eau (0), ou définir lui-même les propriétés thermiques du fluide caloporteur (-1). Dans ce cas, les propriétés thermiques du fluide caloporteur sont définies à l'aide des paramètres 15 à 18.	

	Concentration de l'antigel dans le tuyau #1	%
14	L'utilisateur doit spécifier la concentration d'antigel : <ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol ($15.2 < Conc < 57$) • 2 : Éthylène glycol ($11.1 < Conc < 60.1$) • 3 : Méthylène glycol ($7.8 < Conc < 44.3$) 	
15	Capacité thermique massique du fluide dans le tuyau #1	kJ/kg · K
16	Conductivité thermique du fluide dans le tuyau #1	kJ/h · m · K
17	Masse volumique du fluide dans le tuyau #1	kg/m ³
18	Viscosité dynamique du fluide dans le tuyau #1	kg/ m · h
19	Antigel dans le tuyau #2 L'utilisateur a le choix entre 3 types d'antigels : <ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol • 2 : Éthylène glycol • 3 : Méthylène glycol L'utilisateur peut également choisir l'eau (0), ou définir lui-même les propriétés thermiques du fluide caloporteur (-1). Dans ce cas, les propriétés thermiques du fluide caloporteur sont définies à l'aide des paramètres 21 à 24.	-
20	Concentration de l'antigel dans le tuyau #2 L'utilisateur doit spécifier la concentration d'antigel : <ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol ($15.2 < Conc < 57$) • 2 : Éthylène glycol ($11.1 < Conc < 60.1$) • 3 : Méthylène glycol ($7.8 < Conc < 44.3$) 	%
21	Capacité thermique massique du fluide dans le tuyau #2	kJ/kg · K
22	Conductivité thermique du fluide dans le tuyau #2	kJ/h · m · K
23	Masse volumique du fluide dans le tuyau #2	kg/m ³
24	Viscosité dynamique du fluide dans le tuyau #2	kg/ m · h
25	Température du sol non perturbée (T_g)	C
26	Taille du petit bloc Ce paramètre indique la taille des « petits bacs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont fusionnées pour former un « petit bloc ».	-

27	Taille du moyen bloc	-
	Ce paramètre indique la taille des « moyens bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont fusionnées pour former un « moyen bloc ».	
28	Taille du grand bloc	-
	Ce paramètre indique la taille des « grands bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont fusionnées pour former un « grand bloc ».	
29	Période d'attende pour un petit bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des charges individuelles à un « petit bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont conservés intactes lors de la création d'un « petit bloc ».	
30	Période d'attende pour un moyen bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « petits blocs » à un « moyen bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « moyen bloc ».	
31	Période d'attente pour un grand bloc	-
	Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « moyens blocs » à un « grand bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « grand bloc ».	
32	« Logical unit for g-function file »	-
	Ce paramètre ne doit pas être modifié.	

4.3.2.2 Entrées du TYPE 246

	Nom	Unité
1	Température à l'entrée des tubes en U #1 (T_{in-1})	°C
2	Débit total à l'entrée des tubes en U #1 (\dot{m}_1)	kg/h
3	Température à l'entrée des tubes en U #2 (T_{in-2})	°C
4	Débit total à l'entrée des tubes en U #2 (\dot{m}_2)	kg/h

4.3.2.3 Sorties du TYPE 246

	Nom	Unité
1	Température à la sortie des tubes en U #1 (T_{out-1})	m
2	Débit à la sortie des tubes en U #1 (\dot{m}_1)	kg/h

3	Température à la sortie des tubes en U #2 (T_{out-2})	m
4	Débit à la sortie des tubes en U #2 (\dot{m}_2)	kg/h
5	Température à la paroi des puits (T_b)	m
6	Taux d'injection de chaleur du champ de puits (Q)	kJ/h
7	Temps de résidence du fluide caloporeur à l'intérieur dans le tube en U #1	h
8	Nombre de Reynolds dans le tube en U #1	-
9	Perte de charge à l'intérieur du tube en U #1	kPa
10	Temps de résidence du fluide caloporeur à l'intérieur dans le tube en U #2	h
11	Nombre de Reynolds dans le tube en U #2	-
12	Perte de charge à l'intérieur du tube en U #2	kPa

4.3.2.4 Fichier externe

Le fichier texte de la g-function du champ de puits à modéliser généré par le préprocesseur doit être attaché au TYPE 246 dans l'onglet « external file ».

4.3.3 Validation du TYPE 246

Il n'existe pas de données sur les échangeurs géothermiques multi-puits à deux tubes en U avec deux circuits indépendants, il est donc impossible de comparer le TYPE 246 à des données existantes.

C'est pourquoi le TYPE 246 sera seulement comparé au modèle multi-puits TRCM à deux tubes en U avec deux circuits indépendants, correspondant au TYPE 248. La comparaison se trouve à la section 4.6.

4.4 TYPE 247

Le TYPE 247 est l'adaptation du TYPE 243 pour la modélisation d'un échangeur géothermique multi-puits. Il modélise un échangeur multi-puits à deux tuyaux intégrant les phénomènes transitoires à l'intérieur du puits grâce à l'approche TRCM introduite au chapitre 2.

4.4.1 Présentation du TYPE 247

Par rapport au TYPE 243, la principale modification concerne la méthode de calcul des facteurs de réponse thermique. Les facteurs de réponse thermique sont désormais calculés grâce aux g-function proposés par Cimmino et Bernier (2014)

Dans le TYPE 243, la température à la paroi est évaluée pour chacune des tranches axiales des puits. La température à la paroi peut ainsi varier d'une tranche à l'autre. Pour respecter la condition frontière BC III, il est nécessaire d'imposer une température uniforme à la paroi des puits dans le TYPE 247.

Ainsi, la température à la paroi du puits est évaluée sur toute la hauteur du puits:

$$T_b(t_n) = T_g + \Delta T^*(r_b, t_n) + Q(t_n) h(t_n - t_{n-1}) \quad (4.2)$$

où Q (W/m) est le taux d'injection de chaleur moyen des puits :

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{n_H} Q_i}{n_H} \quad (4.3)$$

Q_i est le taux d'injection pour la tranche i . ΔT^* est la variation de température associée aux taux d'injections de chaleur des pas de temps précédents :

$$\Delta T^*(t_n) = \sum_{i=1}^{n-1} [Q(t_i) - Q(t_{i-1})] h(t_n - t_{i-1}) - Q(t_{n-1}) h(t_n - t_{n-1}) \quad (4.4)$$

et où les facteurs de réponse thermique, h , sont calculés grâce aux g-function proposées par Cimmino et Bernier (2014), et générés à l'aide du préprocesseur introduit à la section 4.1.

L'équation (4.2) remplace l'équation (2.27) qui était écrite pour chacune des tranches axiales de puits.

4.4.2 Variables du TYPE 247

Les différentes variables à configurer pour réaliser une simulation avec le TYPE 247 dans le logiciel TRNSYS sont détaillées ci-dessous. Les paramètres 21 à 26 concernant les paramètres de l'agrégation de Liu (2005) sont discutés à la section 1.3.

4.4.2.1 Paramètres du TYPE 247

	Nom	Unité
1	Nombre de puits	-
2	Longueur des puits (H)	m
3	Profondeur d'enterrement de la tête des puits (D)	m
4	Rayon des puits (r_b)	m
5	Rayon extérieur du tube en U (r_o)	m
6	Rayon intérieur du tube en U (r_i)	m
7	Demi-espacement entre les centres des tuyaux (D_s)	m
8	Conductivité thermique du sol (k_s)	kJ/h · m · K
9	Capacité thermique volumique du sol ($\rho C_p)_s$	kJ/m ³ · K
10	Conductivité thermique du coulis (k_g)	kJ/h · m · K
11	Capacité thermique volumique du coulis ($\rho C_p)_g$	kJ/m ³ · K
12	Conductivité thermique du tuyau (k_p)	kJ/h · m · K
13	Rugosité du tuyau (ϵ)	mm
14	Antigel	-
	L'utilisateur a le choix entre 3 types d'antigels :	
15	<ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol • 2 : Éthylène glycol • 3 : Méthylène glycol <p>L'utilisateur peut également choisir l'eau (0), ou définir lui-même les propriétés thermiques du fluide caloporteur (-1). Dans ce cas, les propriétés thermiques du fluide caloporteur sont définies à l'aide des paramètres 15 à 18.</p>	
	Concentration de l'antigel (Conc)	%
16	L'utilisateur doit spécifier la concentration d'antigel :	
	<ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol ($15.2 < Conc < 57$) • 2 : Éthylène glycol ($11.1 < Conc < 60.1$) • 3 : Méthylène glycol ($7.8 < Conc < 44.3$) 	
16	Capacité thermique massique du fluide (c_{p_f})	kJ/kg · K

17	Conductivité thermique du coulis (k_f)	kJ/h · m · K
18	Masse volumique du fluide (ρ_f)	kg/m ³
19	Viscosité dynamique du fluide (μ_f)	kg/m.s
20	Temps du sol non perturbé	°C
21	Taille du petit bloc Ce paramètre indique la taille des « petits bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont fusionnées pour former un « petit bloc ».	-
22	Taille du moyen bloc Ce paramètre indique la taille des « moyens bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont fusionnées pour former un « moyen bloc ».	-
23	Taille du grand bloc Ce paramètre indique la taille des « grands bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont fusionnées pour former un « grand bloc ».	-
24	Période d'attende pour un petit bloc Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des charges individuelles à un « petit bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont conservés intactes lors de la création d'un « petit bloc ».	-
25	Période d'attende pour un moyen bloc Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « petits blocs » à un « moyen bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « moyen bloc ».	-
26	Période d'attente pour un grand bloc Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « moyens blocs » à un « grand bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « grand bloc ».	-
27	Nombres de tranches axiales (n_H)	-
28	Prise en compte de la capacité thermique du fluide Par défaut, la capacité thermique du fluide est prise en compte (correspond à la valeur 1). L'utilisateur peut demander au TYPE 247 de négliger les effets de la capacité thermique du fluide en imposant ce paramètre à la valeur 0.	-
29	« Logical unit for g-function file »	-
	Ce paramètre ne doit pas être modifié.	

4.4.2.2 Entrées du TYPE 247

	Nom	Unité
1	Température d'entrée (T_{in})	°C
2	Débit d'entrée (\dot{m})	kg/h

4.4.2.3 Sorties du TYPE 247

	Nom	Unité
1	Température de sortie (T_{out})	°C
2	Débit à la sortie (\dot{m})	kg/h
3	Taux d'injection de chaleur du champ de puits (Q)	kJ/h
4	Température moyenne à la paroi des puits (T_b)	°C
5	Résistance thermique équivalente des puits (R_b)	m · K/W
6	Résistance thermique interne des puits (R_a)	m · K/W
7	Résistance thermique R_g	m · K/W
8	Résistance thermique R_{gg}	m · K/W
9	Résistance thermique R_{fp}	m · K/W
10	Temps de résidence du fluide caloporteur à l'intérieur du puits	h
11	Nombre de Reynolds (Re)	-
12	Perte de charge à l'intérieur du puits (ΔP)	kPa
13 à $13+n_H$	Température du fluide descendant dans la tranche i ($T_{1,i}$)	°C
$13+n_H+1$ à $13+2n_H$	Température du fluide ascendant dans la tranche i ($T_{2,i}$)	°C

4.4.2.4 Fichier externe

Le fichier texte de la g -function du champ de puits à modéliser généré par le préprocesseur doit être attaché au TYPE 247 dans l'onglet « external file ».

4.4.3 Validation du TYPE 247

Dans la présente section, le TYPE 247 est comparé au modèle DST. Le cas de comparaison est identique à celui présenté à la section 4.2.3, correspondant à la validation du TYPE 245.

Pour rappel, il s'agit de modéliser le comportement d'un champ de 19 puits, espacés de 5 m repartis de façon axisymétrique. Le champ de puits étant soumis à un profil de charge asymétrique à dominante climatisation, correspondant au cas test C. Pour plus d'informations, veuillez-vous référer à la section 4.2.3.

Deux simulations d'une durée de 20 ans, avec un pas de temps d'une heure ont été réalisées avec le TYPE 247: la première en négligeant la capacité thermique du fluide et du coulis, et la seconde en la modélisant (avec $(\rho C_p)_g=3.9 \text{ MJ/m}^3\cdot\text{K}$). Dans les deux cas, les puits sont découpés en 10 tranches axiales. Les résultats de la vingtième année de simulation sont comparés aux résultats fournis par le modèle DST. À noter qu'avec le TYPE 247 en tenant compte des phénomènes transitoires à l'intérieur des puits, le temps de calcul de la simulation est de 3 min. À titre de comparaison, il est de 43 s avec le modèle DST.

Tel qu'illustré à la Figure 4-6, la correspondance entre les températures à la paroi des puits simulées avec le TYPE 247 sans la capacité thermique du puits et avec le modèle DST est excellente. Le TYPE 247 sans la capacité thermique du puits reproduit les résultats du modèle DST avec un écart toujours inférieur à $\pm 0.6^\circ\text{C}$, et avec un écart quadratique moyen de 0.10°C .

De façon prévisible, les températures simulées avec le TYPE 247 avec la capacité thermique du puits s'écarte d'avantage du modèle DST. Désormais l'écart maximal est de $\pm 1.7^\circ\text{C}$, l'écart quadratique moyen est 0.19°C . Le modèle DST néglige la capacité thermique du puits, ce qui explique les différences entre les deux modèles pendant les périodes transitoires.

Cette comparaison ne permet pas de pleinement valider la prise en compte des phénomènes transitoires à l'intérieur des puits par le TYPE 247. Afin de compléter sa validation, il serait nécessaire de le comparer avec un autre modèle d'échangeur géothermique multi-puits prenant en compte la capacité des puits ou avec des données expérimentales relevées sur un échangeur multi-puits.

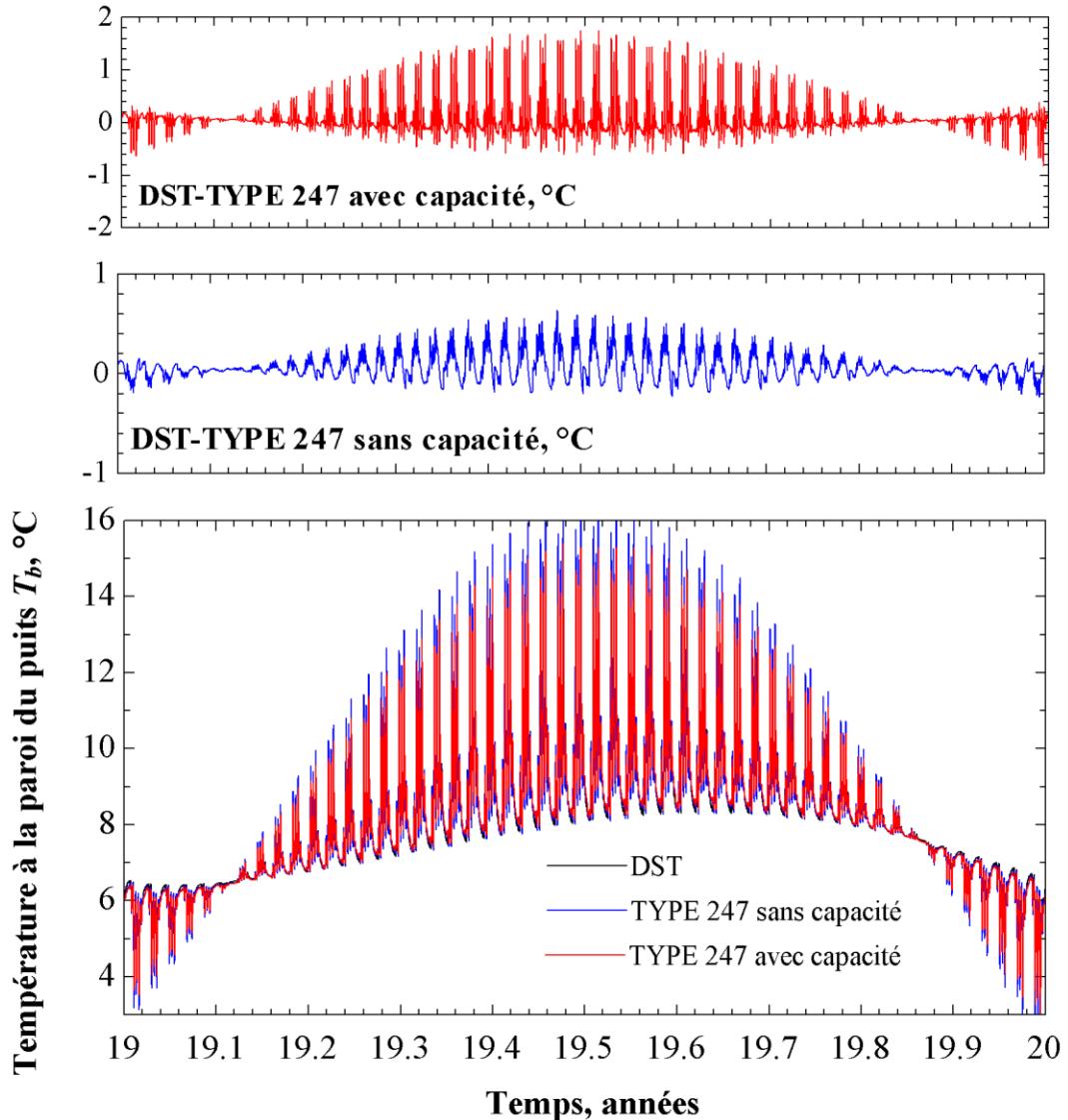


Figure 4-6: Comparaison du TYPE 247 avec le modèle DST

4.5 TYPE 248

Le TYPE 248 est l'adaptation du TYPE 244 pour la modélisation d'un échangeur géothermique multi-puits. Il modélise un échangeur constitué de puits à quatre tuyaux (deux tubes en U), avec deux circuits indépendants (débits massiques et températures d'entrées différents). Il intègre les phénomènes transitoires à l'intérieur du puits grâce à l'approche TRCM introduite au chapitre 2.

4.5.1 Présentation du TYPE 248

Par rapport au TYPE 244, la principale modification concerne la méthode de calcul des facteurs de réponse thermique. Les facteurs de réponse thermique sont désormais calculés grâce aux g-function proposées par Cimmino et Bernier (2014) et générés à l'aide du préprocesseur introduit à la section 4.1.

Afin de respecter la condition frontière BC III, la température à la paroi du puits est évaluée pour l'ensemble du puits. L'Équation (4.2) remplace l'Équation (2.59) qui était écrite pour chacune des tranches axiales de puits (voir la section 4.4.1).

4.5.2 Variables du TYPE 248

Les différentes variables à configurer pour réaliser une simulation avec le TYPE 248 dans le logiciel TRNSYS sont détaillées ci-dessous. Les paramètres 26 à 31 concernant les paramètres de l'agrégation de Liu (2005) sont discutés à la section 1.3.

4.5.2.1 Paramètres du TYPE 248

	Nom	Unité
1	Nombre de puits	-
2	Longueur des puits (H)	m
3	Profondeur d'enterrement de la tête des puits (D)	m
4	Rayon des puits (r_b)	m
5	Rayon extérieur du tube en U (r_o)	m
6	Rayon intérieur du tube en U (r_i)	m
7	Demi-espacement entre les centres des tuyaux (D_s)	m
8	Conductivité thermique du sol (k_s)	kJ/h · m · K
9	Capacité thermique volumique du sol ($\rho C_p)_s$	kJ/m ³ · K
10	Conductivité thermique du coulis (k_g)	kJ/h · m · K
11	Capacité thermique volumique du coulis ($\rho C_p)_g$	kJ/m ³ · K
12	Conductivité thermique du tuyau (k_p)	kJ/h · m · K

13	Rugosité du tuyau (ϵ)	mm
	Antigel dans le tuyau #1	-
14	<p>L'utilisateur a le choix entre 3 types d'antigels :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol • 2 : Éthylène glycol • 3 : Méthylène glycol <p>L'utilisateur peut également choisir l'eau (0), ou définir lui-même les propriétés thermiques du fluide caloporteur (-1). Dans ce cas, les propriétés thermiques du fluide caloporteur sont définies à l'aide des paramètres 15 à 18.</p>	
14	Concentration de l'antigel dans le tuyau #1	%
	<p>L'utilisateur doit spécifier la concentration d'antigel :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol ($15.2 < Conc < 57$) • 2 : Éthylène glycol ($11.1 < Conc < 60.1$) • 3 : Méthylène glycol ($7.8 < Conc < 44.3$) 	
15	Capacité thermique massique du fluide dans le tuyau #1	kJ/kg · K
16	Conductivité thermique du fluide dans le tuyau #1	kJ/h · m · K
17	Masse volumique du fluide dans le tuyau #1	kg/m ³
18	Viscosité dynamique du fluide dans le tuyau #1	kg/ m · h
19	Antigel dans le tuyau #2	-
	<p>L'utilisateur a le choix entre 3 types d'antigels :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol • 2 : Éthylène glycol • 3 : Méthylène glycol <p>L'utilisateur peut également choisir l'eau (0), ou définir lui-même les propriétés thermiques du fluide caloporteur (-1). Dans ce cas, les propriétés thermiques du fluide caloporteur sont définies à l'aide des paramètres 21 à 24.</p>	
20	Concentration de l'antigel dans le tuyau #2	%
	<p>L'utilisateur doit spécifier la concentration d'antigel :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 : Propylène glycol ($15.2 < Conc < 57$) • 2 : Éthylène glycol ($11.1 < Conc < 60.1$) • 3 : Méthylène glycol ($7.8 < Conc < 44.3$) 	
21	Capacité thermique massique du fluide dans le tuyau #2	kJ/kg · K

22	Conductivité thermique du fluide dans le tuyau #2	kJ/h · m · K
23	Masse volumique du fluide dans le tuyau #2	kg/m ³
24	Viscosité dynamique du fluide dans le tuyau #2	kg/ m · h
25	Température du sol non perturbé	°C
26	Taille du petit bloc Ce paramètre indique la taille des « petits bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont fusionnées pour former un « petit bloc ».	-
27	Taille du moyen bloc Ce paramètre indique la taille des « moyens bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont fusionnées pour former un « moyen bloc ».	-
28	Taille du grand bloc Ce paramètre indique la taille des « grands bocs » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont fusionnées pour former un « grand bloc ».	-
29	Période d'attende pour un petit bloc Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des charges individuelles à un « petit bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de charges individuelles qui sont conservés intactes lors de la création d'un « petit bloc ».	-
30	Période d'attende pour un moyen bloc Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « petits blocs » à un « moyen bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « petits blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « moyen bloc ».	-
31	Période d'attente pour un grand bloc Ce paramètre indique la période d'attente pour passer des « moyens blocs » à un « grand bloc » dans la méthode d'agrégation de Liu. Il s'agit du nombre de « moyens blocs » qui sont conservés intactes lors de la création d'un « grand bloc ».	-
32	Nombres de tranches axiales (n_H)	-
33	Prise en compte de la capacité thermique du fluide Par défaut, la capacité thermique du fluide est prise en compte (correspond à la valeur 1). L'utilisateur peut demander au TYPE 248 de négliger les effets de la capacité thermique du fluide en imposant ce paramètre à la valeur 0.	-
34	« Logical unit for g-function file »	-
	Ce paramètre ne doit pas être modifié.	

4.5.2.2 Entrées du TYPE 248

	Nom	Unité
1	Température à l'entrée du tube en U #1 (T_{in-1})	°C
2	Débit à l'entrée du tube en U #1 (\dot{m}_1)	kg/h
3	Température à l'entrée du tube en U #2 (T_{in-2})	°C
4	Débit à l'entrée du tube en U #2 (\dot{m}_2)	kg/h

4.5.2.3 Sorties du TYPE 248

	Nom	Unité
1	Température à la sortie du tube en U #1 (T_{out-1})	m
2	Débit à la sortie du tube en U #1 (\dot{m}_1)	kg/h
3	Température à la sortie du tube en U #2 (T_{out-2})	m
4	Débit à la sortie du tube en U #2 (\dot{m}_2)	kg/h
5	Température moyenne à la paroi des puits (T_b)	m
6	Taux d'injection de chaleur du champ de puits (Q)	kJ/h
7	Résistance thermique équivalente des puits (R_b)	m · K/W
8	Résistance thermique R_g	m · K/W
9	Résistance thermique R_{gg}^{12}	m · K/W
9	Résistance thermique R_{gg}^{13}	m · K/W
10	Résistance thermique R_{fp}^I	m · K/W
11	Résistance thermique R_{fp}^{I2}	m · K/W
12	Temps de résidence du fluide caloporeur à l'intérieur dans le tube en U #1	h
13	Nombre de Reynolds dans le tube en U #1	-
14	Perte de charge à l'intérieur du tube en U #1	kPa
15	Temps de résidence du fluide caloporeur à l'intérieur dans le tube en U #2	h
16	Nombre de Reynolds dans le tube en U #2	-

17	Perte de charge à l'intérieur du tube en U #2	kPa
18 à $18+n_H$	Température du fluide descendant dans la tranche i dans le tube en U #1 ($T_{1,i}$)	°C
$18+n_H+1$ à $18+2n_H$	Température du fluide ascendant dans la tranche i dans le tube en U #1 ($T_{3,i}$)	°C
$18+2n_H+1$ à $18+3n_H$	Température du fluide descendant dans la tranche i dans le tube en U #2 ($T_{2,i}$)	°C
$18+3n_H+1$ à $18+4n_H$	Température du fluide ascendant dans la tranche i dans le tube en U #2 ($T_{4,i}$)	°C

4.5.2.4 Fichier externe

Le fichier texte de la g -fonction du champ de puits à modéliser généré par le préprocesseur doit être attaché au TYPE 248 dans l'onglet « external file ».

4.5.3 Validation du TYPE 248

Il n'existe pas de données sur les échangeurs géothermiques multi-puits à deux tubes en U avec deux circuits indépendants, il est donc impossible de comparer le TYPE 248 à des données existantes.

C'est pourquoi le TYPE 248 sera seulement comparé au modèle multi-puits basé sur l'approche de Eslami-nejad et Bernier (2011), correspondant au TYPE 246. La comparaison se trouve à la section suivante.

4.6 Exemple d'utilisation des TYPES 246 et 248

La présente section présente un exemple d'utilisation des TYPES 246 et 248 dans le but de les comparer et d'examiner l'influence de la capacité thermique du puits pour un échangeur à double tube en U.

Les TYPES 246 et 248 sont utilisés pour modéliser le stockage thermique saisonnier par puits géothermiques d'une communauté solaire. Il s'agit de la communauté solaire Drake Landing, située à proximité de Calgary, illustré à la Figure 4-7. Elle comprend un réseau de chauffage urbain alimentant 52 unités de logement où chaque logement est chauffé par une centrale de traitement d'air. L'énergie solaire est collectée par 798 panneaux solaires thermiques et stockée par un échangeur géothermique constitué de 144 puits à deux tubes en U, à deux circuits

indépendants. Le premier circuit correspondant au circuit de charge est connecté aux panneaux solaires, tandis que le second circuit correspondant au circuit de décharge est relié au réseau urbain.

Verstraete (2013) propose dans son mémoire une description détaillée de la communauté solaire Drake Lanking. Elle présente également une modélisation de la communauté solaire dans l'environnement TRNSYS. Pour modéliser le stockage thermique saisonnier par puits géothermiques, elle a utilisé le TYPE 257 créé par Chapuis (2009) qui intègre au modèle DST deux circuits indépendants. En effet, le modèle DST ne permet pas la modélisation de puits géothermiques à deux tubes en U à deux circuits indépendants. Chapuis (2009) a modifié le modèle DST pour permettre de fixer un débit et une température d'entrée propres à chacun des circuits. Cependant, dans le TYPE 257, l'interaction thermique entre les deux tubes en U n'est pas prise en compte directement mais par l'intermédiaire de l'échange thermique à la paroi.

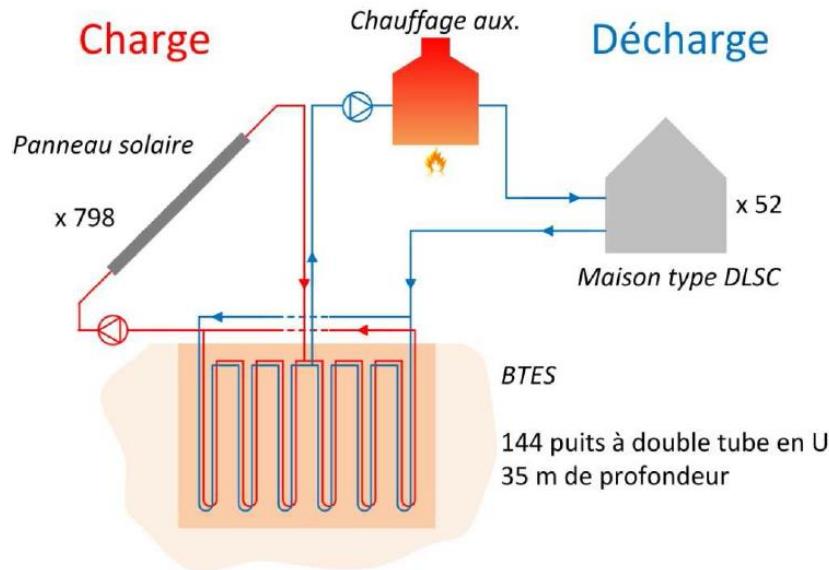


Figure 4-7: Illustration de la communauté solaire Drake Landing extrait du mémoire de Verstraete (2013)

Dans la présente section, l'assemblage TRNSYS réalisé par Verstraete (2013) est réutilisé. Désormais le stockage thermique saisonnier par puits géothermiques est modélisé successivement par le TYPE 246 et par le TYPE 248. L'échangeur géothermique de la communauté solaire Drake Landing est constitué de 144 puits uniformément repartis en 24 circuits de 6 puits en série. Avec les TYPES de la suite il n'est pas possible de modéliser des puits en série. Dans les

simulations qui suivent, les 144 puits sont donc placés en parallèle. Les paramètres de l'échangeur géothermique sont détaillés dans le Tableau 4-1.

Trois cas sont étudiés : lorsque l'échangeur géothermique est modélisé avec le TYPE 246, et lorsque l'échangeur géothermique est modélisé avec le TYPE 248 avec et sans la capacité thermique du puits (incluant la capacité thermique du fluide et du coulis). Trois simulations (correspondant aux 3 cas) de 5 années avec un pas de 1h sont réalisées.

Concernant les temps de calcul des simulations, en utilisant un ordinateur équipé d'un processeur Intel Core i7 (3.40 GHz) et d'une mémoire vive de 16 Go, la simulation dure 44 s avec le TYPE 246 contre 3 min avec le TYPE 248.

Le Tableau 4-2 présente les performances énergétiques annuelles du système complet pendant les cinq premières années d'opération. Les cas où l'échangeur est modélisé avec le TYPE 246 et avec le TYPE 248 sans capacité thermique prévoient des fractions solaires presque identiques. Le système a une fraction solaire de 0.62 à la 5^{ème} année avec le TYPE 246 contre 0.63 avec le TYPE 248 sans la capacité thermique du puits. La Figure 4-8 montre l'évolution des températures à l'entrée et à la sortie de l'échangeur géothermique, côté charge et côté décharge, la première semaine de décembre de l'année 2. Il est à noter que lorsque le débit est nul, la température n'est pas tracée sur le graphique. Tel qu'illustré à la Figure 4-8a, les températures de sorties simulées avec le TYPE 246 et le TYPE 248 sans capacité thermique concordent précisément. A défaut de pouvoir pleinement valider ces deux modèles, cette comparaison permet de montrer que le TYPE 246 et le TYPE 248, qui utilisent des modélisations du puits différentes, donnent des résultats cohérents.

Tableau 4-1: Paramètres de l'échangeur géothermique de la communauté solaire Drake Landing

Paramètre	Valeur	Unité
Nombre de puits	144	-
Espacement entre les puits	2.25	m
Longueur des puits	35	m
Profondeur d'enterrement	1	m
Rayon des puits	0.075	m
Conductivité thermique du coulis	0.89	W/m·K
Conductivité thermique du sol	1.68	W/m·K
Capacité thermique volumique du sol	3400	kJ/m ³ ·K
Rayon interne du tuyau	0.01	m
Rayon externe du tuyau	0.0125	m
Demi-espacement centre à centre entre les tuyaux	0.045	m
Conductivité thermique du tuyau	0.41	W/m·K

Tel qu'indiqué dans le Tableau 4-2, la fraction solaire du système énergétique est plus grande lorsque la capacité thermique du puits est modélisée. Le système a alors une fraction solaire de 0.66 lors de la 5^{ème} année contre 0.63 lorsque la capacité thermique du puits est négligée. Il est possible de remarquer sur la Figure 4-8b que lorsque la capacité thermique du puits est modélisée la température à la sortie de l'échangeur côté décharge est légèrement supérieure à la température simulée sans capacité thermique. Cette dernière remarque est valable à l'exception des périodes pendant lesquelles le circuit de charge est activé plusieurs heures d'affilées. La comparaison des cas avec et sans capacités thermiques montre l'influence de la capacité thermique du fluide et du coulis pour la modélisation de puits géothermiques destinés au stockage thermique saisonnier. Dans cet exemple, la fraction solaire du système passe de 0.66 à 0.63 lorsque la capacité thermique du puits est négligée.

Il est à noter que le système a également été simulé avec un pas de temps de 15 min. Avec ce pas de temps plus petit, on parvient à la même conclusion concernant l'influence de la capacité thermique du puits sur les performances énergétiques de la communauté solaire. Néanmoins, il serait recommandé de poursuivre l'étude pour tirer des conclusions définitives.

Tableau 4-2 : Performances énergétiques du système complet

TYPE 246

Année d'opération (1er janv. - 31 déc.)	1	2	3	4	5
Energie solaire collectée (GJ)	5129	4342	4218	4175	4149
Energie solaire fournie au réseau (GJ)	304	1185	1553	1658	1712
Energie totale fournie au réseau (GJ)	2733	2759	2769	2773	2774
Fraction solaire	0.11	0.43	0.56	0.60	0.62

TYPE 248 sans capacité thermique

Année d'opération (1er janv. - 31 déc.)	1	2	3	4	5
Energie solaire collectée (GJ)	5236	4377	4256	4215	4191
Energie solaire fournie au réseau (GJ)	346	1215	1598	1707	1760
Energie totale fournie au réseau (GJ)	2734	2760	2771	2774	2776
Fraction solaire	0.13	0.44	0.58	0.62	0.63

TYPE 248 avec capacité thermique

Année d'opération (1er janv. - 31 déc.)	1	2	3	4	5
Energie solaire collectée (GJ)	5395	4510	4381	4337	4307
Energie solaire fournie au réseau (GJ)	409	1324	1703	1808	1845
Energie totale fournie au réseau (GJ)	2736	2763	2774	2776	2778
Fraction solaire	0.15	0.48	0.61	0.65	0.66

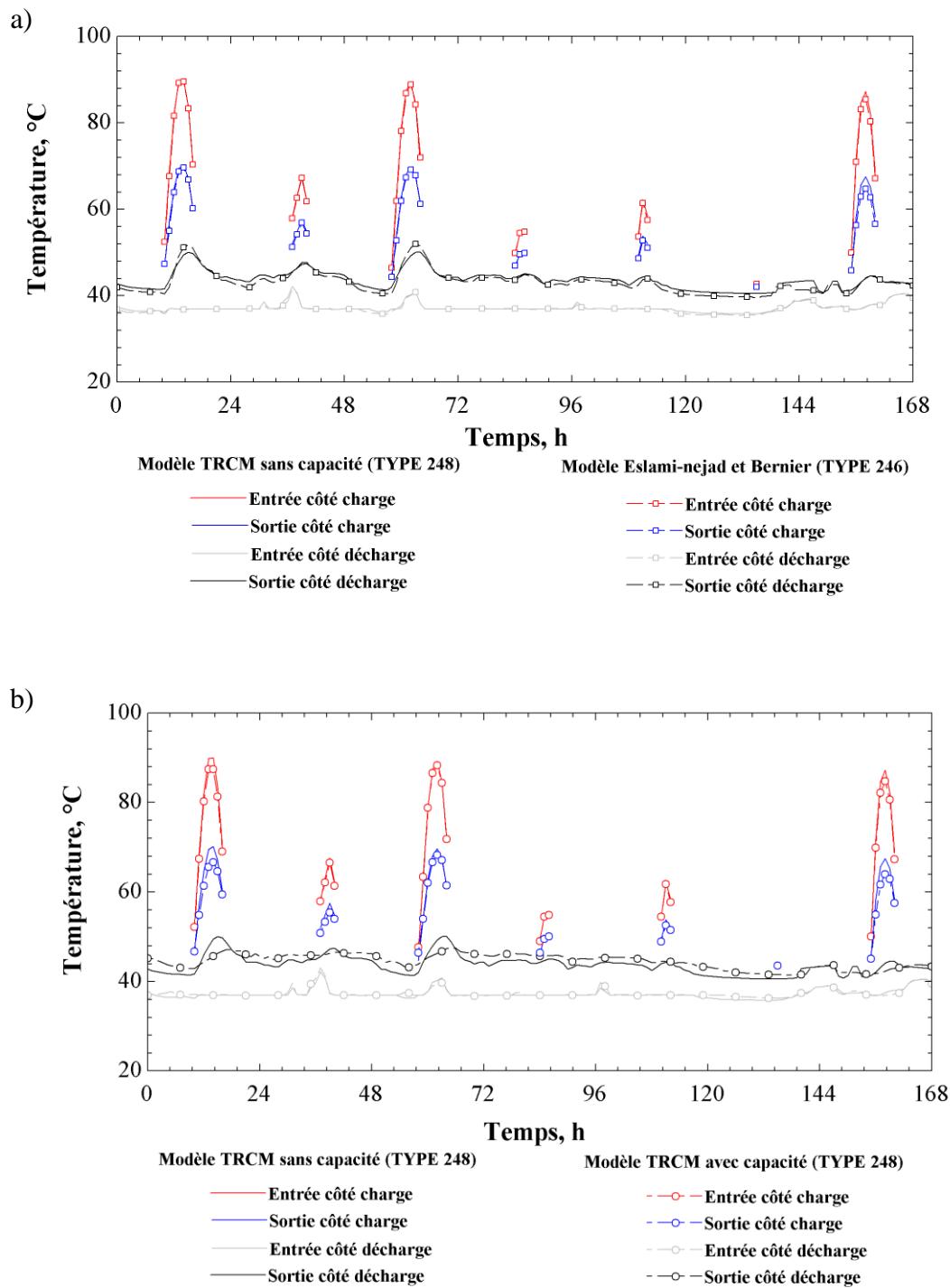


Figure 4-8: Températures à l'entrée et à la sortie de l'échangeur géothermique côté charge et côté décharge la 1ère semaine de décembre de l'année 2

4.7 Résumé

Ce chapitre présente l'adaptation des modèles d'échangeurs géothermiques simples de la suite TRNSYS pour la modélisation d'échangeurs multi-puits, conduisant à l'élaboration de quatre autres TYPEs. L'intérêt de ces modèles multi-puits est triple : permettre à l'usager de spécifier la configuration exacte du champ de puits à modéliser; inclure des modèles d'échangeurs géothermique multi-puits à deux tubes en U, avec deux circuits indépendants (TYPE 246 et TYPE 248); inclure un modèle d'échangeur géothermique multi-puits prenant en compte les phénomènes transitoires à l'intérieur des puits à deux tuyaux (TYPE 247) et également des puits à 4 tuyaux (TYPE 248).

Un exemple d'utilisation des TYPEs 246 et 248 est également illustré dans ce chapitre, dans lequel ils servent à modéliser le stockage thermique saisonnier par puits géothermiques d'une communauté solaire. L'influence de la capacité thermique des puits y est examinée. Dans cet exemple, la fraction solaire du système passe de 0.66 à 0.63 lorsque la capacité thermique du puits est négligée.

CONCLUSION

Ce mémoire porte sur l'élaboration et la validation d'une suite évolutive comprenant huit modèles d'échangeurs géothermiques verticaux implémentés dans l'environnement TRNSYS sous la forme de composants appelés TYPES.

Contributions des présents travaux

Il existe présentement deux modèles d'échangeurs géothermiques verticaux couramment disponibles dans le logiciel TRNSYS : le modèle DST, et le modèle EWS. Le modèle DST est souvent considéré comme le modèle de référence pour la modélisation de puits géothermiques. Néanmoins, il présente certaines lacunes. La résistance thermique équivalente des puits est constante pendant les simulations. L'usager ne peut spécifier la configuration exacte du champ de puits et il doit s'en remettre à une configuration axisymétrique. De plus, le modèle DST ne permet pas de modéliser des puits à double tubes en U avec deux circuits indépendants (températures et débits différents). Enfin, il ne tient pas compte des phénomènes transitoires liés à la capacité thermique intérieure des puits. Si le modèle EWS répond au quatrième point, il se limite à la modélisation d'un seul puits géothermique constitué d'un double tube en U classique à un seul circuit. La suite TRNSYS présenté dans ce mémoire donne accès à une grande variété de modèles d'échangeurs géothermiques verticaux, au niveau de complexité croissant, qui répondent à ces lacunes. Ces modèles peuvent être couplés dans TRNSYS à d'autres composants (pompe à chaleur, maison, capteur solaire...) et de simuler le comportement dynamique d'une grande diversité de systèmes.

Les quatre premiers TYPES de la suite TRNSYS sont des modèles d'échangeurs géothermiques simples (un seul puits). Le premier, le TYPE 241, est un modèle de puits géothermique à deux tuyaux (un seul tube en U), dont l'intérêt est essentiellement pédagogique. Il a pour but de permettre à un usager non-initié à la géothermie de se familiariser avec les concepts associés aux échangeurs géothermiques (résistances thermiques, facteurs de réponses thermiques, agrégation des charges), et à l'utilisation d'un TYPE destiné à la simulation d'un puits géothermique. Bien qu'élémentaire, le TYPE 241 parvient après 20 années de simulation à reproduire les résultats du modèle DST avec un écart maximal de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Le second modèle de la suite est un modèle d'échangeur géothermique à double tubes en U, avec deux circuits indépendants (débits massiques et températures d'entrées différents) basé sur l'approche de Eslami-nejad et Bernier

(2011). Ce modèle, intitulé TYPE 242, prend en compte l'interaction thermique entre les tuyaux dans le puits. Ce modèle est destiné à simuler un puits géothermique qui est relié à une source froide (pompe à chaleur par exemple), et à une source chaude (capteur solaire thermique par exemple). Le troisième modèle, appelé TYPE 243, est un modèle de puits géothermique à deux tuyaux prenant compte les phénomènes transitoires à l'intérieur du puits. Il s'agit d'un modèle quasi 3D, dans lequel le puits est découpé en tranches axiales successives, où chaque tranche est modélisée par un circuit de résistances et capacités thermiques (TRCM) comportant huit nœuds. Le modèle TRCM proposé prend en compte la capacité thermique du puits géothermique (du fluide caloporteur et du coulis). Il a été comparé avec succès avec d'autres modèles de puits géothermiques incluant un modèle numérique 3D, ainsi qu'avec des cas expérimentaux. Le TYPE 243 donne accès à un modèle d'échangeur géothermique qui intègre les phénomènes transitoires se produisant à l'intérieur du puits. Ces derniers sont généralement négligés dans les modèles de puits existants bien qu'ils s'avèrent importants lorsque les pompes à chaleur fonctionnent de façon intermittente. Le quatrième modèle de la suite est le TYPE 244, il s'agit de l'adaptation du modèle TRCM à deux tuyaux pour un puits à quatre tuyaux (double tubes en U) avec deux circuits indépendants. Le circuit de résistances et capacités thermiques est ajusté pour modéliser les différents échanges thermiques entre les quatre tuyaux et avec la paroi du puits, il comprend désormais dix-huit nœuds pour chaque tranche axiale. Tout comme le TYPE 243, le TYPE 244 prend en compte la capacité thermique du puits géothermique (du fluide caloporteur et du coulis).

Ces quatre modèles d'échangeurs simples ont été adaptés à la modélisation d'échangeurs géothermiques multi-puits, conduisant à l'élaboration de quatre autres TYPES qui viennent compléter la suite TRNSYS. Les TYPES 241 à 244 deviennent respectivement les TYPES 245 à 248. Ces modèles d'échangeurs multi-puits proposés comblient une des lacunes du modèle DST en permettant à l'usager de spécifier la configuration exacte du champ de puits. Pour cela, ils utilisent les g-functions générées par un préprocesseur, indépendant à la suite TRNSYS pour calculer la réponse thermique du champ de puits à modéliser et dans lequel le positionnement spatial de chaque puits est possible. Une contribution importante dans le domaine est la possibilité de modéliser un échangeur géothermique multi-puits qui prend en compte les phénomènes transitoires se produisant à l'intérieur des puits, pour des puits à un tube en U (TYPE 247) ou pour des puits à double tubes en U (TYPE 248). Une autre contribution majeure

est de donner accès à deux modèles d'échangeur géothermique multi-puits à double tubes en U reliés à deux réseaux indépendants ayant chacun son propre débit et sa propre température de fluide à l'entrée (les TYPEs 246 et 248). Un exemple d'utilisation de ces deux modèles est illustré dans ce mémoire, dans lequel ils servent à modéliser le stockage thermique saisonnier par puits géothermiques d'une communauté solaire.

Recommandations

La suite TRNSYS propose des modèles de puits à double tubes en U avec deux circuits indépendants qui sont nouveaux dans le domaine. Face à l'impossibilité de les comparer à d'autres modèles existants, il est recommandé de les valider expérimentalement. Pour cela, il serait utile d'avoir accès à des données expérimentales précises décrivant le comportant d'un échangeur géothermique à double tubes en U, en régime permanent, et en régime transitoire afin de s'assurer que le TYPE 244 prend correctement en compte la capacité thermique du puits géothermique. Il est également recommandé de poursuivre la validation des modèles multi-puits de la suite, en les comparant de préférence avec des mesures expérimentales.

Une amélioration pourrait être apportée aux modèles de la suite concernant les profils de températures dans le sol aux conditions de frontières. Il serait intéressant de prendre en compte de façon détaillée l'influence de la variation de la température de l'air sur le profil de température du sol non perturbé. Cette correction est particulièrement conseillée pour la modélisation d'échangeurs géothermiques courts dans lesquels les effets de surfaces ne sont pas négligeables.

Dans l'objectif d'améliorer la modélisation du stockage thermique saisonnier par puits géothermique, il est recommandé de développer un nouveau modèle permettant de modéliser un échangeur géothermique multi-puits dans lequel les puits pourraient être reliés en série.

Enfin, il serait intéressant d'adapter le modèle TRCM proposé pour la modélisation d'un puits coaxial.

BIBLIOGRAPHIE

- ASHRAE American Society of Heating, R., and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta. (2011). ASHRAE Handbook-Applications.
- Bauer, D., Heidemann, W., & Diersch, H.-J. (2011). Transient 3D Analysis of Borehole Heat Exchanger Modeling. *Geothermics*, 40(4), 250-260.
- Bauer, D., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., & Diersch, H.-J. (2011). Thermal Resistance and Capacity Models for Borehole Heat Exchangers. *International Journal of Energy Research*, 35(4), 312-320.
- Bennet, J., Claesson, J., & Hellstrom, G. (1987). *Multipole Method to Compute the Conductive Heat Flows to and Between Pipes in a Composite Cylinder*. Lund, Suède.
- Bernier, M. (2014). *Sizing and Simulating Geothermal Borefields Using Thermal Response Factors*. 11th IEA Heat Pump Conference, Montreal, Canada.
- Bernier, M., & Cauret, O. (2014). *Modeling of Short Geothermal Boreholes in Series with Experimental Validation*. 11th IEA Heat Pump Conference, Montréal, Canada.
- Bernier, M., Pinel, P., Labib, R., & Paillot, R. (2004). A Multiple Load Aggregation Algorithm for Annual Hourly Simulations of GCHP Systems *HVAC&R Research*, 10(4), 471-487.
- Bernier, M. A. (2001). Ground-Coupled Heat Pump System Simulation. *ASHRAE Transactions*, 107, 605-616.
- Bertagnolio, S., Bernier, M., & Kummert, M. (2012). Comparing Vertical Ground Heat Exchanger Models. *Journal of Building Performance Simulation*, 5(6), 369-383.
- Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1946). *Conduction of Heat in Solids* (2^e éd.).
- Chapuis, S. (2009). *Stockage Thermique Saisonnier dans un Champ de Puits Géothermiques Verticaux en Boucle Fermée*. M.Sc., Ecole Polytechnique, Montréal, Canada.
- Cimmino, M., & Bernier, M. (2013). *Preprocessor for the Generation of g-Functions Used in the Simulation of Geothermal Systems*. 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France.

- Cimmino, M., & Bernier, M. (2014). A Semi-Analytical Method to Generate g-Functions for Geothermal Bore Fields. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70, 641-650.
- Cimmino, M., Bernier, M., & Adams, F. (2013). A Contribution Towards the Determination of g-Functions Using the Finite Line Source. *Applied Thermal Engineering*, 51(1-2), 401-412.
- Claesson, J., & Hellström, G. (2011). Multipole Method to Calculate Borehole Thermal Resistances in a Borehole Heat Exchanger. *HVAC&R Research*, 17, 895-911.
- Claesson, J., & Javed, S. (2011). An Analytical Method to Calculate Borehole Fluid Temperatures for Time-Scales from Minutes to Decade. *ASHRAE Transactions*, 117(2), 279-288.
- Cooper, L. Y. (1976). Heating of a Cylindrical Cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 19, 575-577.
- Costes, V., & Peysson, P. (2008). *Capteurs Géothermiques Verticaux Enterrés: Validation Expérimentale de Nouveaux Modèles Développés dans l'Environnement TRNSYS*. Montréal, Canada.
- De Carli, M., Tonon, M., Zarella, A., & Zecchin, R. (2010). A Computational Capacity Resistance Model (CaRM) for Vertical Ground-Coupled Heat Exchangers. *Renewable Energy*, 35(7), 1537-1550.
- Diao, N. R., Zeng, H. Y., & Fang, Z. H. (2011). Improvement in Modeling of Heat Transfer in Vertical Ground Heat Exchangers. *HVAC&R Research*, 10(4), 459-470.
- Eskilson, P. (1987). *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. PhD, University of Lund, Lund, Suède.
- Eskilson, P., & Claesson, J. (1988). Simulation Model for Thermally Interacting Heat Extraction Boreholes. *Numerical Heat Transfer*, 13(2), 149-165.
- Eslami-Nejad, P., & Bernier, M. (2011). Coupling of Geothermal Heat Pumps with Thermal Solar Collector Using Double U-tube Boreholes with Two Independent Circuits. *Applied Thermal Engineering*, 31(14-15), 3066-3077.
- Godefroy, V., & Bernier, M. (2014). *A Simple Model to Account for Thermal Capacity in Boreholes*. 11th IEA Heat Pump Conference, Montreal, Canada.

- He, M. (2012). *Numerical Modelling of Geothermal Borehole Heat Exchanger Systems*. Ph.D., Montfort Universoty, Leicester, UK.
- He, M., Rees, S. J., & Shao, L. (2009). *Applications of a Dynamic Three-Dimensional Numerical Model for Borehole Heat Exchangers*. the 11th International Conference on Thermal Energy Storage, Stockholm Internal Fairs, Stockholm, Suède.
- Hellström, G. (1989). Duct Ground Heat Storage Model. Suède.
- Hellström, G. (1991). *Ground Heat Storage: Thermal Analysis of Duct Storage Systems: Part 1 Theory*. PhD, University of Lund, Lund, Suède.
- Ingersoll, L. R., & Plass, H. J. (1948). Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump. *Heating, Piping & Air Conditionning*, 20, 119-122.
- Ingersoll, L. R., Zobel, O. J., & Ingersoll, A. C. (1954). *Heat Conduction: With Engineering, Geological, and Other Applications*.
- Kelvin, W. T., Larmor, T., & Joule, J. P. (1882). *Mathematical and Physical Papers*.
- Lamarche, L., & Beauchamp, B. (2007). A New Contribution to the Finite Line-Source Model for Geothermal Boreholes. *Energy and Buildings*, 39, 188-198.
- Lamarche, L., Kajl, S., & Beauchamp, B. (2010). A Review of Methods to Evaluate Borehole Thermal Resistances in Geothermal Heat-Pump Systems. *Geothermics*, 39(2), 187-200.
- Liu, X. (2005). *Development and Experimental Validation of Simulation of Hydronic Snow Melting Systems for Bridges*. Ph.D., Oklahoma State University, OK, USA.
- Marcotte, D., & Pasquier, P. (2008). Fast Fluid and Ground Temperature Computation for Geothermal Ground-Loop Heat Exchanger Systems. *Geothermics*, 37(6), 651-665.
- Pahud, O., Hellström, G., & Mazzarella, L. (1996). *Heat Storage in the Ground. Duct Ground Heat Storage Model for TRNSYS*. Lausanne, Suisse.
- Pasquier, P., & Marcotte, D. (2012). Short-Term Simulation of Ground Heat Exchanger with an Improved TRCM. *Renewable Energy*, 46, 92-99.
- Pasquier, P., & Marcotte, D. (2014). Joint Use of Quasi-3D Response Model and Spectral Method to Simulate Borehole Heat Exchanger. *Geothermics*, 51, 281-299.

- Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*.
- Paul, N. D. (1996). *The Effect of Grout Thermal Conductivity on Vertical Geothermal Heat Exchanger Design and Performance*. M.Sc., South Dakota State University, Brookings.
- Philippe, M., Bernier, M., & Marchio, D. (2009). Validity Ranges of Three Analytical Solutions to Heat Transfer in the Vicinity of Single Boreholes. *Geothermics*, 38(4), 407-413.
- Rancourt-Ouimet, M. (2012). *Performances d'un Champ de Puits Géothermiques Verticaux Peu Profonds en Boucle Fermée*. M.Sc., École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- Salim-Shirazi, A. (2012). *Transient Heat Transfer in Vertical Ground Heat Exchangers*. Ph.D., Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- Salim-Shirazi, A., & Bernier, M. (2013). Thermal Capacity Effects in Borehole Ground Heat Exchangers. *Energy and Buildings*, 67, 352-364.
- Veillon, F. (1972). *Quelques nouvelles méthodes pour le calcul numérique de la transformée inverse de Laplace*. Thèse, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Grenoble, France.
- Verstraete, A. (2013). *Étude d'une Communauté Solaire avec Stockage Thermique Saisonnier par Puits Géothermiques*. M.Sc., École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- Wetter, M., & Huber, A. (1997). TRNSYS Type 451: Vertical Borehole Heat Exchanger EWS Model, Version 3.1 - Model description and implementing into TRNSYS. Stuttgart, Germany.
- Yang, L., Douglas, M. A., Gusdorf, J., Szadkowski, F., Limouse, E., Manning, M. M., & Swinton, M. C. (2007). Residential Total Energy System Testing at the Canadian Centre for Housing Technology. *Proceedings of PWR 2007, ASME Power, San Antonio, Texas, USA*.
- Young, T. R. (2004). *Development, Verification, and Design Analysis of the Borehole Fluid Thermal Mass Model for Approximating Short Term Borehole Thermal Response*. M.Sc., Oklahoma State University, OK, USA.

Zarella, A., Scarpa, M., & De Carli, M. (2011). Short Time Step Analysis of Vertical Ground-Coupled Heat Exchangers: The Approach of CaRM. *Renewable Energy*, 36(9), 2357-2367.

Zeng, H. Y., Diao, N. R., & Fang, Z. (2003). Heat Transfer Analysis of Boreholes in Vertical Ground Heat Exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(23), 4467–4481.

Zeng, H. Y., Diao, N. R., & Fang, Z. H. (2002). Finite Line-Source Model for Boreholes in Geothermal Heat Exchanger. *Heat Transfer - Asian Research*, 31(7), 558-567.

ANNEXE A - ADAPTATION DU MODÈLE DE ESLAMI-NEJAD ET BERNIER (2011)

Eslami-nejad et Bernier (2011) suggèrent de réécrire le système d'équations différentielles (3.16) sous forme adimensionnel, en introduisant les variables suivantes :

$$\begin{aligned}
 \theta_{i=1,2,3,4}(Z) &= \frac{(T_i(Z) - T_{in-1}) + (T_i(Z) - T_{in-2})}{T_{in-1} - T_{in-2}} \\
 \theta_b &= \frac{(T_b - T_{in-1}) + (T_b - T_{in-2})}{T_{in-1} - T_{in-2}} \\
 R_1^* &= \frac{(\dot{m} C_f)_{1-3} R_1^\Delta}{H}, R_{12}^* = \frac{(\dot{m} C_f)_{1-3} R_{12}^\Delta}{H}, R_{13}^* = \frac{(\dot{m} C_f)_{1-3} R_{13}^\Delta}{H} \\
 Z &= \frac{z}{H}
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

Le système d'équations (3.16) se réécrit alors de la façon suivante :

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial \theta_1(Z)}{\partial z} &= a\theta_1(Z) + b\theta_2(Z) + c\theta_3(Z) + b\theta_4(Z) + d \\
 -\frac{\partial \theta_2(Z)}{\partial z} &= \alpha(b\theta_1(Z) + a\theta_2(Z) + b\theta_3(Z) + c\theta_4(Z) + d) \\
 \frac{\partial \theta_3(Z)}{\partial z} &= c\theta_1(Z) + b\theta_2(Z) + a\theta_3(Z) + b\theta_4(Z) + d \\
 \frac{\partial \theta_4(Z)}{\partial z} &= \alpha(b\theta_1(Z) + c\theta_2(Z) + b\theta_3(Z) + a\theta_4(Z) + d)
 \end{aligned} \tag{A.2}$$

Avec

$$a = \frac{1}{R_1^*} + \frac{2}{R_{12}^*} + \frac{1}{R_{13}^*}, b = -\frac{1}{R_{12}^*}, c = -\frac{1}{R_{13}^*}, d = -\frac{\theta_b}{R_1^*}$$

et

$$\alpha = \frac{(\dot{m} C_f)_{1-3}}{(\dot{m} C_f)_{2-4}}$$

En utilisant les transformées de Laplace, le système (A.2) se simplifie en un système d'équations linéaires qui peut être résolu algébriquement. Les expressions des profils de températures adimensionnées, $\theta_{i=1,2,3,4}(Z)$ sont ensuite déterminées à l'aide des transformées de Laplace inverses.

Eslami-nejad et Bernier (2011) ont calculés ces expressions et établi les expressions des températures adimensionnées à la sortie de l'échangeur géothermique, $\theta_3(0)$, et $\theta_4(0)$, sous la forme d'un système matriciel simple :

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_3(0) \\ \theta_4(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Dans le système d'équations (A.3) proposé par Eslami-nejad et Bernier (2011), la température à la paroi du puits, θ_b est supposée connue. Les températures adimensionnées à la sortie du puits $\theta_3(0)$ et $\theta_4(0)$ sont fonction de θ_b .

Dans le TYPE 242, la température à la paroi du puits est une inconnue. Le système d'équations (A.3) a été modifié en un nouveau système (A.4) pour rajouter la température à la paroi du puits comme troisième inconnue :

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_3(0) \\ \theta_4(0) \\ \theta_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Avec

$$A_{11} = \frac{A_{11,1}}{\gamma^2 - \eta^2} \cosh(\gamma) + \frac{A_{11,2}}{\gamma(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\gamma) + \frac{A_{11,3}}{\gamma^2 - \eta^2} \cosh(\eta) + \frac{A_{11,4}}{\eta(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\eta)$$

$$A_{12} = \frac{A_{12,1}}{\gamma^2 - \eta^2} \cosh(\gamma) + \frac{A_{12,2}}{\gamma(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\gamma) + \frac{A_{12,3}}{\gamma^2 - \eta^2} \cosh(\eta) + \frac{A_{12,4}}{\eta(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\eta)$$

$$A_{13} = \frac{A_{13,2}}{\gamma(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\gamma) + \frac{A_{13,4}}{\eta(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\eta)$$

$$A_{21} = \frac{A_{21,1}}{\gamma^2 - \eta^2} \cosh(\gamma) + \frac{A_{21,2}}{\gamma(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\gamma) + \frac{A_{21,3}}{\gamma^2 - \eta^2} \cosh(\eta) + \frac{A_{21,4}}{\eta(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\eta)$$

$$A_{22} = \frac{A_{22,1}}{\gamma^2 - \eta^2} \cosh(\gamma) + \frac{A_{22,2}}{\gamma(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\gamma) + \frac{A_{22,3}}{\gamma^2 - \eta^2} \cosh(\eta) + \frac{A_{22,4}}{\eta(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\eta)$$

$$\begin{aligned}
A_{23} &= \frac{A_{23,2}}{\gamma(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\gamma) + \frac{A_{23,4}}{\eta(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\eta) \\
D_1 &= \frac{D_{1,1}}{\gamma^2 - \eta^2} \cosh(\gamma) + \frac{D_{1,2}}{\gamma(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\gamma) + \frac{D_{1,3}}{\gamma^2 - \eta^2} \cosh(\eta) + \frac{D_{1,4}}{\eta(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\eta) \\
D_2 &= \frac{D_{2,1}}{\gamma^2 - \eta^2} \cosh(\gamma) + \frac{D_{2,2}}{\gamma(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\gamma) + \frac{D_{2,3}}{\gamma^2 - \eta^2} \cosh(\eta) + \frac{D_{2,4}}{\eta(\gamma^2 - \eta^2)} \sinh(\eta)
\end{aligned}$$

Où

$$\begin{aligned}
A_{11,1} &= \alpha^2(a^2 - c^2) - \gamma^2 \\
A_{11,2} &= \alpha^2(a + c)(a^2 - c^2) - 4\alpha^2 b^2(a - c) - \gamma^2(a + c) \\
A_{11,3} &= \alpha^2(a^2 - c^2) - \eta^2 \\
A_{11,4} &= -A_{11,2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{12,1} &= -2\alpha b(a - c) \\
A_{12,2} &= -2b\gamma^2 \\
A_{12,3} &= -A_{12,1} \\
A_{12,4} &= 2b\eta^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{13,2} &= 2(a + c + 2b)[- \alpha^2(a^2 - c^2) + 2\alpha^2 b(a - c) + \gamma^2] \\
A_{13,4} &= 2(a + c + 2b)[\alpha^2(a^2 - c^2) - 2\alpha^2 b(a - c) - \eta^2]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{21,1} &= A_{12,1} \\
A_{21,2} &= \alpha A_{12,2} \\
A_{21,3} &= -A_{12,1} \\
A_{21,4} &= \alpha A_{12,4}
\end{aligned}$$

$$A_{22,1} = a^2 - c^2 - \gamma^2$$

$$A_{22,2} = \alpha(a+c)(a^2 - c^2) - 4\alpha b^2(a-c) - \alpha\gamma^2(a+c)$$

$$A_{22,3} = a^2 - c^2 - \eta^2$$

$$A_{22,4} = -A_{22,2}$$

$$A_{23,2} = \frac{\alpha(a+c+2b)[-(a^2 - c^2) + 2b(a-c) + \gamma^2]}{2}$$

$$A_{23,4} = \frac{\alpha(a+c+2b)[(a^2 - c^2) - 2b(a-c) - \eta^2]}{2}$$

$$D_{1,1} = \alpha^2(a^2 - c^2) + 2\alpha b(a-c) - \gamma^2$$

$$D_{1,2} = \alpha^2(a-c)[4b^2 - (a+c)^2] + \gamma^2(a+c-2b)$$

$$D_{1,3} = -\alpha^2(a^2 - c^2) - 2\alpha b(a-c) + \eta^2$$

$$D_{1,4} = \alpha^2(a-c)[(a+c)^2 - 4b^2] + \eta^2(2b-a-c)$$

$$D_{2,1} = \gamma^2 - (a^2 - c^2) - 2\alpha b(a-c)$$

$$D_{2,2} = \alpha(a-c)[(a+c)^2 - 4b^2] + \alpha\gamma^2(2b-a-c)$$

$$D_{2,3} = a^2 - c^2 + 2\alpha b(a-c) - \eta^2$$

$$D_{2,4} = \alpha(a-c)[4b^2 - (a+c)^2] + \alpha\eta^2(a+c-2b)$$

Avec

$$\gamma^2 = \frac{(a^2 - c^2)(1 + \alpha^2) + \sqrt{(a^2 - c^2)^2(\alpha^2 - 1)^2 + 16\alpha^2 b^2(a^2 - c^2)^2}}{2}$$

$$\eta^2 = \frac{(a^2 - c^2)(1 + \alpha^2) - \sqrt{(a^2 - c^2)^2(\alpha^2 - 1)^2 + 16\alpha^2 b^2(a^2 - c^2)^2}}{2}$$

A noter que le système d'équations de Eslami-nejad et Bernier (2011) est lié au nouveau système d'équations (A.4) par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} C_1 &= D_1 - A_{13}\theta_b \\ C_2 &= D_2 - A_{23}\theta_b \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

Le système d'équations (A.4) permet d'écrire les deux équations suivantes :

$$\begin{aligned} A_{11}(2T_{out-3} - T_{in-1} - T_{in-2}) + A_{12}(2T_{out-4} - T_{in-1} - T_{in-2}) + A_{13}(2T_b - T_{in-1} - T_{in-2}) = \\ D_1(T_{in-1} - T_{in-2}) \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

$$\begin{aligned} A_{21}(2T_{out-3} - T_{in-1} - T_{in-2}) + A_{22}(2T_{out-4} - T_{in-1} - T_{in-2}) + A_{23}(2T_b - T_{in-1} - T_{in-2}) = \\ D_2(T_{in-1} - T_{in-2}) \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Le bilan d'énergie sur le puits permet d'exprimer le taux d'injection de chaleur par unité de longueur, Q , en fonction des températures à l'entrée et à la sortie de l'échangeur géothermique :

$$Q = \frac{(\dot{m} C_f)_{1-3}}{H} (T_{in-1} - T_{out-3}) + \frac{(\dot{m} C_f)_{2-4}}{H} (T_{in-1} - T_{out-3}) \quad (\text{A.8})$$

La température à la paroi du puits est calculée grâce à la superposition temporelle des charges. En dissociant le taux d'injection de chaleur du dernier pas de temps, $Q(t_n)$, des taux d'injection des pas de temps précédents, il est possible d'exprimer la température à la paroi du puits de la façon suivante :

$$T_b(t_n) = T_g + \Delta T^*(t_n) + Q(t_n) h(t_n - t_{n-1}) \quad (\text{A.9})$$

Où h est le facteur de réponse, T_g est la température du sol non perturbée.

Et

$$\Delta T^*(t_n) = \sum_{i=1}^{n-1} [Q(t_i) - Q(t_{i-1})] h(t_n - t_i) - Q(t_{n-1}) h(t_n - t_{n-1}) \quad (\text{A.10})$$

Finalement le problème se réécrit en un système matriciel à quatre équations ((A.6), (A.7), (A.8) et (A.9)) à quatre inconnus (T_{out-3} , T_{out-4} , T_b , Q) :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 2A_{11} & 2A_{12} & 2A_{13} & 0 \\ 2A_{21} & 2A_{22} & 2A_{23} & 0 \\ (\dot{m} C_f)_{1-3} & (\dot{m} C_f)_{2-4} & 0 & 1 \\ \frac{H}{H} & \frac{H}{H} & 1 & -h \\ 0 & 0 & 1 & -h \end{bmatrix}}_A = \begin{bmatrix} T_{out-3} \\ T_{out-4} \\ T_b \\ Q \\ T_b^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \\ T_b^* \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Où

$$U = (A_{11} + A_{12} + A_{13} + D_1)T_{in-1} + (A_{11} + A_{12} + A_{13} - D_1)T_{in-2}$$

$$V = (A_{21} + A_{22} + A_{23} + D_2)T_{in-1} + (A_{21} + A_{22} + A_{23} - D_2)T_{in-2}$$

$$W = \frac{(\dot{m} C_f)_{1-3}}{H} T_{in-1} + \frac{(\dot{m} C_f)_{2-4}}{H} T_{in-2}$$

$$T_b^* = T_g + \Delta T^*$$

Le système d'équations (A.11) permet d'établir les expressions analytiques suivantes :

$$\begin{aligned} T_{out-3} &= \frac{\frac{2h(\dot{m} C_f)_{2-4}}{H}(UA_{23} - VA_{13}) + 2(VA_{12} - UA_{22}) + 4hW(A_{13}A_{22} - A_{12}A_{23})}{\text{Det}(A)} \\ T_{out-4} &= \frac{\frac{2h(\dot{m} C_f)_{1-3}}{H}(VA_{13} - UA_{23}) + 2(UA_{21} - VA_{11}) + 4hW(A_{11}A_{23} - A_{13}A_{21})}{\text{Det}(A)} \\ T_b &= \frac{\frac{2h(\dot{m} C_f)_{1-3}}{H}(UA_{22} - VA_{12}) + \frac{2h(\dot{m} C_f)_{2-4}}{H}(VA_{11} - UA_{21}) + 4T_b^*(A_{12}A_{21} - A_{11}A_{22})}{\text{Det}(A)} \\ Q &= \frac{\frac{4T_b^*(\dot{m} C_f)_{1-3}}{H}(A_{12}A_{23} - A_{13}A_{22}) + \frac{4T_b^*(\dot{m} C_f)_{2-4}}{H}(A_{13}A_{21} - A_{11}A_{23}) + 4W(A_{12}A_{21} - A_{11}A_{22})}{\text{Det}(A)} \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Avec

$$\text{Det}(A) = \frac{4h(\dot{m} C_f)_{1-3}}{H}(A_{13}A_{22} - A_{12}A_{23}) + \frac{4h(\dot{m} C_f)_{2-4}}{H}(A_{11}A_{23} - A_{13}A_{21}) + 4(A_{12}A_{21} - A_{11}A_{22})$$