

Titre: L'influence des bâtiments et de l'inclinaison des forages sur le
Title: dimensionnement des systèmes géothermiques

Auteur: Maude Giordanengo
Author:

Date: 2010

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Giordanengo, M. (2010). L'influence des bâtiments et de l'inclinaison des forages sur le dimensionnement des systèmes géothermiques [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/316/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/316/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Denis Marcotte
Advisors:

Programme: Génie minéral
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

L'INFLUENCE DES BÂTIMENTS ET DE L'INCLINAISON DES FORAGES SUR LE
DIMENSIONNEMENT DES SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES

MAUDE GIORDANENGO
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)
AVRIL 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

L'INFLUENCE DES BÂTIMENTS ET DE L'INCLINAISON DES FORAGES SUR LE
DIMENSIONNEMENT DES SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES

présenté par : GIORDANENGO Maude
en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BERNIER Michel, Ph.D., président

M. MARCOTTE Denis, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. PASQUIER Philippe, Ph.D., membre

DÉDICACE

«*Si nous savions ce que nous faisons,
cela ne s'appellerait pas de la recherche*»

Albert Einstein

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le Pr. Denis Marcotte pour sa générosité, son dévouement, sa polyvalence et son savoir, son encadrement, mais surtout pour son sens de l'humour et ses encouragements.

Merci également à Philippe Pasquier pour m'avoir fait connaître Comsol sous un oeil différent, mais surtout pour les beaux contrats de géothermie et un dynamisme pas piqué des vers.

Je remercie chaleureusement Pierre Groleau et Marie Gauthier pour leur sens de l'humour incroyable. Merci Pierre et Marie Curie !

Un gros merci à Martine Rivest pour m'avoir fait apprécier Latex, Matlab et Comsol. Sans toi, j'aurais mangé mes bas ! Il ne faut pas oublier mes collègues de bureau : Pier-Olivier Fontaine, Camille Dubreuil et Véronique Bouzaglou.

Je remercie également ma famille pour leurs encouragements et leur compréhension, mais surtout d'avoir accepté que je ne réponde pas à la question : Comment va ta maîtrise ?

Jérôme Lapointe, merci de m'avoir tant aidé que ce soit du point de vue académique ou psychologique. Merci infiniment. Merci de m'avoir fait découvrir *PhD comics*.

La réalisation de ce projet a été rendue possible grâce au soutien financier octroyé par le CRSNG, le FQRNT et Golder Associés (Bourse BMP).

RÉSUMÉ

Pour les nouvelles constructions, il arrive souvent que les forages géothermiques soient positionnés sous la dalle du bâtiment plutôt qu'à l'extérieur. Ceci peut être dû à un manque d'espace, par exemple en milieu urbain, ou à un simple choix de conception. Présentement, les modèles analytiques disponibles ne tiennent pas compte de l'interaction thermique entre le bâtiment et le sol. Cette simplification présume que le système géothermique est situé à l'extérieur du bâtiment, ce qui peut engendrer des failles lors du dimensionnement du système. La perturbation thermique que crée un bâtiment augmente la température moyenne du sol sous le bâtiment. Notre hypothèse de travail est la suivante : lorsque le système géothermique est en mode de chauffage dominant, un effet positif de la dalle sera enregistré et inversement lorsque le système est en mode dominant de climatisation, un effet négatif sera enregistré.

L'approche proposée se base sur le principe de superposition dans l'espace. Il faut tout d'abord modéliser par éléments finis (FEM) un bâtiment dans le sol et par l'équation de chaleur quantifier le transfert de chaleur d'un bâtiment 3D au sol. Par la suite, le modèle thermique de bâtiment est superposé à la réponse analytique d'un champ de puits géothermiques. Ceci pose donc l'hypothèse que la température dans le sol s'additionne en tous points. Il est intéressant d'observer l'influence de facteurs tels que la taille du bâtiment, la présence d'isolation entre la dalle et les forages, le climat et l'inclinaison des forages sur la température du sol. Les travaux visent à tester l'approche sur des cas synthétiques, mais aussi à l'aide de données réelles. Le modèle de bâtiment se limite au régime permanent, tandis que la réponse analytique du champ de puits est en régime transitoire.

Cette étude démontre que l'effet du bâtiment peut être soit favorable ou défavorable selon le profil de charges au sol. Si celui-ci est déséquilibré en climatisation, son effet est négatif et inversement, si les charges au sol sont dominantes en chauffage, son effet est positif. Lorsqu'il y a un débordement en faveur de la climatisation la température du fluide à l'entrée (EWT) de la pompe à chaleur (PAC) augmente au fil du temps et tend à atteindre la limite supérieure de la PAC. L'ajout de la dalle dans ce cas ne fera qu'augmenter le EWT et favorisera une perte d'autonomie du système. Cependant, lorsque la charge en chauffage est dominante, la température du fluide à l'entrée de la pompe à chaleur suit la tendance inverse et diminue dans le temps. La limite inférieure de la PAC peut donc être atteinte. Puisque l'effet du bâtiment augmente le EWT, celui-ci est bénéfique et augmente l'autonomie du système. Si la courbe EWT n'atteint aucune des deux limites de la PAC, le système est peut être

sur-dimensionné et des coûts de construction inutiles sont engendrés. La longueur des puits est un facteur prépondérant sur la quantité de chaleur supplémentaire pouvant être gagnée. Pour une même dimension de bâtiment, plus le puits est court, plus l'effet du bâtiment est grand. Pour des forages de 50 mètres situés sous le bâtiment, on peut gagner 1.3 °C sur la température moyenne du sol au centre du bâtiment. La disposition des puits sous le bâtiment permet d'aller chercher une autonomie supplémentaire maximale de l'ordre de 12% en mode chauffage dominant.

Un deuxième facteur considéré dans cette étude est l'inclinaison des puits géothermiques. La comparaison des performances entre des puits verticaux ou légèrement inclinés révèle un effet bénéfique de l'inclinaison des puits aussi bien en mode chauffage dominant qu'en mode climatisation dominant. La diminution des interactions entre les puits expliquant ce résultat. Les gains de performance obtenus sont de l'ordre de grandeur de ceux procurés par le bâtiment en mode chauffage dominant. La combinaison des deux stratégies procure alors un gain d'autonomie maximale de l'ordre de 25% pour des forages courts (50 m) légèrement inclinés. Toutefois, en mode climatisation dominant, l'inclinaison des puits demeure bénéfique alors que l'effet du bâtiment est nuisible à la performance du système. L'effet net des deux facteurs varie selon les caractéristiques du profil de charge.

Puisqu'au Québec on est davantage en mode chauffage dominant, on peut affirmer qu'il est généralement avantageux d'incliner les forages d'une part, et d'autre part, de les positionner sous le bâtiment.

ABSTRACT

In new constructions, it often happens that Ground-Loop Heat Exchangers (GLHE) are positioned beneath the building foundation rather than outside. This can be due to a lack of space, for example in urban zones, or a simple choice of conception. At present, the available analytical models do not account for the thermal interaction between the building and the ground. This simplification means that we consider the geothermal system to be located outside of the building, what might bring errors for the sizing of the system. The thermal disturbance created by the building increases the average temperature of the ground beneath it. Our assumption is the following: when the geothermal system is operating in dominant heating mode, the effect of heat transferred from the building will be positive; it will be negative when operating in the dominant cooling mode.

The proposed approach is based on the superposition principle in space. It is necessary to begin with a finite element model (FEM) of a building into the ground and by applying the heat equation we quantify the heat transfer of a 3D building into the ground. Afterward, the building thermal model is superposed with the analytical answer of a GLHE. We assume the temperature variations obtained from two models can be added everywhere. It is interesting to observe that factors such as the size of the building, the presence of insulation between the slab and the GLHE, the climate and the inclination of the boreholes interfere with the ground temperature. This work aims at testing the approach on synthetic cases, but also by means of real data. The building model is in steady state, whereas the ground analytical response is in transient state.

This study demonstrates that the effect of the building can be favourable or unfavourable according to the heat load profile to the ground. If it is unbalanced in cooling, the effect is negative whereas if the heat loads to the ground are dominant in heating, its effect is positive. When there is unbalanced loads in cooling, the temperature of the fluid entering the heat pump (EWT) increases in time and aims to reach the superior limit of the heat pump. The addition of the heat generated by the building in that case will increase EWT and will induce a loss of autonomy of the system. However, when the heat loads to the ground are heating dominant, the temperature of the fluid entering the heat pump follows the inverse tendency and decreases in time. The lower limit of the heat pump can be reached. Because the effect of the building is increasing the EWT, it is worthwhile for the autonomy of the system. If the EWT does not reach both limits of the heat pump, the system can be oversized and useless

costs would be involved. The length of boreholes is an important factor on the quantity of additional heat which can be gained. For the same dimension of building, the shorter the borehole, the more the effect of the building is important. For 50 meter boreholes positioned beneath the building, we can gain 1.3 °C on the average ground temperature in the center of the building. In the tested synthetic cases, the arrangement of boreholes beneath the building allows a 12% maximum additional rise of autonomy in a heating dominant system.

The second factor considered in this study is the inclination of the boreholes. The comparison of the performances between vertical or slightly tilted boreholes reveals a beneficial effect of the inclination of borehole as well in heating dominant mode than in cooling dominant mode. The decrease of the interactions between boreholes explains this result. The gains of performance are of the order of those obtained by the building in heating dominant mode. The combination of both strategies leads to a 25% maximum rise of autonomy for short borehole (50 m) slightly tilted. However, in cooling dominant mode, the inclination of boreholes remains beneficial while the effect of the building is disadvantageous to the performance of the system. The net effect of both factors varies according to the characteristics of the load profile.

In Quebec, as heating mode is usually dominant, we can assume that the inclination of borehole as well as the effect of the building are worthwhile to be considered in the sizing of GLHE.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xvii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	1
1.2 Objectif de l'étude	2
1.3 Plan de travail	2
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Modèles de calcul de la température du sol des systèmes géothermiques	3
2.1.1 Source linéique infinie	3
2.1.2 Source cylindrique infinie	5
2.1.3 Commentaires sur les méthodes SLI et SCI	7
2.1.4 Méthodes approximatives	7
2.1.5 Source linéique finie	8
2.1.6 Inclinaison des forages	10
2.2 Principe de superposition	11
2.3 Écoulement de l'eau	13
2.4 Fluctuation de température en surface	14
2.5 Transfert de chaleur d'un bâtiment au sol	15
2.6 Résumé	16

CHAPITRE 3 THÉORIE	17
3.1 Modèle thermique d'un bâtiment	17
3.1.1 Confort thermique	17
3.1.2 Principe d'évaluation des charges	18
3.2 Équation de conduction de Fourier	20
3.3 Variation de la température en surface du sol	22
3.4 Types de fondation	23
3.5 Transfert de chaleur d'un bâtiment au sol	24
3.5.1 Solution stationnaire - cas 2D	25
3.5.2 Solution stationnaire - cas 3D	26
3.6 Estimation de la température sous une dalle de béton	28
3.6.1 Structure de la fondation	29
3.6.2 Méthode d'estimation	29
3.7 Inclinaison des forages	31
3.8 Dimensionnement d'un système géothermique	33
3.9 Résumé	37
CHAPITRE 4 Méthodologie	38
4.1 Approche proposée	38
4.1.1 Modélisation numérique par éléments finis	39
4.1.2 Réponse analytique d'un champ de puits géothermique	40
CHAPITRE 5 Étude de cas synthétique	41
5.1 Modélisation d'un bâtiment en 2D	41
5.1.1 Propriétés thermiques et conditions frontières	42
5.1.2 Résultats	42
5.1.3 Comparaison au modèle analytique stationnaire	43
5.2 Condition de température variable en surface du sol	44
5.2.1 Propriétés thermiques et conditions frontières	45
5.2.2 Cas 1. Température constante	45
5.2.3 Cas 2. Fluctuation de la température	46
5.2.4 Discussion	48
5.2.5 Température moyenne le long d'un puits	49
5.3 Modèle 3D	50
5.3.1 Description du modèle numérique 3D	51
5.3.2 Propriétés thermiques et conditions frontières	51
5.3.3 Résultats	52

5.4 Dimensionnement - Puits verticaux	54
5.4.1 Description du modèle 3D	54
5.4.2 Cas 1. Sans bâtiment	55
5.4.3 Cas 2. Avec bâtiment	58
5.4.4 Discussion	59
5.5 Dimensionnement - Puits inclinés	61
5.5.1 Description du modèle 3D	61
5.5.2 Cas 1. Sans bâtiment	62
5.5.3 Cas 2. Avec bâtiment	62
5.5.4 Discussion	64
5.6 Effet de l'implantation des puits en profondeur sur le dimensionnement des systèmes géothermiques	64
5.7 Effet du système géothermique sur la température du sol sous la fondation . .	65
5.8 Résumé	67
 CHAPITRE 6 Étude de cas - Immeuble à condos	71
6.1 Description du modèle 3D	72
6.1.1 Cas 1. Charges portées au sol déséquilibrées en mode climatisation . .	74
6.1.2 Cas 2. Charges portées au sol déséquilibrées en mode chauffage . . .	77
6.2 Discussion	81
 CHAPITRE 7 Discussion	84
 CHAPITRE 8 CONCLUSION	88
 RÉFÉRENCES	90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1	Pourcentage minimal de la charge fournie en hiver après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque le chauffage domine pour les différentes options	69
Tableau 5.2	Pourcentage moyen de la charge fournie en hiver après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque le chauffage domine pour les différentes options	69
Tableau 5.3	Pourcentage minimal de la charge fournie en été après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque la climatisation domine pour les différentes options	70
Tableau 5.4	Pourcentage moyen de la charge fournie en été après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque la climatisation domine pour les différentes options	70
Tableau 6.1	Pourcentage minimal de la climatisation fournie par les différentes options lorsque la climatisation domine pour le cas réel pour les différentes options	82
Tableau 6.2	Pourcentage moyen de la charge fournie en été après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque la climatisation domine pour les différentes options	83
Tableau 6.3	Pourcentage minimal de la charge fournie en hiver après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque le chauffage domine pour les différentes options	83
Tableau 6.4	Pourcentage moyen de la charge fournie en hiver après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque le chauffage domine pour les différentes options	83

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Géométrie du modèle ligne source infinie	4
Figure 2.2	Coupe en plan de la géométrie du modèle de la source cylindrique infinie	6
Figure 2.3	Comparaison imagée de la distribution de température en fonction de la distance du puits entre deux configurations différentes pour la SCI .	8
Figure 2.4	Exemple du principe de superposition temporelle pour une charge variable durant 6 heures	11
Figure 3.1	Charge synthétique non-équilibrée en mode chauffage	19
Figure 3.2	Élément d'un corps	20
Figure 3.3	Types de fondations : a) dalle reposant directement sur le sol, b) dalle posée dans le sol, c) galerie	23
Figure 3.4	Distribution de la température en surface ($z=0m$) pour le modèle 2D .	26
Figure 3.5	Géométrie de la dalle ($z=0m$) pour le modèle 3D	27
Figure 3.6	Structure sous la dalle de béton	29
Figure 3.7	Distribution de la température sous la dalle de béton	31
Figure 3.8	Modèle des puits inclinés	32
Figure 3.9	Points représentatifs sur la plan orthogonal du puits	34
Figure 3.10	Calcul de la température à la paroi du puits 1	35
Figure 4.1	Schéma explicatif de l'approche proposée	39
Figure 5.1	Modèle 2D de bâtiment à la surface du sol	41
Figure 5.2	Distribution de température dans le bloc de sol à l'état stationnaire (zoom sur les 60 premiers mètres)	43
Figure 5.3	Température moyenne sur 150 m en dessous de la dalle de béton selon x	43
Figure 5.4	Vecteurs proportionnels du flux de chaleur en W/m^2 (petite flèche : 0.135 W/m^2 , grande flèche : 0.670 W/m^2)	44
Figure 5.5	Profils de température sous la dalle de béton en fonction de la profondeur à différentes positions sous la dalle avec une condition de température constante en surface du sol ($t=87\ 600$ heures)	46
Figure 5.6	Modèle basé à partir des données horaires de température de 1996 . . .	47
Figure 5.7	Profils de température sous la dalle de béton en fonction de la profondeur à différentes positions sous la dalle avec une condition de température variable en surface du sol ($t_{\text{hiver}} = 87\ 600$ heures, $t_{\text{été}} = 83\ 280$ heures)	48

Figure 5.8	Comparaison des profils de température sous la dalle de béton en fonction de la profondeur à différentes positions sous la dalle et de la condition de température en surface du sol ($t_{\text{hiver}} = 87\ 600$ heures)	49
Figure 5.9	Variation de la température moyenne le long d'un puits selon sa longueur en incluant les variations saisonnières et distribution de température au centre de la dalle	50
Figure 5.10	Effet de la dalle sur la température moyenne du puits pour différents temps	50
Figure 5.11	Modèle 3D de bâtiment avec dalle dans le sol	52
Figure 5.12	Distribution de température dans le sol provenant du modèle 3D en régime stationnaire	53
Figure 5.13	Température moyenne intégrée jusqu'à la profondeur indiquée en abscisse à la verticale du centre de la dalle (-) et moyenne dans le cube sous la dalle (-)	53
Figure 5.14	COP en climatisation et en chauffage	54
Figure 5.15	Position des puits	55
Figure 5.16	Cas 1a. Profil de charges transmises au sol déséquilibrées en mode chauffage par puits	56
Figure 5.17	Cas 1a. Sans bâtiment pour des puits verticaux (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits	57
Figure 5.18	Cas 1b. Profil de charges transmises au sol déséquilibrées en mode climatisation par puits	58
Figure 5.19	Cas 1b. Sans bâtiment pour des puits verticaux (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits	59
Figure 5.20	Cas 2. Avec bâtiment pour des puits verticaux (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits	60
Figure 5.21	Cas 2. Avec bâtiment pour des puits verticaux (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits	61
Figure 5.22	Cas 1a. Sans bâtiment pour des puits inclinés (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits	63

Figure 5.23	Cas 1b. Sans bâtiment pour des puits inclinés (a) Température d'entrée à la PAC, (b) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits	64
Figure 5.24	Cas 2a. Avec bâtiment pour des puits inclinés (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits	65
Figure 5.25	Cas 2b. Avec bâtiment pour des puits inclinés (a) Température d'entrée à la PAC, (b) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits	66
Figure 5.26	Sans bâtiment pour des puits verticaux situés à 3 m de prodondeur (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie	67
Figure 5.27	Sans bâtiment pour des puits inclinés situés à 3 m de prodondeur (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie	68
Figure 5.28	Distribution de température le long d'un puits	69
Figure 6.1	Charges du bâtiment	71
Figure 6.2	Champs de puits d'un cas réel	72
Figure 6.3	Distribution de température dans le bloc de sol pour le cas réel	73
Figure 6.4	Cas1. Charges portées au sol par puits pour le cas réel	74
Figure 6.5	Cas 1a. Sans bâtiment avec des puits verticaux pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie	75
Figure 6.6	Cas 1a. Sans bâtiment avec des puits inclinés pour le cas réel (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie	76
Figure 6.7	Cas 1b. Avec bâtiment avec des puits verticaux pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie	76
Figure 6.8	Cas 1b. Avec bâtiment avec des puits inclinés pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie	77
Figure 6.9	Cas 2. Charges du bâtiment pour le cas réel	78
Figure 6.10	Cas 2. Charges portées au sol pour le cas réel	78

Figure 6.11	Cas 2a. Sans bâtiment avec des puits verticaux pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie	79
Figure 6.12	Cas 2a. Sans bâtiment avec des puits inclinés pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie	80
Figure 6.13	Cas 2b. Avec bâtiment avec des puits verticaux pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie	81
Figure 6.14	Cas 2b. Avec bâtiment avec des puits inclinés pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie	82

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

SLI	Source linéique infinie
SCI	Source cylindrique infinie
SLF	Source linéique finie
PAC	Pompe à chaleur
EWT	Température d'entrée à la PAC (°C)
FFT	Transformée de Fourier rapide
COP	Coefficient de performance de la PAC
α	Diffusivité thermique du sol (m ² /s)
β	Variable d'intégration (sans unité)
ω	Fréquence angulaire (1/s)
Φ	L'intégrale du flux (W/m en 2D et W en 3D)
$erfc(x)$	Fonction d'erreur complémentaire
A, B, C, D	Paramètres de la charge synthétique (kW)
F_0	Nombre de Fourier (°C/s)
H	Longueur du puits (m)
Q, q	Taux de transfert de chaleur (W/m)
$Q_{sol}(t)$	Charges portées au sol (W)
$Q(t)$	Charges du bâtiment (W)
k	Conductivité thermique du sol (W/m °C)
r	Distance à partir du centre du puits (m)
r_b	Rayon du puits (m)
t	Temps (s)
T_s, T_g	Température du sol non-perturbé (°C)
T_m	Température au mur du puits (°C)
$\Delta T_m(t)$	Variation de température au mur du puits à un temps t (°C)
T	Température du sol à une distance r_b du puits (°C)
ΔT	Variation de température du sol à un temps t et distance r du puits (°C)
$T(x, 0)$	Distribution de la température à la surface en 2D (°C)
$T(x, y)$	Distribution de la température à la surface en 3D (°C)
T_1	Température de la dalle (°C)
T_2	Température du sol en surface (°C)
T_{moy}	Température moyenne sous la dalle de béton (°C)

T_f	Température du fluide (°C)
R_b	Résistance thermique équivalente du puits (°Cm/W)
c_f	Capacité calorifique du fluide (J/kg°C)
m_f	Débit du fluide (kg/s)
x,y,z	Coordonnées spatiales (m)

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Problématique

La géothermie est d'abord et avant tout une mesure très efficace d'économie d'énergie qui s'inscrit parfaitement dans des objectifs de développement durable. En plus d'être une énergie renouvelable, la géothermie permet de remplacer les agents énergétiques fossiles sans émettre de polluants dans l'atmosphère. Suite à la croissance des coûts d'énergie, les systèmes géothermiques gagnent en popularité au Québec et au Canada. Dans les régions comme le Québec, où les températures du sol sont faibles (environ 8 °C), les systèmes géothermiques à très basse énergie (TBT) sont utilisés. Il existe deux types de systèmes à très basse énergie : le système fermé (boucle en U : horizontale ou verticale) et le système ouvert. Le système le plus utilisé (~ 85%) est un système fermé à boucle en U dans des forages verticaux. En mode chauffage, puisque le sol ne contient pas beaucoup d'énergie (température du sol inférieure à la température intérieure du bâtiment), la quantité de chaleur puisée dans le sol n'est pas suffisante pour combler les besoins du bâtiment. Un système de pompe à chaleur (PAC) est donc utilisé afin de hausser la température du fluide, permettant ainsi de garder une température intérieure confortable tout au long de l'année. Le dimensionnement des systèmes géothermiques est important puisqu'un système sous-dimensionné amènera des températures d'entrée à la PAC inférieure (supérieure) en hiver (été) (Bernier, 2000). Pour un système sur-dimensionné, le problème est d'ordre monétaire puisque des coûts de construction seront engendrés inutilement. De plus, la période de retour sur investissement d'un système géothermique au Québec se situe généralement entre huit et quinze ans, d'où l'importance d'un bon dimensionnement. ASHRAE (1999) et Kavanaugh et Rafferty (1997) fournissent une méthode approximative de dimensionnement des systèmes géothermiques à l'aide du modèle cylindre source. Il est important de mentionner que les méthodes approximatives considèrent qu'il n'y a aucun écoulement souterrain et que les puits géothermiques sont verticaux.

Pour les nouvelles constructions, il arrive souvent que les forages géothermiques soient positionnés sous la dalle du bâtiment plutôt qu'à l'extérieur. Ceci peut être dû à un manque d'espace, par exemple en milieu urbain, ou un simple choix de conception. Présentement, les modèles analytiques disponibles ne tiennent pas compte de l'interaction thermique entre le bâtiment et le sol. Cette simplification revient à considérer le système géothermique installé

à l'extérieur du bâtiment, ce qui peut engendrer des failles lors du dimensionnement du système. La perturbation thermique que crée un bâtiment augmente la température moyenne du sol sous le bâtiment. Il y a des raisons de croire que lorsque le système géothermique est en mode chauffage dominant, cet effet de la dalle sera positif et inversement pour le mode climatisation. L'effet du bâtiment sera superposé à la réponse analytique d'un champ de puits géothermique. Ceci pose donc l'hypothèse que la température dans le sol s'additionne en tous points.

1.2 Objectif de l'étude

L'objectif du projet est de modéliser l'effet à long terme de la présence du bâtiment sur la température du fluide à l'entrée de la pompe à chaleur (EWT) lorsque le champ géothermique se trouve sous le bâtiment. On veut dans l'étude tenir compte de facteurs comme la taille du bâtiment par rapport au champ géothermique, la présence d'isolation entre la dalle et les forages, le climat et l'inclinaison des forages. Les travaux visent à tester l'approche sur des cas synthétiques, mais aussi à l'aide de données réelles. Le modèle de bâtiment se limite au régime permanent, tandis que la réponse analytique du champ de puits géothermiques est en régime transitoire.

1.3 Plan de travail

Le mémoire comprend huit chapitres. Le chapitre 2 passe en revue diverses méthodes de calculs de la température du sol des systèmes géothermiques. De plus, on discute brièvement du principe de superposition dans l'espace et dans le temps et des différents paramètres à inclure dans le modèle. Le chapitre 3 présente les notions théoriques de transfert de chaleur, de l'inclinaison des puits géothermiques et du dimensionnement de ceux-ci. Les aspects opérationnels de l'approche proposée sont détaillés au chapitre 4. Le chapitre 5 est dédié à l'application de la méthode sur des cas synthétiques d'un bâtiment 3D. Au chapitre 6, des données provenant d'un design d'un système géothermique d'un immeuble à condos sont utilisées pour tester la méthode sur des cas réels. Les résultats des cas synthétiques et réels sont discutés au chapitre 7. Finalement, le chapitre 8 conclut avec la synthèse des travaux effectués et les principales recommandations.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Les premiers modèles de transfert de chaleur appliqués à la géothermie puisent leurs fondements des modèles de la source linéique infinie et de la source cylindrique infinie. Les principaux modèles d'échangeur géothermique et le principe de superposition sont présentés à la section 2.1 et 2.2. Les sections 2.3 et 2.4 résument les études sur les effets de l'eau souterraine et de la fluctuation de la température en surface. Finalement, une revue de littérature sur le transfert de chaleur d'un bâtiment au sol est exposée à la section 2.5 et le contenu théorique est décrit au chapitre suivant.

2.1 Modèles de calcul de la température du sol des systèmes géothermiques

Les méthodes de calcul de la température du fluide pour les systèmes géothermiques à puits verticaux et inclinés sont basées sur les principes de Kelvin.

2.1.1 Source linéique infinie

Le concept de la source linéique infinie (SLI) a été énoncé par Lord Kelvin (Ingersoll *et al.*, 1954) en 1882. Ingersoll *et al.* (1954) et Carslaw et Jaeger (1959) utilisent le principe de Kelvin pour prédire la température autour d'une source linéique infinie. La figure 2.1 montre la géométrie de la ligne source infinie. Trois hypothèses sont à la base du modèle analytique. Premièrement, on suppose que la ligne source est la sommation d'une série de points source le long d'une ligne droite infinie. Deuxièmement, chaque point source possède une quantité de chaleur Qdz et, finalement, le flux de chaleur est radial à la source de chaleur.

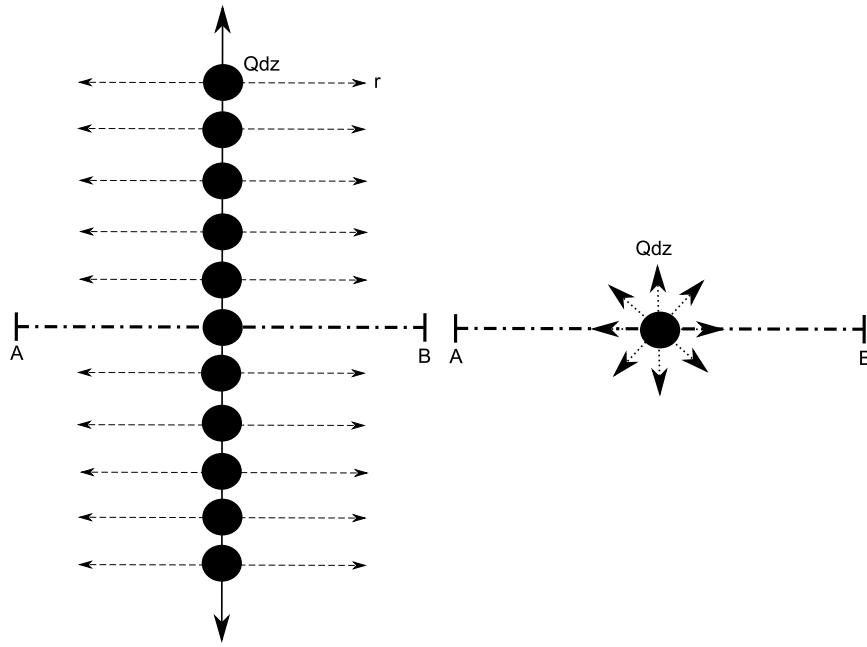


Figure 2.1 Géométrie du modèle ligne source infinie

Selon le principe de la SLI de Ingersoll *et al.* (1954), la différence de température entre le sol non-perturbé et la température située à une distance r du centre du puits géothermique est donnée par :

$$\Delta T = T_s - T = \frac{Q}{2\pi k} \int_{\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad (2.1)$$

où

T est la température du sol à une distance r du centre du puits (°C)

T_s est la température du sol non-perturbé (°C)

Q est le taux de transfert de chaleur par unité de longueur de forage (W/m)

r est la distance à partir du centre du puits (m)

k est la conductivité thermique du sol (W/m °C)

α est la diffusivité thermique du sol (m²/s)

t est le temps (s)

β est une variable d'intégration

Par analogie, le concept de ligne source infinie peut être appliqué à la géothermie. Il suffit que les puits géothermiques soient assez profonds pour être considérés comme infinis et que le taux de transfert de chaleur soit constant sur toute la longueur du puits. Le critère de validité de la source linéaire infinie ($\alpha t / r_b^2 > 20$) est déterminé par rapport à l'équation de la source

cylindrique et correspond au domaine où l'erreur entre les deux modèles est de 2% et moins (Sheriff, 2007; Ingersoll *et al.*, 1954). Le rayon du puits est r_b . Ce critère indique que pour des temps trop courts et/ou un grand diamètre de puits, le modèle de source linéique infinie peut conduire à une différence de plus de 2% avec le modèle de source cylindrique infinie. Cependant après quelques heures d'opération (ϕ de 100 mm ou moins), la différence entre les solutions source linéique et source cylindrique devient négligeable. La méthode SLI peut s'appliquer pour des configurations différentes, c'est-à-dire pour un ou plusieurs puits, qu'ils soient verticaux ou horizontaux. Lorsqu'il y a plusieurs puits, le principe de superposition doit être utilisé (voir section 2.2).

Voici les principaux inconvénients de la méthode :

1. Les effets axiaux aux extrémités des puits sont négligés. Le flux de chaleur est donc radial et cette hypothèse est valable pour des temps courts. Lorsque les simulations sont sur une longue période, les résultats sont moins précis surtout pour des puits peu profonds (Sheriff, 2007), car ceux-ci sont affectés par la surface et le terrain sous l'extrémité du forage.
2. Il est impossible qu'une ligne sans épaisseur puisse dégager (absorber) de la chaleur.
3. Puisque les erreurs deviennent petites pour des valeurs de $\alpha t/r_b^2 > 20$, le domaine de validité de la méthode commence à $t > 20r_b^2/\alpha$. Afin que le puits puisse être bien représenté par la source linéique infinie, son rayon doit être $r_b < \sqrt{\alpha t/20}$.

2.1.2 Source cylindrique infinie

La méthode de source cylindrique infinie (SCI) possède deux variantes : à température constante et à taux de transfert de chaleur constant à la surface du cylindre source. Dans le présent texte, la variante à température constante n'est pas présentée. La méthode de source cylindrique prédit la distribution de la température radiale autour d'une source cylindrique infinie située dans un milieu homogène. La quantité de chaleur puisée ou rejetée est constante sur toute la longueur du puits. Une vue en plan de la géométrie de la SCI est présentée à la figure 2.2. Carslaw et Jaeger (1959) et Ingersoll *et al.* (1954) ont introduit la méthode de source cylindrique.

• T_0

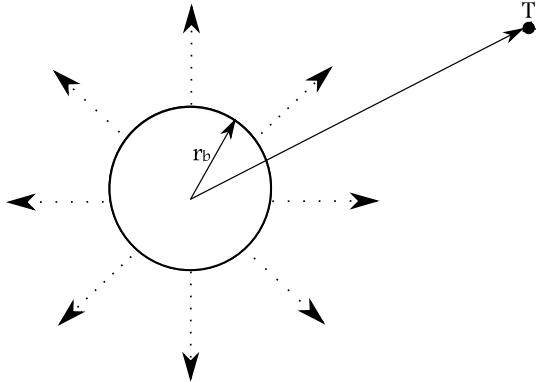


Figure 2.2 Coupe en plan de la géométrie du modèle de la source cylindrique infinie

La différence entre la température du sol non-perturbé et celle située à une distance r pour la source cylindrique est donnée par :

$$\Delta T = T_s - T = Q \frac{G(F_0, p)}{k} \quad (2.2)$$

où

T est la température du sol à une distance r du centre du puits (°C)

T_s est la température du sol non-perturbé (°C)

Q est le taux de transfert de chaleur par unité de longueur de puits (W/m)

r est la distance à partir du centre du puits (m)

k est la conductivité thermique du sol (W/m °C)

p est le rapport r/r_b entre le rayon où la température est calculée (r) et le rayon externe du puits (r_b)

F_0 est le nombre de Fourier ($4\alpha t/r_b^2$)

α est la diffusivité thermique du sol (m^2/s)

t est le temps (s)

r_b est le rayon du puits (m)

et

$$G(F_0, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{e^{-\beta^2 F_0} - 1}{J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)} [J_0(p\beta)Y_1(\beta) - J_1(\beta)Y_0(p\beta)] \frac{d\beta}{\beta^2} \quad (2.3)$$

avec

β est une variable d'intégration

J_0 et J_1 sont les fonctions de Bessel d'ordre 0 et 1

Y_0 et Y_1 sont les fonctions de Neumann d'ordre 0 et 1

Ce modèle analytique, quoique difficile à évaluer, permet de couvrir tous les cas possibles pour des puits infinis. Le terme $G(F_0, p)$ est pré-calculé pour différentes valeurs de p et F_0 et mis sous forme de tableau disponible dans Ingersoll *et al.* (1954) à la page 250. Pour des faibles valeurs du nombre de Fourier (F_0), c'est-à-dire pour des durées d'opération plus courtes et des diamètres de puits plus grands, cette méthode est reputée comme étant plus précise que la méthode de ligne source infinie. Toutefois, cette méthode néglige aussi la capacitance du matériau de remplissage du forage. Pour des temps très courts, on peut recourir à des modèles plus élaborés qui en tiennent compte (Lamarche et Beauchamp, 2007a; Yavuzturk et Spitler, 1999). Surtout, cette méthode néglige aussi l'effet axial en surface et en profondeur.

2.1.3 Commentaires sur les méthodes SLI et SCI

Les deux méthodes présentées précédemment ne considèrent pas la longueur du puits et négligent donc les effets axiaux. En revanche, le modèle de source cylindrique infini prend en compte la dimension du forage. Prenons comme exemple deux cas (A et B) dont les rayons du puits seraient respectivement R_a et $R_b = 2R_a$ et dont le point de mesure (point P) se situe à une distance R_b . Pour un critère de validité de $z_a = at/r_b^2 = 20$, donc $z_b = 5$ (Ingersoll *et al.*, 1954), les valeurs de température à une distance r_b du centre du puits sont différentes. La valeur associée au puits ayant le plus petit diamètre (A) est plus faible.

2.1.4 Méthodes approximatives

Des méthodes approximatives sont dérivées de la méthode de source linéique infinie. Toutefois celles-ci sont plus ou moins utiles puisque, de nos jours, les ordinateurs ont la capacité de résoudre les équations du modèle SLI discuté précédemment. Par exemple, la méthode de Hart et Couvillon (Hart et Couvillion, 1986) utilise le modèle de source linéique infinie et suppose qu'à une certaine distance du puits, appelée rayon infini, la température est constante et non-perturbée par celui-ci. Toutefois, le rayon infini dépend du temps, donc plus le système fonctionne longtemps, plus grand sera le rayon infini. Des techniques de superposition sont utilisées pour tenir compte de l'interaction entre les puits (voir section 2.2). Les méthodes approximatives sont peu utilisées en industrie. Cependant, elles peuvent être utiles pour vérifier les calculs.

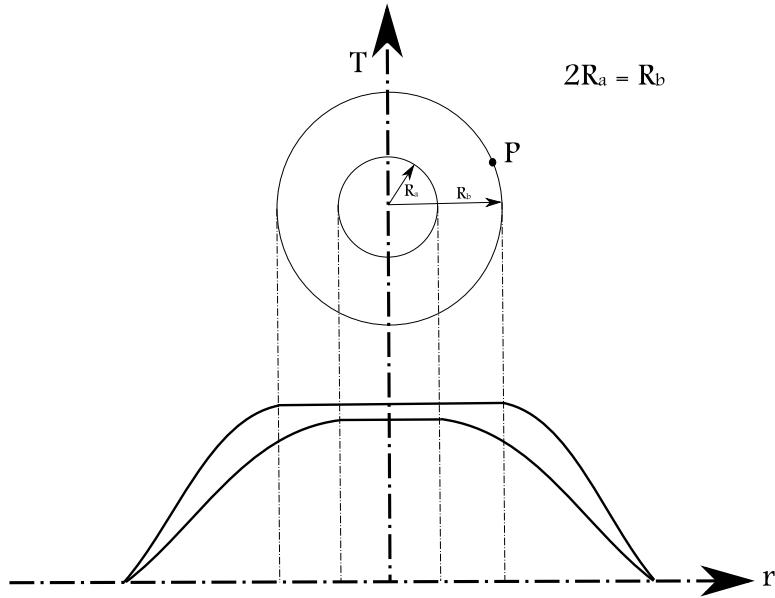


Figure 2.3 Comparaison imagée de la distribution de température en fonction de la distance du puits entre deux configurations différentes pour la SCI

2.1.5 Source linéique finie

En comparant le modèle de ligne source infinie et le modèle cylindre source au modèle de ligne source finie, Sheriff (2007) énonce que ces deux modèles ne sont plus valides à partir de $\alpha t/r^2 = 10^4$, soit cent quatre-vingt jours d'opération pour des paramètres standards ($k = 3,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, $r_b = 0,05 \text{ m}$, $\alpha = 1,62e-6 \text{ m}^2/\text{s}$, $H = 100 \text{ m}$) et un taux de transfert de chaleur constant. Avec ces paramètres, les effets axiaux deviennent importants à partir de cent quatre-vingt jours d'opération. Zeng (2002) introduit une solution analytique dérivée de la ligne source infinie dans un milieu semi-infini. Ce modèle est plus approprié que les modèles SLI et SCI puisque les systèmes géothermiques ont une longue durée d'opération. Le modèle de ligne source finie repose sur ces hypothèses :

1. Le sol est homogène et semi-infini et les propriétés thermodynamiques ne sont pas fonction de la température.
2. La température initiale du sol est uniforme.
3. La température à la surface reste toujours constante et égale à la température initiale du sol.
4. La dimension du puits est négligée et est approximée par le modèle de ligne source.
5. La capacité thermique du forage est négligée.
6. Le mouvement des eaux souterraines est négligé.

Afin d'imposer une température en surface toujours constante, une source miroir identique de charge opposée à la source linéique finie est utilisée. La partie miroir est appelée image. En intégrant les parties réelle et image, la différence de température entre le sol non-perturbé et la température à une distance r en régime transitoire est (Marcotte *et al.*, 2010; Sheriff, 2007; Zeng *et al.*, 2002) :

$$\Delta T(r, t, z) = \frac{q}{4\pi k} \int_0^H \left(\frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{d(h)}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{d(h)} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{d'(h)}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{d'(h)} \right) dh \quad (2.4)$$

où

$$d(h) = \sqrt{r^2 + (z - h)^2}$$

$$d'(h) = \sqrt{r^2 + (z + h)^2}$$

z est la profondeur du point de mesure (m)

T est la température du sol à une distance r du centre du puits (°C)

T_s est la température du sol non-perturbé (°C)

q est le taux de transfert de chaleur par unité de longueur (W/m)

r est la distance à partir du centre du puits (m)

k est la conductivité thermique du sol (W/m °C)

α est la diffusivité thermique du sol (m²/s)

t est le temps (s)

La partie de droite de l'équation représente la partie image de la ligne source finie et celle de gauche la partie réelle. Marcotte *et al.* (2010) montrent l'importance des effets axiaux en comparant le modèle de ligne source infinie avec le modèle de ligne source finie pour différents nombre de Fourier ($\alpha t/r^2$) et confirment que plus le nombre de Fourier est grand et plus les forages sont courts, plus les effets axiaux deviennent importants.

Le dimensionnement de puits géothermiques repose sur la température du fluide qui circule à l'intérieur des boucles. Pour ce faire, il faut déterminer la différence de température moyenne sur toute la longueur du puits, ce qui revient à intégrer l'équation 2.4 selon z . Lamarche et Beauchamp (2007b) proposent une façon plus rapide de calculer la différence de température moyenne sur toute la longueur du puits. Celle-ci est utilisée afin de réduire les temps de simulations dus à la double intégrale. À l'aide de manipulations mathématiques, l'équation 2.4 se simplifie et devient (Lamarche et Beauchamp, 2007b; Sheriff, 2007; Marcotte *et al.*, 2010) :

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{2\pi k} \left(\int_{\beta}^{\sqrt{\beta^2+1}} \frac{\operatorname{erfc}(\omega z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_A - \int_{\sqrt{\beta^2+1}}^{\sqrt{\beta^2+4}} \frac{\operatorname{erfc}(\omega z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_B \right) \quad (2.5)$$

où $\beta = r/H$, r est la distance radiale à partir du centre du puits, $\omega = \frac{H}{2\sqrt{\alpha t}}$ et D_A et D_B sont donnés par les équations 2.6 et 2.7 :

$$D_A = \sqrt{\beta^2 + 1} \operatorname{erfc}(\omega \sqrt{\beta^2 + 1}) - \beta \operatorname{erfc}(\omega \beta) - \left(\frac{e^{-\omega^2(\beta^2+1)} - e^{-\omega^2\beta^2}}{\omega \sqrt{\pi}} \right) \quad (2.6)$$

et

$$D_B = \sqrt{\beta^2 + 1} \operatorname{erfc}(\omega \sqrt{\beta^2 + 1}) - 0.5 \left(\beta \operatorname{erfc}(\omega \beta) + \sqrt{\beta^2 + 4} \operatorname{erfc}(\omega \sqrt{\beta^2 + 4}) \right) - \left(\frac{e^{-\omega^2(\beta^2+1)} - 0.5 (e^{-\omega^2\beta^2} + e^{-\omega^2(\beta^2+4)})}{\omega \sqrt{\pi}} \right) \quad (2.7)$$

2.1.6 Inclinaison des forages

Dans les travaux de grande envergure, comme les commerces, les hôpitaux, les immeubles et les institutions scolaires, l'installation de plusieurs puits est nécessaire. Puisque le manque d'espace est souvent une contrainte importante dans le dimensionnement des systèmes géothermiques, les puits sont peu espacés les uns des autres et des interactions thermiques sont susceptibles de se produire. Plus les puits sont rapprochés, plus l'interaction devient importante, nécessitant l'installation de puits plus profonds pour produire la même quantité d'énergie. Une solution à ce problème est de forer des puits inclinés. Bien qu'à la surface du sol les interactions soient importantes, les interactions moyennes peuvent être assez faibles et permettre de réduire considérablement la longueur des puits géothermiques (Marcotte et Pasquier, 2009). Il est possible, lorsque les interactions en surface causent des problèmes, d'isoler la partie supérieure des tuyaux. Cui *et al.* (2006) décrivent la variante où les forages sont inclinés. Leur modèle tire ses fondements de la théorie de la source linéique finie avec un puits image. Marcotte et Pasquier (2009) décrivent l'effet de positionner le sommet du puits à n'importe quelle profondeur. L'équation devient donc plus générale. Cette généralisation de l'équation de Cui *et al.* (2006) peut correspondre, par exemple, au cas où les tuyaux en surface doivent être isolés, au cas où les puits sont situés sous la fondation d'un immeuble ou au cas où il y a un remblai recouvrant le système géothermique. L'équation permet aussi de décrire le cas de tuyaux horizontaux.

2.2 Principe de superposition

Comme mentionné précédemment, le principe de superposition s'applique dans le cas où plusieurs puits sont essentiels. En fait, le principe de superposition est omniprésent dans toutes les étapes du dimensionnement des puits géothermiques. Dans cette section, le principe de superposition pour des charges multiples sera introduit. Celui-ci s'applique pour des charges multiples dans le temps et dans l'espace. La superposition temporelle impose aux charges variables dans le temps une disposition de type échelon. Ces échelons sont ensuite soustraits ou additionnés de manière à faire varier la charge dans le temps. À la figure 2.4 un schéma de charges variables dans le temps est illustré.

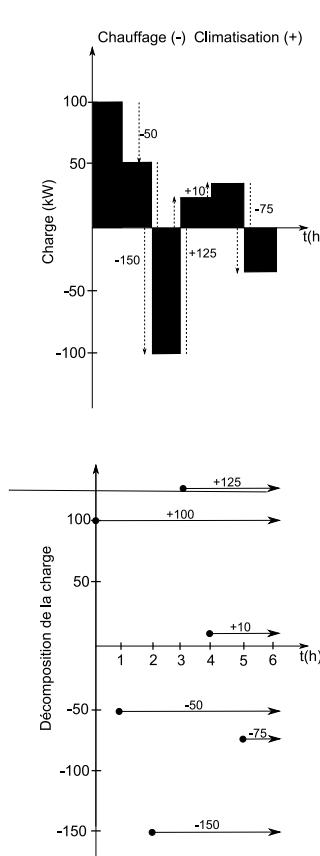


Figure 2.4 Exemple du principe de superposition temporelle pour une charge variable durant 6 heures

En supposant que le temps est discret puisque la charge est de type échelon pour un modèle de source linéaire infinie, le facteur de réponse thermique au temps t et à une distance r de la source est donnée par (Marcotte et Pasquier, 2008a; Lamarche et Beauchamp, 2007b) :

$$\Delta T(r, t) = \sum_{i, t_i \leq t} \frac{q_i}{4\pi k} \int_{r^2/4\alpha(t-t_i)}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2.8)$$

où

q_i est l'incrément de charge par unité de longueur entre deux échelons (W/m)

k est la conductivité thermique du sol (W/m °C)

r est la distance à partir du centre du puits (m)

k est la conductivité thermique du sol (W/m °C)

α est la diffusivité thermique du sol (m²/s)

t est le temps total de la période analysée (s)

t_i est le temps où la charge q_i est appliquée (s)

u est une variable d'intégration

avec

$$q_i = \frac{Q_i - Q_{i-1}}{H} \quad (2.9)$$

où

Q_i est la charge sur le forage au temps i (W)

H est la longueur du puits (m)

L'équation 2.9 peut être réécrite pour des valeurs de conductivité thermique k et de diffusivité thermique α données :

$$\Delta T(r, t) = \sum_i q(t_i) f(t - t_i) = (q * f)(t) \quad (2.10)$$

La compilation des températures dans le sol à n'importe quel point est donc le produit de convolution entre l'incrément de charge par unité de longueur entre deux échelons et l'intégrale avec un taux de transfert de chaleur unitaire (Marcotte et Pasquier, 2008a). En utilisant le théorème de convolution (Brigham, 1988) :

$$\Delta T(r, t) = \mathfrak{F}^{-1}(\mathfrak{F}(q)\mathfrak{F}(f)) \quad (2.11)$$

où dans le cas discret :

\mathfrak{F} est la transformée de Fourier rapide (Fast Fourier Transform - FFT)

\mathfrak{F}^{-1} est la FFT inverse

En utilisant une charge unitaire pour résoudre la mathématique du transfert de chaleur entre le sol et le puits géothermique, le problème est résolu une seule fois. Ensuite, le théorème de convolution est appliqué pour les différentes charges dans le temps. La FFT permet de résoudre rapidement l'algorithme et ainsi sauver du temps de simulation. Bernier *et al.* (2004) ont développé un algorithme d'agrégation de charges multiples (Multiple Load Aggregation Algorithm - MLAA) pour des simulations horaires permettant ainsi de réduire les temps de calculs. Celui-ci repose sur l'idée qu'une charge amenée au sol au temps présent a plus d'influence sur la température du sol qu'une charge ayant eu lieu dans le passé. L'algorithme est une alternative à la FFT mentionnée précédemment.

La superposition dans l'espace est prépondérante dans ce mémoire, puisqu'on additionne les perturbations que crée un bâtiment sur la température du sol à la réponse analytique d'un système géothermique. Tout d'abord, il faut appliquer le principe de superposition lorsque la perturbation totale moyenne est calculée pour le champ de puits (section 3.8) et ensuite additionner l'effet de la dalle. En utilisant le principe de superposition, on suppose que les températures s'additionnent en tous points.

2.3 Écoulement de l'eau

Toute la littérature discutée précédemment considère que le transfert de chaleur se fait par conduction pure. Puisque le sol est constitué d'eau, de particules et d'air, le transfert de chaleur se produit principalement en conduction pure. Par le simple gradient de température dans le sol, la masse volumique de l'eau change et par conséquent une convection naturelle se produit. De plus, l'eau souterraine peut s'écouler sous l'effet d'un gradient hydraulique. Il faut donc penser à inclure dans les modèles de simulation le mouvement de l'eau souterraine, ce qui revient à inclure le transfert de chaleur par convection au modèle de conduction pure. La conductivité hydraulique et le gradient hydraulique sont les paramètres principaux dans le calcul de l'influence de l'eau souterraine sur les modèles géothermiques. Chiasson *et al.* (2000) concluent, en développant un modèle numérique simulant l'écoulement de l'eau souterraine, que celui-ci n'affecte pas les performances d'un échangeur de chaleur géothermique sauf pour des conductivité hydrauliques élevées. Ces conditions de sols se retrouvent dans des sols poreux (sable et gravier) ou pour des socles rocheux très fracturés ou karstiques. De même, Gehlin (2003), à l'aide de trois modèles de circulation d'eaux souterraines différents, démontre que l'influence de l'eau souterraine sur la température autour d'un puits géothermique devient importante lorsque la structure interne du sol est poreuse ou fracturée. Finalement, Sutton *et al.* (2003) démontrent que pour un Pe (nombre de Peclet) supérieur

à 0,01, le phénomène de convection dans le sol devient important. Dans le présent mémoire, l'influence de l'eau souterraine est négligée puisqu'on cherche à quantifier l'influence d'un bâtiment sur le dimensionnement des systèmes géothermiques. La superposition de plusieurs phénomènes permettrait difficilement de cerner l'effet du bâtiment. Toutefois, lorsque la nature du sol favorise l'écoulement de l'eau souterraine, le phénomène de convection ne doit pas être négligé.

2.4 Fluctuation de température en surface

À la surface du sol, différents phénomènes se produisent et interviennent dans le bilan énergétique, tels les radiations solaires, la température de l'air, la neige, le vent, la pluie, la topographie, l'évapotranspiration, l'occupation du sol, etc. Ces phénomènes sont importants puisqu'ils conditionnent des transferts de chaleur à la surface du sol, induisant ainsi des variations de la température du sol à proximité (Giordanengo, 2009). Toutefois, le phénomène le plus influent est la température de l'air puisque la température non-perturbée du sol près de la surface est généralement similaire à la température de l'air (Pahud, 2002). La température de l'air varie en fonction des périodes de l'année (saisons) en plus de varier sur une base journalière. La température du sol subit donc des variations diurnes et annuelles. La profondeur d'influence d'une variation annuelle est de l'ordre de dix à vingt mètres (Giordanengo, 2009; Eskilson, 1987; Chapuis, 2009). Selon Eskilson (1987), cette influence peut être négligée puisque les puits géothermiques ont des profondeurs de l'ordre d'une centaine de mètres et la température moyenne annuelle peut donc être utilisée comme condition frontière en surface du sol. Eskilson pose l'hypothèse que la température en surface et le flux géothermique du sol (gradient) peuvent être remplacés par une température moyenne du sol non-perturbé. Nouanegue *et al.* (2009) comparent un modèle où la température fluctue en surface avec un modèle de température moyenne annuelle du sol non-perturbé. Ils concluent que l'écart sur la température moyenne annuelle le long du puits entre les deux méthodes est de moins de 0.5 °C, pour une profondeur de puits de soixante-dix mètres posé en surface. Plus la longueur du puits est importante et plus la tête du puits se situe en profondeur, plus cet écart diminue. L'hypothèse d'Eskilson est donc adéquate pour la détermination des valeurs moyennes annuelles. Toutefois si des simulations horaires sont nécessaires, il est préférable d'inclure les fluctuations de la température. Nouanegue *et al.* (2009) montrent qu'il peut y avoir des différences de l'ordre de 2 °C pour les mêmes conditions de puits mentionnées précédemment.

2.5 Transfert de chaleur d'un bâtiment au sol

Dans les régions froides comme le Québec, la perte de chaleur d'un bâtiment au sol peut atteindre le tiers des pertes de chaleur (Claesson et Hagentoft, 1991; Hagentoft, 1988). Une vaste littérature existe sur ce sujet. Trois types de méthodes sont utilisées : solution analytique, modèle numérique et mesures expérimentales. La plus grande partie de la littérature suppose un régime permanent en deux dimensions pour une dalle de longueur infinie. Le transfert thermique dépend de la géométrie de la fondation, c'est-à-dire la profondeur de la dalle de béton, de la forme et de l'isolation du bâtiment. Le cas où la dalle de béton serait isolée est très peu étudié. La dalle reposant directement sur le sol et sans isolation est le cas le plus fréquent dans les climats tempérés où les immeubles ont un certain âge.

Les premiers écrits dans le domaine du transfert de chaleur d'un bâtiment au sol sont Dill *et al.* (1945) et Bareither et Fleming (1948). Ce n'est qu'en 1949 que Macey (1949) mets sous forme d'équation le cas en deux dimensions en régime permanent du transfert de chaleur d'une dalle de béton non isolée au sol. Dans le modèle de Macey, la dalle de béton est posée directement à la surface du sol et son épaisseur est nulle, mais il considère l'épaisseur du mur. L'équation de Macey est une approximation valide seulement si les lignes de flux sont semi-circulaires dans le sol, ce qui sous-estime le flux de chaleur réel qui suit une trajectoire plus directe (Morris *et al.*, 2004). Lachenbrunch (1957) applique les fonctions de Green au cas en trois dimensions ayant des fluctuations périodiques de la température en surface. Delsante *et al.* (1983) utilisent les transformées de Fourier pour obtenir l'expression du flux pour une dalle sans isolant. Les températures en surface varient dans le temps. Toutefois la complexité des équations permet uniquement la résolution du système d'équation en régime stationnaire. Ils ont développé les cas en 2D et 3D pour une dalle rectangulaire dont la distribution de température dans le mur est linéaire.

Une approche différente est utilisée par Claesson et Hagentoft (1991) en superposant trois modèles. Le premier considère des températures en surface constantes. Le deuxième est une fonction périodique et le troisième est une fonction échelon. En superposant les trois modèles, on obtient la solution générale qui considère une fluctuation de la température en surface du sol et une température constante dans le bâtiment. Finalement, certains chercheurs (Rees et Thomas, 1997; Rantala, 2005) ont pris des mesures de température sous la dalle de béton afin de valider leur propre modèle 2D de bâtiment et la comparaison s'avère concluante.

2.6 Résumé

En résumé, une revue de littérature sur les différents modèles de calcul de la température du sol des systèmes géothermiques a été présentée, ainsi que l'influence que peut avoir la dalle sur la température moyenne du sol. Pour des puits courts, cette influence est considérée non-négligeable. Finalement, on a introduit les modèles SLI et SCI.

CHAPITRE 3

THÉORIE

Ce chapitre présente les principales notions théoriques liées à l'approche proposée. On se penche d'abord sur les concepts utilisés dans l'élaboration d'un modèle thermique d'un bâtiment. Ensuite, l'équation de Fourier et les principes de transfert de chaleur à la surface du sol (variation de la température en surface du sol) et à travers une dalle de béton (équations en 2D et 3D) sont présentés. De plus, une méthode d'estimation de la distribution de la température sous un bâtiment est mentionnée, ce qui permet de déterminer la température sous la dalle de béton et subséquemment de déterminer la condition frontière en surface pour le modèle numérique. Finalement, la théorie des puits inclinés et celle du dimensionnement d'un système géothermique sont présentées.

3.1 Modèle thermique d'un bâtiment

Pour l'être humain, un bâtiment sert de protection face aux variations du climat. Il est donc, d'un point de vue thermodynamique, un élément perturbateur du système air-sol. La nature isolante des revêtements extérieurs, tels que les murs, les fenêtres et le toit, permettent un confort thermique à l'intérieur du bâtiment. Depuis le choc pétrolier des années 70, les pertes de chaleur sont devenues sources de problèmes économiques. Parmis les déperditions thermiques des bâtiments, la chaleur dissipée dans le sol est la moins étudiée (Hagentoft, 1988). De nos jours, les nouvelles contructions ont de meilleurs isolants de murs et de toits, c'est ainsi que les pertes de chaleurs dans le sol sont devenues plus importantes en pourcentage.

3.1.1 Confort thermique

Avant d'introduire le principe d'évaluation des charges, il est important de mentionner ce qu'est le confort thermique. Le *confort thermique* est défini (ASHRAE, 1992) comme étant la condition mentale qui exprime la satisfaction avec son environnement thermique. Le confort est donc une perception physique, physiologique et psychologique des différents mécanismes du corps. L'état de conscience menant aux conclusions face au confort ou à l'inconfort thermique dépend de la température et de l'humidité à la surface de la peau, de la température interne du corps et de l'énergie que consomme le corps pour réguler la température de celui-ci (Berglund, 1995). L'environnement joue donc un rôle primordial sur le confort. La température ambiante, la quantité de chaleur perçue par radiation, le taux d'humidité de la pièce et la

vitesse des courants d'air influencent donc notre état de bien-être. Il peut paraître étonnant que malgré les différences de climats, de modes de vie et de cultures, la température de confort est très similaire à travers le monde entier (Busch, 1992; de Dear *et al.*, 1991; Fanger, 1972) pour les mêmes conditions (vêtements, degré d'activité, humidité et courant d'air). Tous ces facteurs tant environnementaux que physiques et physiologiques ont été étudiés par Bedford (1964), mais ce n'est qu'avec Fanger (1970) que le premier modèle de confort thermique est apparu.

Toutefois, des études portant sur les relations entre la température (mesure objective) et la perception du confort thermique (mesure subjective) datent des années 1920 (Morris *et al.*, 2004). Selon le modèle de Fanger, une activité sédentaire, c'est-à-dire une personne assise, dégage environ 60 W/m^2 de surface corporelle, une activité d'intensité modérée correspond à une marche sur une surface plane à environ $3,2 \text{ km/h}$ dégage 120 W/m^2 et finalement, une activité d'intensité élevée correspond à de la marche sur une pente de 5% à $3,2 \text{ km/h}$ dégage 175 W/m^2 . En conclusion, la température de confort est la base pour déterminer la quantité de chaleur requise par les systèmes de chauffage-climatisation. Évidemment, nombreux sont les facteurs à prendre en considération afin de déterminer cette température de confort, comme le climat, le nombre d'individus, le type d'activité, les types de vêtements portés lors de l'activité, le degré d'humidité, les courants d'air, etc.

3.1.2 Principe d'évaluation des charges

L'évaluation des charges d'un bâtiment est une étape primordiale dans le dimensionnement des systèmes HVAC (*Heating Ventilation and Air Conditioning*) puisqu'un système sous-dimensionné amènera des températures d'entrée à la pompe à chaleur (PAC) inférieure (supérieure) en hiver (été). Pour un système sur-dimensionné, le problème est d'ordre monétaire puisque des coûts de construction seront engendrés inutilement. De plus, la période de retour sur investissement d'un système géothermique au Québec se situe généralement entre huit et quinze ans d'où l'importance d'un bon dimensionnement.

La charge requise dépend des conditions intérieures que l'on veut maintenir et du climat. Lorsque le confort thermique est désiré en tout temps, le design doit se faire aux conditions extrêmes rencontrées sur une période d'un an (Kreider, 2001). Toutefois, des coûts superflux seraient engendrés si le système de chauffage/climatisation devait être dimensionné ainsi, tant en coûts initiaux qu'en coûts d'opération. Puisque les conditions extrêmes se produisent rarement, l'équipement fonctionnerait avec un faible facteur de charge partielle (PLF), ce qui revient à payer des équipements performants inutilement. Dans la vie comme pour les

systèmes géothermiques, le compromis est toujours un bon choix. De ce fait, les coûts d'équipements sont réduits tout en acceptant le faible risque d'inconfort lorsque les conditions climatiques sont extrêmes.

Puisque l'objectif du présent mémoire n'est pas d'évaluer les charges d'un bâtiment, l'utilisation de modèles synthétiques heure par heure peut suffire pour les besoins de comparaison. La charge synthétique est générée par l'équation 3.1 (Marcotte et Pasquier, 2008b) :

$$Q(t) = A - B\cos\left(\frac{t}{8760}2\pi\right) - C\cos\left(\frac{t}{24}2\pi\right) - D\cos\left(\frac{t}{24}2\pi\right)\cos\left(\frac{2t}{8760}2\pi\right) \quad (3.1)$$

où

t est le temps en h

A est une constante qui balance les charges annuelles en kW

B est la demi-amplitude de la variation de la charge annuelle en kW

C et D est la demi-amplitude des variations journalières en kW

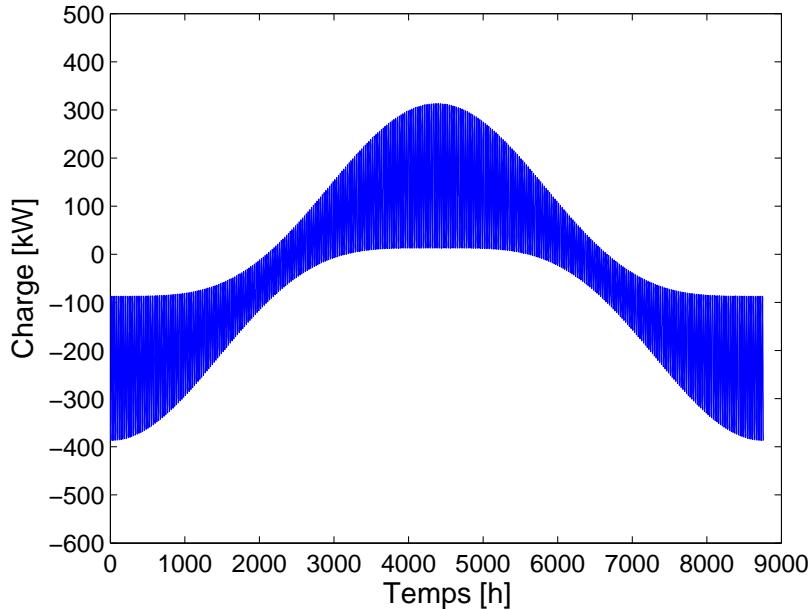


Figure 3.1 Charge synthétique non-balancée en mode chauffage

Le ratio D/C contrôle l'importance du facteur d'amortissement utilisé pour simuler des variations plus grandes en été et en hiver qu'entre les deux saisons. Sur la figure 3.1, la charge synthétique est non-équilibrée en mode chauffage ($A=-37$). Une équation semblable est présentée dans l'article de Bernier (2000). La quantité de chaleur injectée (absorbée) dans le

sol dépend du coefficient de performance (COP) de la pompe à chaleur et est exprimée par l'équation suivante :

$$Q_{sol}(t) = Q(t) \left(1 \pm \frac{1}{COP} \right) \quad (3.2)$$

En mode climatisation, le signe "+" s'applique, et le "-" en mode chauffage. Comme le COP de la PAC varie avec la température du fluide (figure 5.14), des simulations heure par heure sont nécessaires (Marcotte et Pasquier, 2008b).

3.2 Équation de conduction de Fourier

Les systèmes géothermiques puisent ou rejettent la chaleur du sol par conduction. Le phénomène de conduction se produit lorsque deux points sont à des températures différentes (Pahud, 2002). Le même phénomène se produit entre le bâtiment et le sol. Le bâtiment, par sa température plus élevée, transfert de la chaleur au sol.

La différence de température entre deux points est nommée gradient de température et est exprimée par :

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.3)$$

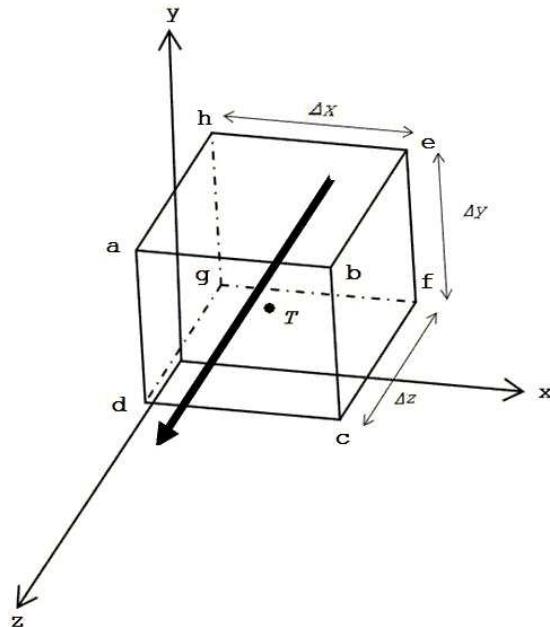


Figure 3.2 Élément d'un corps

Considérons un élément rectangulaire d'un corps dont les arêtes sont parallèles aux axes x , y et z . Les arêtes ont une longueur Δx dans la direction x , Δy dans la direction y et Δz dans la direction z . Le point de mesure de la température T est situé au centre du bloc (Fig 3.2). Supposons que le flux de chaleur est dans la direction de l'axe des z , l'incrément de température sur le plan $\Delta x \Delta y$ est de :

$$\frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial z} \Delta z \quad (3.4)$$

L'équation 3.4 provient de la définition du gradient de température qui mesure la différence de température par unité de distance (3.3) et de la distance entre le centre du bloc et le plan $\Delta x \Delta y$ qui est de $1/2\Delta z$. La température des faces $abcd$ et $efgh$ est donc égale à :

$$T_{abcd} = T + \frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial z} \Delta z \quad T_{efgh} = T - \frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial z} \Delta z \quad (3.5)$$

La première loi de Fourier stipule que lorsqu'il y a un gradient de température, la chaleur se diffuse le long du gradient de température et le flux de chaleur q dépend linéairement du gradient de température (Pahud, 2002). Le facteur de proportionnalité entre le gradient de température et le flux de chaleur est la conductivité thermique k . L'équation de chaleur est donc :

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.6)$$

En appliquant l'équation de chaleur sur la face $abdc$, le flux de chaleur sortant du corps est de :

$$q_{abcd} = -k\Delta x \Delta y \frac{\partial(T + \frac{\partial T}{\partial z} \Delta z)}{\partial z} \quad (3.7)$$

De même pour le flux de chaleur entrant dans le corps :

$$q_{efgh} = -k\Delta x \Delta y \frac{\partial(T - \frac{\partial T}{\partial z} \Delta z)}{\partial z} \quad (3.8)$$

La différence entre ces deux flux indique le gain de chaleur par seconde selon l'axe z dans l'élément.

$$\Delta q_z = k\Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.9)$$

L'équation 3.9 peut s'appliquer en trois dimensions et devient :

$$\Delta q = k\Delta x\Delta y\Delta z \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k\Delta x\Delta y\Delta z \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k\Delta x\Delta y\Delta z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.10)$$

Puisque $q = c\rho\Delta x\Delta y\Delta z \frac{\partial T}{\partial t}$ et $\alpha = \frac{k}{c\rho}$, l'équation de conduction de Fourier devient :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.11)$$

avec c et ρ étant respectivement la capacité calorifique et la densité volumique du sol. La forme réduite de l'équation de chaleur est (Ingersoll *et al.*, 1954) :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (3.12)$$

En réalité la conductivité thermique varie d'un point à l'autre, l'équation se réécrit donc comme suit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (3.13)$$

3.3 Variation de la température en surface du sol

Comme mentionné dans la section 2.4, les phénomènes se produisant à la surface du sol influencent la température du sol à proximité de la surface. Le facteur le plus influent est la température de l'air. Puisque celle-ci varie en fonction de la période de l'année, il s'en suit que la solution représentant la fluctuation de température en fonction de la profondeur dans le sol donnée par l'équation suit une tendance périodique (Ingersoll *et al.*, 1954) :

$$T = \left[T_0 e^{-z\sqrt{\omega/2\alpha}} \right] \sin \left(\omega t - z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \right) \quad (3.14)$$

où z représente la distance de la surface (profondeur) en m, ω est égal à $2\pi/P$ où P est la période de l'onde en secondes, T_0 est l'amplitude à la surface en °C et t le temps en seconde. Cette équation tire ses fondements de l'application d'un flux de chaleur en une dimension dans un milieu semi infini et homogène où la frontière en surface suit des variations périodiques de température (Ingersoll *et al.*, 1954).

L'amplitude de l'onde est atténuée par le facteur $T_0 e^{-z\sqrt{\omega/2\alpha}}$. Plus la période de l'onde est faible, par exemple pour une variation diurne (1 jour), plus l'onde est atténuée rapidement. L'influence d'une variation diurne sur le profil de température se voit donc à des plus petites profondeurs qu'une variation annuelle. Ce facteur d'atténuation est conditionné par la profondeur de pénétration $\sqrt{2\alpha/\omega}$ de l'onde de chaleur qui ne dépend que de la période de

l'onde de chaleur ω et de la diffusivité thermique α du sol (Pahud, 2002).

La *profondeur de pénétration* représente la profondeur à laquelle l'amplitude de l'onde de chaleur s'est atténuée d'un facteur $1/3$ (facteur d'amortissement de $1/e$). La *profondeur d'influence* quant à elle est la profondeur à laquelle l'amplitude de l'onde initiale s'est atténuée d'un facteur 5 . Les fluctuations journalières (effet diurne) produisent des ondes de chaleur qui ont une profondeur d'influence de moins d'un mètre (Giordanengo, 2009). Toutefois, les fluctuations annuelles se font ressentir à des profondeurs plus élevées (10 à 15 m) (Giordanengo, 2009; Eskilson, 1987; Chapuis, 2009). Au-delà de cette profondeur, la température du sol est dite non-perturbée, T_s (environ 8 °C pour la région de Montréal). À noter que l'on pourrait ajouter à l'équation 3.14 l'effet du gradient géothermique sur la température du sol en fonction de la profondeur. Ce gradient est relativement faible et difficile à estimer avec précision. Comme il représente une faible variation linéaire de température avec la profondeur, nous préférons suivre la pratique habituelle d'inclure cet effet directement dans T_s .

3.4 Types de fondation

Avant d'introduire les équations régissant le transfert de chaleur d'un bâtiment au sol, il est important de connaître les types de fondations puisque, selon la géométrie de la fondation, la chaleur se diffuse différemment. Il existe trois types de fondations populaires (Hagentoft, 1988) : la dalle posée directement sur le sol, la dalle posée dans le sol (sous-sol) et la galerie (demi sous-sol). Les trois types de fondations sont représentées à la figure 3.3.

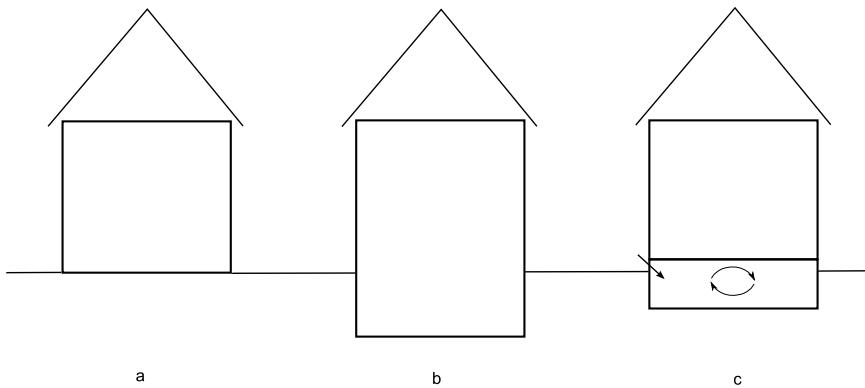


Figure 3.3 Types de fondations : a) dalle reposant directement sur le sol, b) dalle posée dans le sol, c) galerie

Le premier type de fondation est la dalle qui repose directement sur le sol. Il y a une couche d'isolant thermique sous la dalle. En général, la dalle est composée de béton et est renforcée

aux coins du bâtiment. L'isolation peut être installée de différentes façons, mais typiquement, celle-ci recouvre toute la surface du bâtiment. Pour des climats plus cléments, l'isolation peut être disposée uniquement sous les murs extérieurs (périmètre du bâtiment).

Le deuxième type de fondation est la dalle posée dans le sol. La profondeur typique est de l'ordre d'un à trois mètres. Les pertes de chaleur sont plus importantes puisque la surface de contact est plus grande à cause des murs. En revanche, les murs de fondation sont normalement isolés, mais la dalle de béton peut l'être ou non.

Finalement, le type galerie ressemble au point de vue thermique à la deuxième fondation sauf pour la profondeur du plancher et la température sous l'isolant. La galerie peut être ventilée par l'apport d'air extérieur et ainsi être isolé au plafond ou ventilée par de l'air intérieur, ce qui évite d'avoir à isoler le plafond de la galerie.

3.5 Transfert de chaleur d'un bâtiment au sol

Le processus thermique dans le sol est complexe. La distribution de température dans le sol est 3D et varie dans le temps. De plus, la température et les paramètres thermiques à la surface du sol varient dans le temps. L'épaisseur des isolants sous la fondation, la géométrie, le mouvement de l'eau souterraine, l'hétérogénéité du sol, tous ces facteurs introduisent un nombre élevé de paramètres dans le problème.

Comme mentionné précédemment, la dalle de béton diffuse de la chaleur au sol et est donc régie par l'équation de Fourier (équation 3.12). Si la température dans le sol est connue et oscille dans le temps avec une fréquence angulaire Ω , on a :

$$\nabla^2 T(x, y, z, t) = T(x, y, z) e^{i\Omega t} \quad (3.15)$$

Pour un bâtiment reposant à la surface du sol, la distribution de température en surface est connue, $T(x, y, 0)$, et la solution à l'équation de diffusion est :

$$T(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega_1 x - i\omega_2 y} e^{-z(\omega_1^2 + \omega_2^2 + a^2)^{0.5}} g(\omega_1, \omega_2) d\omega_1 d\omega_2 \quad (3.16)$$

où

$$g(\omega_1, \omega_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega_1 x + i\omega_2 y} T(x, y, 0) dx dy \quad (3.17)$$

et $a = (i\Omega/\alpha)^{0.5}$. Le flux de chaleur (en W pour le cas 3D et en W/m pour le cas 2D) dans

le sol en provenance d'une surfase S est donné par :

$$\Phi = -k \int_S \int \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} dx dy \quad (3.18)$$

où k est la conductivité thermique. Le gradient de température est donc :

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} -(\omega_1^2 + \omega_2^2 + a^2)^{0.5} e^{-i\omega_1 x - i\omega_2 y} g(\omega_1, \omega_2) d\omega_1 d\omega_2 \quad (3.19)$$

En utilisant le théorème de convolution où $F_{x,y}$ est la transformée de Fourier et $*$ est l'opérateur de convolution, l'équation 3.19 devient :

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{1}{(2\pi)^2} F_{x,y} [-(\omega_1^2 + \omega_2^2 + a^2)^{0.5}] * T(x, y, 0) \quad (3.20)$$

$$F_{x,y} [-(\omega_1^2 + \omega_2^2 + a^2)^{0.5}] = \frac{2\pi e^{-ar}}{r^3} (1 + ar) \quad (3.21)$$

où $r = (x^2 + y^2)^{0.5}$. Pour résoudre le problème et trouver le flux, il faut donc résoudre le système d'équations 3.18, 3.19 et 3.20. Une solution générale de cette équation en fonction de conditions frontières mène à des intégrales de convolution très complexes (Anderson, 1991; Delsante *et al.*, 1983). C'est ainsi que dans la littérature (Anderson, 1991; Claesson et Hagentoft, 1991; Delsante *et al.*, 1983; Macey, 1949; Hagentoft, 1988), les solutions sont déterminées pour des cas stationnaires. En d'autres mots, pour que l'équation puisse être résolue, les températures à la surface de la dalle de béton et la surface du sol sont considérées constantes. Les solutions du cas stationnaire en 2D et en 3D sont présentées dans les sections subséquentes.

3.5.1 Solution stationnaire - cas 2D

Puisque les modèles présentés dans la littérature reposent sur des conditions frontières stationnaires, la température en surface est donc constante dans le temps. En considérant une température constante à la surface de la dalle et du sol, la température dans le mur du bâtiment doit varier en fonction de la position dans le mur afin d'avoir une distribution de température la plus réaliste possible. Celle-ci peut être considérée comme une fonction variant linéairement entre la température de la dalle et du sol (figure 3.4). En considérant la distribution de température du modèle de la figure 3.4, la condition frontière de température en surface devient :

$$T(x, 0) = \begin{cases} T_1 & \text{si } |x| \leq a \\ T_1 + \frac{T_1 - T_2}{2e}(a - |x|) & \text{si } a \leq |x| \leq a + 2e \\ T_2 & \text{si } |x| \geq a + 2e \end{cases} \quad (3.22)$$

où e est la demi-épaisseur du mur.

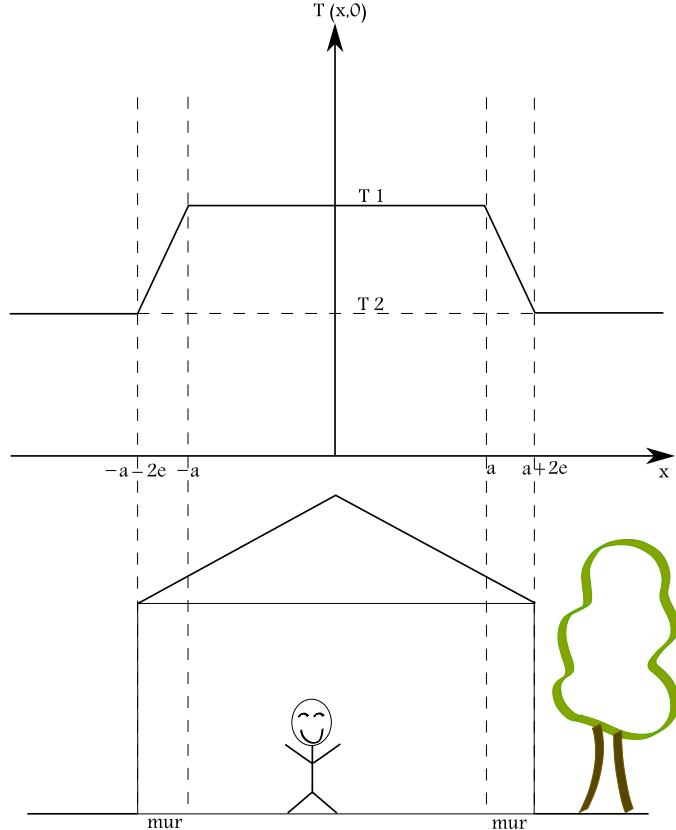


Figure 3.4 Distribution de la température en surface ($z=0m$) pour le modèle 2D

Le flux de chaleur à l'état stationnaire pour une dalle sans épaisseur (W/m) est donné par (Delsante *et al.*, 1983) :

$$\Phi = \frac{2k(T_1 - T_2)}{\pi} \left\{ \ln \left[\frac{a+e}{e} \right] + \frac{a}{e} \ln \left[\frac{a+e}{a} \right] \right\} \quad (3.23)$$

où Φ est l'intégrale du flux sur toute la surface de la dalle.

3.5.2 Solution stationnaire - cas 3D

Le modèle 3D du bâtiment est illustré à la figure 3.5. La température de la dalle de béton (T_1) et la température du sol (T_2) sont imposées respectivement à 0 et -1 , pour des fins de

simplification du système d'équations. Notons que pour le cas stationnaire, si les surfaces (T_1 et T_2) ont la même différence de température, le résultat est le même. Le mur est divisé en quatre régions, où des gradients de température sont imposés entre T_1 et T_2 .

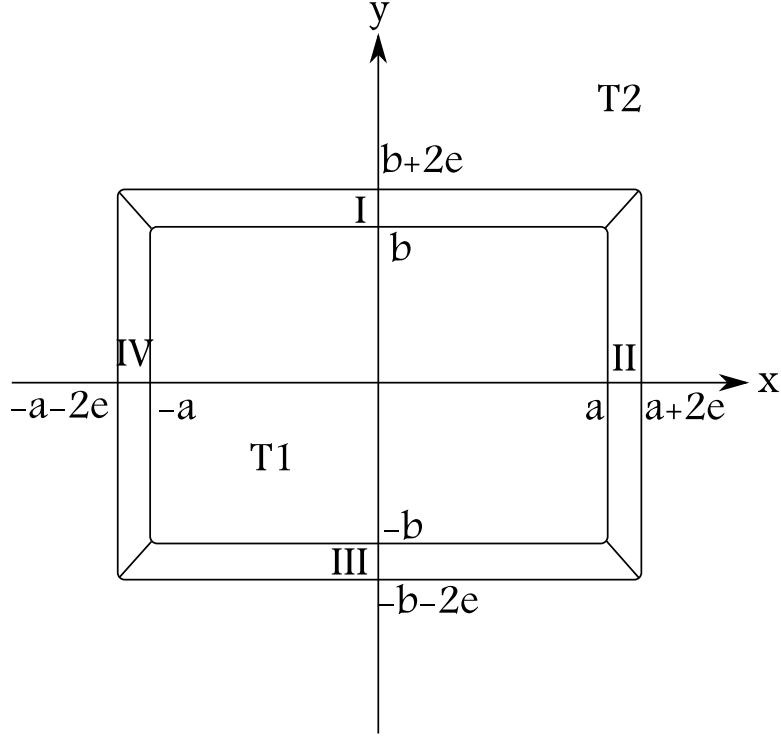


Figure 3.5 Géométrie de la dalle ($z=0m$) pour le modèle 3D

Le cas stationnaire en 3D est déterminé par l'équation 3.18 avec les conditions frontières de température en surface ($z=0m$) indiquées par l'équation 3.24 pour un $a=0$.

$$T(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{si } |x| \leq a \text{ et } |y| \leq b \\ -1 & \text{si } |x| \leq a + 2e \text{ et } |y| \leq b + 2e \\ \frac{b-y}{2e} & \text{si } b \leq y \leq b + 2e \text{ et } |x| \leq y + a - b \text{ (région I)} \\ \frac{a-x}{2e} & \text{si } a \leq x \leq a + 2e \text{ et } |y| \leq x + b - a \text{ (région II)} \\ \frac{b+y}{2e} & \text{si } -b - 2e \leq y \leq -b \text{ et } |x| \leq -y + a - b \text{ (région III)} \\ \frac{a+x}{2e} & \text{si } -a - 2e \leq x \leq -a \text{ et } |y| \leq -x + b - a \text{ (région IV)} \end{cases} \quad (3.24)$$

L'intégrale du flux de chaleur (W) à l'état stationnaire en 3D donnée par Delsante *et al.* (1983) et est égale à :

$$\Phi = \frac{2k}{\pi} G(a, b) \Delta T \quad (3.25)$$

où

$$\begin{aligned}
G(a, b) = & \left(2 + \frac{a+b}{e} \right) \sqrt{[(a+e)^2 + (b+e)^2]} - \sqrt{2} \left(1 + \frac{a+b}{2e} \right) \sqrt{[a^2 + (a+2e)^2]} \\
& - \sqrt{2} \left(1 + \frac{b}{2e} \right) \sqrt{b^2 + (b+2e)^2} - \frac{a+b}{e} \sqrt{(a^2 + b^2)} + \frac{a^2 + b^2}{e} \left(1 + \sqrt{2} \ln(\sqrt{2} - 1) \right) \\
& + 2e \left(\sqrt{2} + \ln(\sqrt{2} - 1) \right) - \frac{\sqrt{2}\gamma^2}{e} \ln \left[\frac{\sqrt{\gamma^2 + (\delta + 2e)^2} + \gamma + 2e}{\sqrt{\gamma^2 + \delta^2} + \delta} \right] \\
& + \frac{\gamma^2 - (b+e)^2}{e} \ln \left[\frac{\sqrt{(a+e)^2 + (b+e)^2} + b+e}{a+e} \right] \\
& + \frac{\gamma^2 - (a+e)^2}{e} \ln \left[\frac{\sqrt{(a+e)^2 + (b+e)^2} + a+e}{b+e} \right] + \frac{a(2e-a)}{e} \ln \left[\frac{\sqrt{a^2 + b^2} + b}{a} \right] \\
& + \frac{b(2a-b)}{e} \ln \left[\frac{\sqrt{a^2 + b^2} + a}{b} \right] - \frac{a^2 - e^2}{e} \ln \left[\frac{\sqrt{e^2 + (a+e)^2} + e}{a+e} \right] \\
& - \frac{b^2 - e^2}{e} \ln \left[\frac{\sqrt{e^2 + (b+e)^2} + e}{b+e} \right] + (2a+e) \ln \left[\frac{\sqrt{e^2 + (a+e)^2} + a+e}{e} \right] \\
& + (2b+e) \ln \left[\frac{\sqrt{e^2 + (b+e)^2} + b+e}{e} \right] + \frac{\sqrt{2}a^2}{e} \ln \left[\frac{\sqrt{a^2 + (a+2e)^2} + a+2e}{a} \right] \\
& + \frac{\sqrt{2}b^2}{e} \ln \left[\frac{\sqrt{b^2 + (b+2e)^2} + b+2e}{b} \right]
\end{aligned} \quad (3.26)$$

avec $\gamma = a - b$ et $\delta = a + b$. Comme pour dans le cas 2D, le flux est déterminé pour la surface de la dalle seulement ($2a \times 2b$).

3.6 Estimation de la température sous une dalle de béton

Dans la section précédente, des équations de flux stationnaire en 2D et 3D pour des dalles sans épaisseur ont été énoncées. La température T_1 est considérée comme étant la température sous la structure de la fondation, c'est-à-dire sous les couches isolantes. Il faut donc déterminer cette température. Il existe des méthodes simplifiées permettant de donner une

bonne estimation de la température sous la dalle de béton. La méthode décrite dans cette section est celle énoncée par Rantala (2005) qui découle de la norme EN ISO 10211. Le principal attrait de la méthode de Rantala (2005) est que cette méthode prend en compte la structure complète d'une fondation (dalle, pierre concassée, etc.).

3.6.1 Structure de la fondation

La dalle de béton d'un immeuble a une épaisseur comprise entre quatre et six pouces et est renforcée par des armatures d'acier. Sous la couche de béton se retrouve un isolant de polystyrène expansé (EPS) d'une épaisseur de deux cent millimètres sous lequel se trouve une barrière d'humidité composée de deux feuilles de polyéthylène de six millimètres d'épaisseur. Cette couche permet aussi d'éviter la prolifération des gaz souterrains vers le bâtiment. Les feuilles de polyéthylène ne sont pas nécessaires dans les garages sauf si l'on veut minimiser les fissures lors des tassements du bâtiment (Postma et Walker, 2006). La couche de drainage repose sur le sol non excavé. Son épaisseur varie entre quinze et vingt et un centimètres de pierre concassée trois-quarts de pouces. La figure 3.6 présente un schéma de la dalle de béton et de la structure sous-jacente.

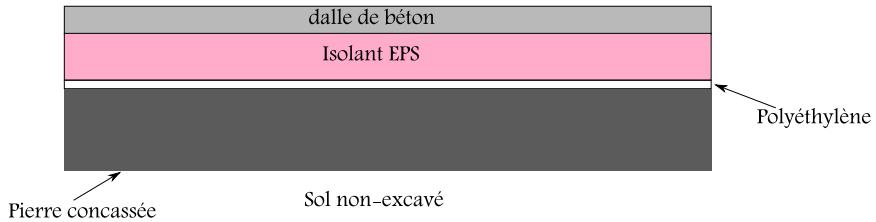


Figure 3.6 Structure sous la dalle de béton

3.6.2 Méthode d'estimation

La méthode d'estimation de la température moyenne sous la dalle de béton est en régime permanent, donc aucune température ne fluctue dans le temps. De plus, elle utilise des poids ($g(x, y)$) qui sont reliés à trois températures : la température intérieure (T_1), la température extérieure (T_2) et la température du sol non-perturbée (T_3). Les poids de températures à la position (x, y) sont donnés par l'équation 3.27 :

$$T_{moy}(x, y) = g_1(x, y)T_1 + g_2(x, y)T_2 + g_3(x, y)T_3 \quad (3.27)$$

avec la somme des poids égale à 1 ($g_1(x, y) + g_2(x, y) + g_3(x, y) = 1$). Les trois facteurs $g(x, y)$ sont déterminés avec les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
g_1 &= \frac{U_{dalle}}{U_{dalle} + U_{m+pc}(x, 0) + U_{sol}} \\
g_2 &= \frac{U_{m+pc}(x, 0)}{U_{dalle} + U_{m+pc}(x, 0) + U_{sol}} \\
g_3 &= \frac{U_{sol}}{U_{dalle} + U_{m+pc}(x, 0) + U_{sol}}
\end{aligned} \tag{3.28}$$

où

U_{dalle} est la transmittance de la dalle (incluant le polyéthylène et l'isolant si présent) en $\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$,

$U_{m+pc}(x, 0)$ est la transmittance du mur de fondation et de la couche de pierre concassée en $\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

U_{sol} est la transmittance du sol sous-jacent à la fondation en $\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

Chaque terme de transmittance est défini par une équation :

$$U_{dalle} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n d_i / \lambda_i} \tag{3.29}$$

$$U_{m+pc}(x, 0) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n d_i / \lambda_i + x / \lambda_{pc}} \tag{3.30}$$

$$U_{sol} \approx \frac{\lambda_{sol}}{L} \tag{3.31}$$

où

d_i est l'épaisseur de la couche i en m

λ_i est la conductivité thermique de la couche i en $\text{W}/\text{m} \text{ }^\circ\text{C}$

λ_{pc} est la conductivité thermique de la pierre concassée en $\text{W}/\text{m} \text{ }^\circ\text{C}$

λ_{sol} est la conductivité thermique du sol en $\text{W}/\text{m} \text{ }^\circ\text{C}$

L est l'épaisseur de la couche de sol en m.

En prenant l'équation 3.27, la température sous la structure de la dalle (sous les membranes de polyéthylène) est égale à :

$$T_{dalle}(x, y) = g_1(x, 0)T_1 + g_2(x, 0)T_2 + g_3(x, 0)T_3 \tag{3.32}$$

Les propriétés thermiques utilisées sont : $\lambda_{béton} = 1.7 \text{ W}/\text{m} \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda_{polyéthylène} = 0.04 \text{ W}/\text{m} \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda_{pc} = 1 \text{ W}/\text{m} \text{ }^\circ\text{C}$ et $\lambda_{mur,sol} = 2.5 \text{ W}/\text{m} \text{ }^\circ\text{C}$. La distribution de température pour un bâtiment

où la température intérieure est maintenue constante à 20 °C et où la température en surface du sol est égale à la température du sol non-perturbé de 8 °C, avec les dimensions de fondation décrites dans la section 3.6.1 pour une dalle de 40 mètres de longueur et un mur de 30 cm d'épaisseur, est illustrée à la figure 3.7. La température varie latéralement sous une dalle de béton. Plus le point de mesure est près du mur extérieur, plus l'influence de la surface est importante. De même, au centre de la dalle, l'influence principale est la température intérieure du bâtiment. La température moyenne sous les deux membranes de polyéthylène est de 14.84 °C. Comme les modèles de transfert de chaleur d'un bâtiment au sol sont déterminés pour des températures constantes le long de la dalle, la température moyenne est donc utilisée dans les modèles numériques du chapitre 5.

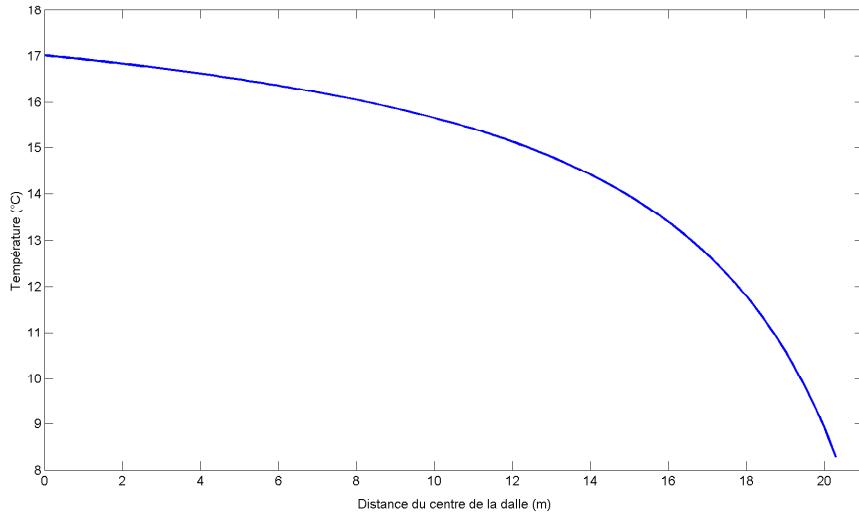


Figure 3.7 Distribution de la température sous la dalle de béton

3.7 Inclinaison des forages

Puisque les endroits densément peuplés ont des restrictions en terme d'espace, l'installation de puits inclinés semble une solution intéressante (section 2.1.6). Cui *et al.* (2006) ont développé une solution analytique basée sur le modèle de la ligne source finie (section 2.1.5). Leur modèle stipule que les puits inclinés sont approximés par une ligne source inclinée de longueur finie dans un milieu semi-infini. Voici les hypothèses du modèle :

1. Le sol est un milieu semi-infini et homogène.
2. Les propriétés thermiques ne varient pas en fonction de la température.

3. La frontière en surface du sol (température) est considérée constante.

Comme pour le modèle de la source linéaire finie, l'approche consiste à faire l'intégrale de toutes les charges (points sources) sur une longueur quelconque. Si une multitude de points sources d'intensité qdz sont situés sur un segment entre x_1 et x_2 , leurs actions combinées génèrent une perturbation au point x_0 donnée par l'équation suivante (Cui *et al.*, 2006; Marcotte et Pasquier, 2009) :

$$\Delta T(x_0, t) = \frac{q}{4\pi k} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{d(x, x_0)}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{d(x, x_0)} dx \quad (3.33)$$

où $d(x, x_0)$ est la distance entre le point de mesure x_0 et le point x situé le long du puits.

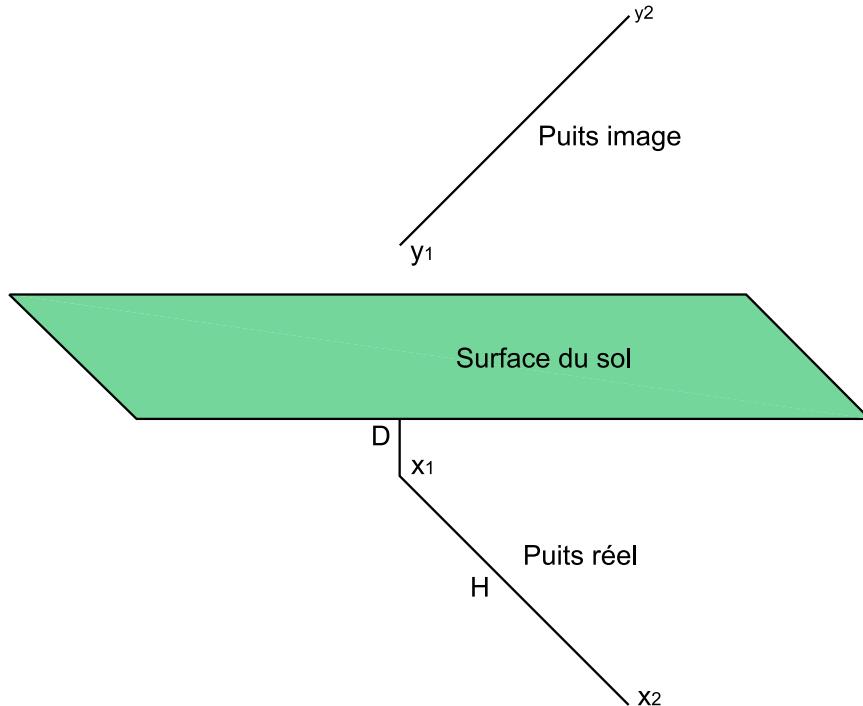


Figure 3.8 Modèle des puits inclinés

Cette équation est générale et se base sur le cas d'un milieu homogène infini. Afin de considérer les effets axiaux, il faut passer par la théorie des images comme mentionnée dans la section 2.1.5. Pour maintenir la température en surface constante, il faut poser un puits image de charge opposée en miroir du puits réel (figure 3.8). L'image du puits réel ayant comme segment $x_1 - x_2$ a un segment image $y_1 - y_2$. Notons ici que les coordonées horizontales restent les mêmes et les coordonnées verticales sont de signe opposé. Pour un point x_0 situé dans le sol (Marcotte et Pasquier, 2009) :

$$\Delta T(x_0, t) = \frac{q}{4\pi k} \left(\int_{x_1}^{x_2} \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{d(x, x_0)}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{d(x, x_0)} dx - \int_{y_1}^{y_2} \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{d(y, x_0)}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{d(y, x_0)} dy \right) \quad (3.34)$$

Cette équation est plus générale que l'équation décrite par Cui *et al.* (2006), car celle-ci permet aux puits d'être situés sous la surface du sol. Cette généralisation de l'équation peut correspondre, par exemple, au cas où les tuyaux en surface doivent être isolés, le cas où les puits sont situés sous la fondation d'un immeuble et le cas où il y a un remblai recouvrant la tête des puits. L'équation permet de décrire aussi le cas de tuyaux horizontaux. La théorie présente le cas d'un seul puits. Lorsque plusieurs puits sont nécessaires, le principe de superposition s'applique.

3.8 Dimensionnement d'un système géothermique

Afin de dimensionner les puits géothermiques, de nombreuses étapes sont primordiales. Tout d'abord, il faut évaluer la température moyenne au mur du forage. L'équation 3.34 est générale, ce qui permet de l'appliquer à tous les cas pour lesquels l'hypothèse d'un flux constant le long du forage constitue une approximation raisonnable (cas des tubes en U) : puits verticaux, puits horizontaux et puits inclinés, et est utilisée pour le dimensionnement de champ géothermique. En intégrant cette équation sur la surface du puits, on obtient :

$$\Delta T_m(t) = \frac{q}{4\pi k S} \int_{\text{mur}} \left(\int_{x_1}^{x_2} \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{d(x, x_m)}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{d(x, x_m)} dx - \int_{y_1}^{y_2} \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{d(y, x_m)}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{d(y, x_m)} dy \right) dw_m \quad (3.35)$$

où

$S = 2\pi r_b H$ est la surface du puits

r_b est le rayon du puits

Le rayon du puits est généralement très petit par rapport à la longueur du puits, les variations de température sur la circonférence du puits sont faibles (Marcotte et Pasquier, 2009), Cui *et al.* (2006) suggèrent donc de les négliger. Ils suggèrent de remplacer l'intégrale curviligne par un point représentatif situé sur la circonférence à 90° de la direction du puits (figure 3.9). Par conséquent, l'intégrale de surface peut être approximée par une intégrale linéique dont la ligne est l'axe du puits translaté d'une distance r_b dans la direction orthogonale à la direction du puits.

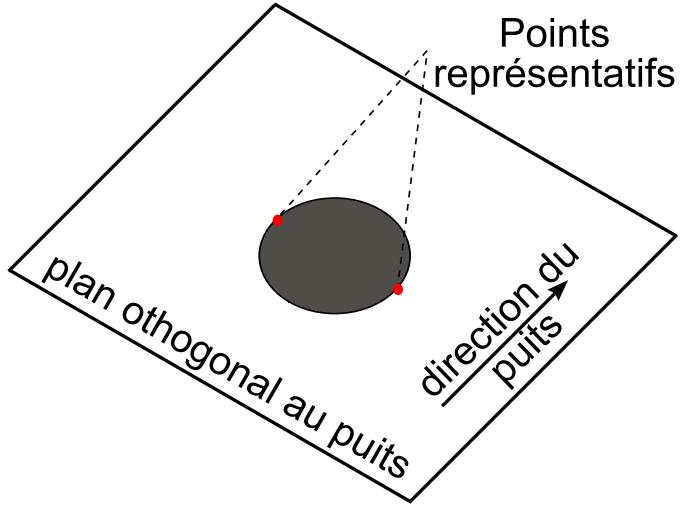


Figure 3.9 Points représentatifs sur la plan orthogonal du puits

Lorsque plusieurs puits géothermiques sont requis, la différence de température au mur du puits (i) causée par un puits voisin (j) est donnée par :

$$\Delta T_{j \rightarrow i}(t) = \frac{q_j}{4\pi k H_i} \left(\int_{x_1^i}^{x_2^i} \int_{x_1^j}^{x_2^j} \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{d(x,x')}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{d(x,x')} dx dx' - \int_{x_1^i}^{x_2^i} \int_{y_1^j}^{y_2^j} \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{d(x,y)}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{d(x,y)} dx dy \right) \quad (3.36)$$

où

x représente le puits réel

y représente le puits image

H_i est la longueur du puits i

Dans l'équation 3.36, lorsque $i=j$, x_1^i et x_2^i sont déplacés horizontalement d'une distance r_b . De plus, lorsque $i \neq j$, l'influence de r_b peut être négligée puisque la distance entre les puits est grande par rapport au rayon du puits. En général, $\Delta T_{j \rightarrow i}(t) \neq \Delta T_{i \rightarrow j}(t)$, il faut donc considérer toutes les paires d'interactions possibles. On obtient finalement la perturbation totale de la température au mur des forages par rapport à la température du sol non-perturbée avec l'équation suivante :

$$\Delta \bar{T}_m(t) = \sum_{i=1}^N \frac{H_i}{H_t} \sum_{j=1}^N \Delta T_{j \rightarrow i}(t) \quad (3.37)$$

où

$$H_t = \sum_{i=1}^N H_i$$

H_i est la longueur du puits i

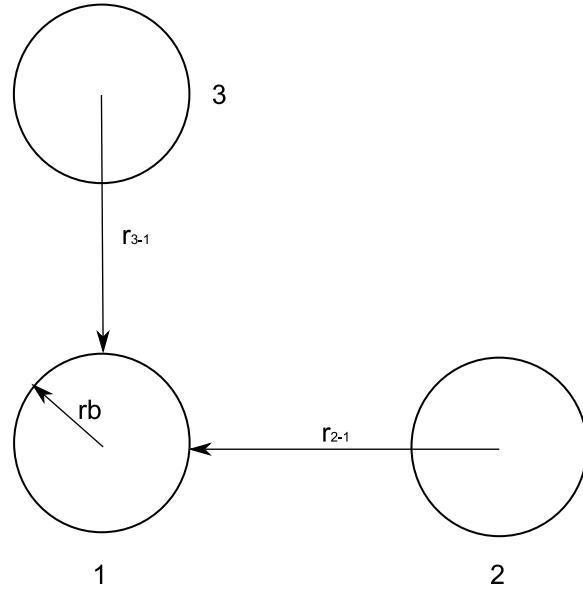


Figure 3.10 Calcul de la température à la paroi du puits 1

Les étapes menant au calcul de la perturbation totale sont énumérées ci-dessous pour le petit exemple illustré à la figure 3.10 :

1. Calculer la différence de température au mur du puits 1 causée par le puits 1 ΔT_{1-1} ; ceci est calculé en utilisant l'équation 3.36 pour une distance r_b .
2. Calculer la différence de température au mur du puits 1 causée par le puits 2 ΔT_{2-1} ; ceci est calculé en utilisant l'équation 3.36 pour une distance r_{2-1} .
3. Calculer la différence de température au mur du puits 1 causée par le puits 3 ΔT_{3-1} ; ceci est calculé en utilisant l'équation 3.36 pour une distance r_{3-1} .
4. Additionner les interactions ΔT_{1-1} , ΔT_{2-1} , ΔT_{3-1} .
5. Répéter les étapes 1 à 4 pour les puits 2 et 3.
6. Calculer la moyenne de perturbation de température avec l'équation 3.37.

L'évaluation de la température moyenne du champ géothermique se fait pour une charge unitaire pour fins de simplification. À l'aide du théorème de convolution présenté à la section 2.2, les vraies valeurs de température au mur du forage pour une charge au sol $q(t)$ sont ainsi déterminées. L'interpolation des temps discrets se fait en utilisant la transformée de Fourier rapide (*Fast Fourier transform - FFT*) décrite par Marcotte et Pasquier (2008a).

Par la suite, la température du fluide est évaluée. En fait, celle-ci n'est que la température moyenne au mur du forage ajustée pour la résistance thermique effective du puits :

$$T_f(t) = T_w(t) + q(t)R_b \quad (3.38)$$

où

$T_w(t) = T_g + \Delta \overline{T_m}(t)$ est la perturbation de température moyenne au mur des forages du champ de puits en °C

T_g est la température du sol non-perturbé en °C

$q(t)$ est le flux de chaleur linéique en W/m

R_b est la résistance thermique du puits en °Cm/W

La température à l'entrée de la PAC (*Entering Water Temperature-EWT*) est obtenue par (Yavuzturk, 1999) :

$$EWT(t) = T_f(t) - \frac{Q(t)}{2m_f c_f} \quad (3.39)$$

où

m_f est le débit du fluide en kg/s

c_f est la capacité calorifique du fluide en J/kg °C

$Q(t)$ est la charge du sol en W au temps t

La dernière étape du dimensionnement est de vérifier si la température du fluide à l'entrée de la PAC respecte la température minimale et maximale de celle-ci. Un déséquilibre des charges portées au sol peut résulter en l'augmentation (diminution) progressive de la température du fluide pouvant dépasser la température limite d'opération de la PAC en mode climatisation (chauffage). Un algorithme qui ajuste la charge portée au sol en fonction des conditions limites du compresseur est essentiel. Les charges excédentaires doivent alors être supportées par un système auxiliaire. Le système auxiliaire permet ainsi de réduire la longueur des échangeurs.

L'ingénieur doit donc trouver le meilleur compromis entre la longueur de l'échangeur donnant une valeur acceptable de EWT et la consommation d'énergie de la pompe à chaleur. Il est fréquent d'utiliser des systèmes auxiliaires aux conditions extrêmes afin de réduire la longueur de l'échangeur et ainsi réduire les coûts d'installation.

3.9 Résumé

En résumé dans ce chapitre, la théorie menant à l’élaboration du projet est présentée. On voit que pour déterminer les charges requises par le bâtiment, de nombreux facteurs internes et externes sont importants, comme la nature de l’activité du bâtiment, le nombres d’occupants, la température extérieure, la température de confort, les types de recouvrement du bâtiment, etc. Ensuite, il faut élaborer un bilan suite aux pertes et aux gains engendrés par ces facteurs. Toutefois, comme la nature de ce mémoire n’est pas de déterminer les charges du bâtiment, une charge synthétique est générée par l’équation 3.1.

L’équation de Fourier est développée puisque le transfert de chaleur d’un bâtiment au sol et celui généré entre les boucles en U du système géothermique et le sol sont régis par le principe de conduction. De plus, un modèle thermique de bâtiment est développé pour une fondation reposant directement sur le sol. Les équations 2D et 3D sont évaluées pour une dalle sans épaisseur, ce qui revient à prendre la condition de température en surface égale à la température sous la dalle de béton. Cette température est déterminée par le modèle de Rantala (2005) où une couche d’isolant est présente sous la dalle, limitant les pertes de chaleur du bâtiment pour des climats froids comme au Québec.

L’installation de puits géothermiques se fait souvent dans les zones urbaines où l’espace disponible est limité, ce qui résulte en l’augmentation des interactions thermiques entre les puits voisins et par conséquent des profondeurs de puits supérieures. L’inclinaison des forages est donc de mise. Dans ce mémoire, l’équation de Marcotte et Pasquier (2009) est utilisée pour sa généralité. Finalement, les étapes menant au dimensionnement des puits géothermiques sont énumérées.

CHAPITRE 4

Méthodologie

Ce chapitre présente l'approche proposée du projet de maîtrise. De plus, les principaux éléments de l'implémentation de celle-ci sont décrits.

4.1 Approche proposée

Les modèles développés dans le cadre de cette étude permettent d'ajouter l'effet d'un bâtiment aux systèmes géothermiques verticaux et inclinés. Au chapitre 3, des équations permettant de calculer le flux d'une dalle de béton au sol à l'état stationnaire ont été présentées. Ces équations sont déterminées pour une profondeur ($z= 0$ m) et pour un domaine donné (dalle), ce qui limite le choix de la méthode. Afin de pouvoir superposer l'effet du bâtiment à un système géothermique, il faut avoir recours à la modélisation numérique.

La modélisation numérique offre la possibilité de produire un modèle de transfert de chaleur en intégrant toute l'information présente du modèle de base analytique (conditions frontières, présence de la dalle de béton et du mur, propriétés thermiques et équations régissant le phénomène). Toutefois, le modèle numérique nécessite des conditions frontières supplémentaires et il faudra vérifier l'influence de celles-ci.

L'approche proposée consiste à combiner un modèle numérique de bâtiment à un modèle analytique de système géothermique et ainsi bénéficier d'une plus grande rapidité d'exécution que si le tout était numérique. En utilisant le principe de superposition, les températures obtenues par le modèle numérique peuvent être additionnées à la réponse analytique des puits géothermiques. Un schéma de l'approche proposée est illustré à la figure 4.1

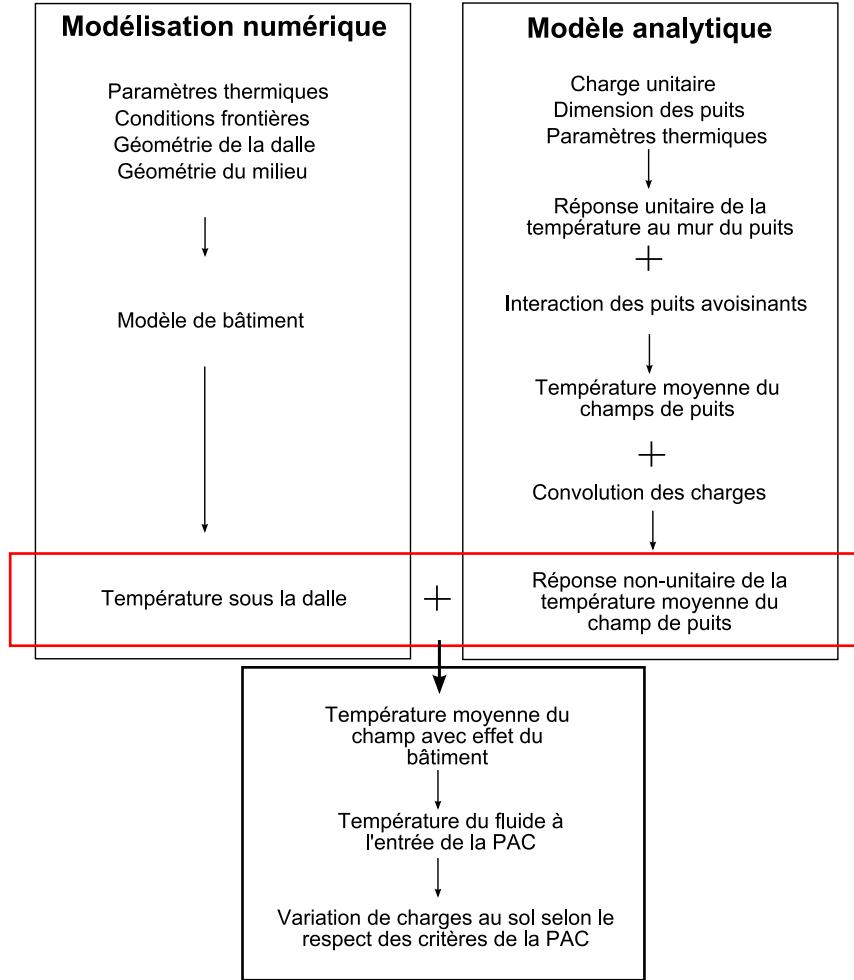


Figure 4.1 Schéma explicatif de l'approche proposée

4.1.1 Modélisation numérique par éléments finis

La méthode d'éléments finis (MEF) est utilisée pour obtenir les températures sous la dalle de béton. Le logiciel utilisé est *Comsol Multiphysics 3.4*. L'avantage majeur de ce logiciel est qu'il peut être utilisé directement à partir de *Matlab*, ce qui facilite grandement le traitement de données.

Le maillage est généré automatiquement par *Comsol*. On peut aussi contraindre manuellement la taille des éléments près des frontières importantes. Des tests préliminaires ont été réalisés afin de déterminer la taille des éléments permettant l'obtention de résultats stables. Les résultats sont calculés sur les noeuds du maillage et une interpolation est faite entre ceux-ci.

Le logiciel *Comsol* possède des gammes de phénomènes physiques différents. Dans le présent mémoire, le module d'application utilisé est le *Heat transfer* en mode conduction pure. Il convient de définir les deux types de conditions frontières qui régissent le système : les frontières de température constante et les frontières de flux fixe. Toutes les frontières, sauf les frontières de symétrie, ont des températures constantes. Pour les frontières de symétrie, la condition de flux nul est imposée.

Trois modèles numériques sont élaborés : deux en 2D et un en 3D. Les modèles 2D diffèrent dans leurs conditions frontières à la surface du sol. L'un des modèles possède une température constante en surface et le deuxième voit sa température varier en fonction des saisons. Les deux modèles sont comparés afin de voir l'influence de la variation de température en surface sur la distribution de température sous la dalle de béton. Le modèle 3D est le modèle que l'on superposera au modèle analytique de dimensionnement. Pour les 3 modèles, le sous-sol est considéré homogène, i.e. on néglige l'influence de la zone vadose et les variations stratigraphiques.

4.1.2 Réponse analytique d'un champ de puits géothermique

Après avoir modélisé l'effet du bâtiment avec un modèle numérique 3D, celui-ci peut être superposé à la réponse analytique des puits géothermiques. À noter qu'il s'agit-là d'une approximation puisque les interactions entre le système géothermique et la dalle sont négligées. Ainsi, les flux du système géothermique sont considérés constants le long du forage, qu'il y ait ou non une dalle. Cette hypothèse n'est pas vérifiée exactement.

Tout d'abord, le programme calcule la réponse unitaire de la moyenne de perturbation de température avec l'équation 3.37 selon les étapes énumérées dans la section 3.8. En utilisant le théorème de convolution (section 2.2), les températures pour une charge non-unitaire peuvent s'obtenir. L'évaluation des charges est présentée à la section 3.1.2. Ayant maintenant les températures moyennes à des temps donnés créées par la présence de puits géothermiques, la température du fluide à l'entrée de la pompe à chaleur (EWT) peut être déterminée et ainsi vérifier si la température limite d'entrée à la PAC en mode climatisation et chauffage est respectée. Les charges au sol sont ajustées lorsque les limites de la PAC ne sont pas respectées. Au final, pour un champ de puits prédéterminé, on obtient la charge fournie par le système géothermique et le système auxiliaire.

Au point de vue dimensionnement, la perturbation moyenne sur la longueur des forages apportée par le bâtiment s'ajoute directement à la température du sol non-perturbé.

CHAPITRE 5

Étude de cas synthétique

5.1 Modélisation d'un bâtiment en 2D

Le modèle 2D (figure 5.1) représente un bâtiment posé directement sur le sol. Le problème est simplifié en modélisant la moitié du problème, puisque celui-ci est symétrique. La dalle de béton, sans épaisseur et d'une longueur de 20 mètres, est située au centre d'un bloc de sol de 75 X 150 mètres. La dalle de béton et le mur (30 cm d'épaisseur) sont caractérisés par des frontières de température imposée. La température à la surface de la dalle de béton est considérée constante, tandis que la température dans le mur impose un gradient entre la température de la dalle de béton et la température à la surface du sol. À la surface du sol, la température est soit constante ou variante dans le temps. La frontière verticale représentant l'axe de symétrie du problème a une frontière de flux nul. Les deux autres frontières propres au bloc de sol ont une température constante égale à la température du sol non-perturbé. Les deux modèles servent à déterminer si les variations saisonnières de la température à la surface du sol vont influencer la distribution de température sous la dalle de béton. Le modèle comporte 7 969 éléments avec 31 456 degrés de liberté. Finalement, la solution en régime permanent est obtenue.

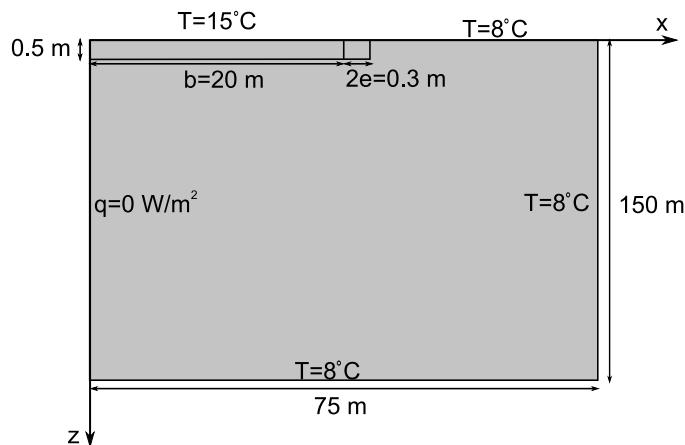


Figure 5.1 Modèle 2D de bâtiment à la surface du sol

5.1.1 Propriétés thermiques et conditions frontières

La température du sol non-perturbé est fixée à 8 °C, donc la frontière verticale de droite et la frontière horizontale du bas sont à 8 °C. La température à la surface de la dalle de béton est constante et égale à 15 °C (Rantala, 2005). Le gradient de température imposé entre la paroi intérieure et extérieure du bâtiment varie donc entre 15 °C et 8 °C. La frontière verticale située sur l'axe de symétrie est caractérisée par un flux nul. La conductivité thermique du sol utilisée est de 2.5 W/mK (Ji, 1999), la masse volumique est de 2.7 kg/m³ et la capacité calorifique du sol est de 750 J/kgK. Dans ce modèle les propriétés thermiques du mur du bâtiment sont considérées égales à celle du sol (Anderson, 1991).

5.1.2 Résultats

La distribution de température, en régime permanent, dans le bloc de sol avec l'effet de la dalle de béton est présentée à la figure 5.2. En surface de la dalle de béton, la température est de 15 °C (température imposée), plus la profondeur est grande et moins l'effet de la dalle est visible. Il y a donc dissipation de chaleur pour atteindre la température du sol non-perturbé, soit 8 °C. L'ajout d'une dalle de béton au modèle augmente la température moyenne du sol. Sur une profondeur de 150 mètres, longueur typique d'un puits géothermique, le profil de températures moyennes en fonction de la distance du centre de la dalle est présenté au graphique 5.3. La température moyenne la plus élevée est située au centre de la dalle et diminue en s'éloignant. Considérant qu'avant l'ajout de la dalle de béton la température du sol était uniforme et égale à 8 °C, l'ajout de la dalle de béton à la surface du sol fait augmenter la température moyenne du sol selon x de 1.05 °C à 1.48 °C sous la dalle. L'effet de la dalle se ressent jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 75 mètres, ainsi à 75 mètres on observe un écart relatif de 10% avec la température du sol non-perturbé. Plus le profil de température sera pris sur une faible profondeur, plus l'influence de la dalle sera importante (figure 5.10), il serait donc intéressant d'installer des puits plus courts afin de bénéficier de cette source de chaleur à son plein potentiel. Le modèle 2D surestime la température dans le sol puisque le modèle de bâtiment se prolonge à l'infini sur l'axe y.

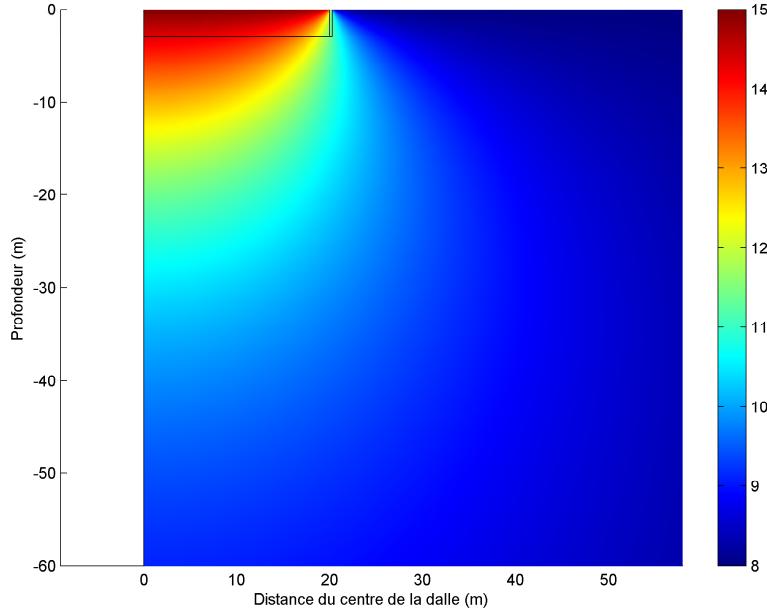


Figure 5.2 Distribution de température dans le bloc de sol à l'état stationnaire (zoom sur les 60 premiers mètres)

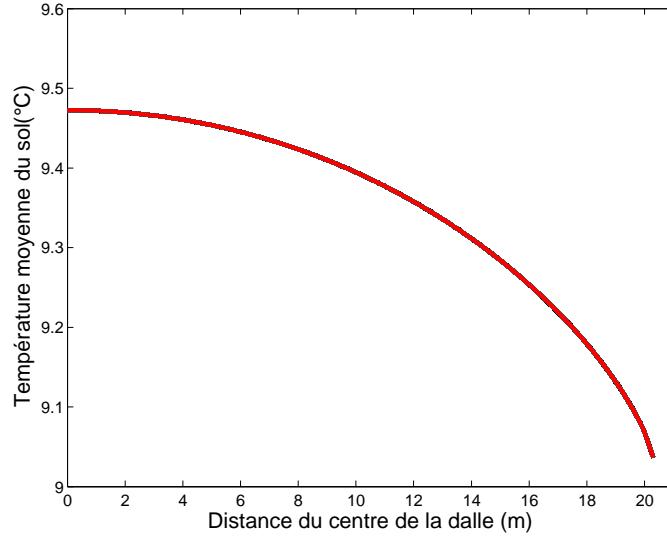


Figure 5.3 Température moyenne sur 150m en dessous de la dalle de béton selon x

5.1.3 Comparaison au modèle analytique stationnaire

Delsante *et al.* (1983) fournissent une équation analytique (équation 3.23) de l'intégrale du flux de chaleur (flux total) en W/m en régime stationnaire. Cette équation tire ses fondements de l'équation de conduction de Fourier avec des conditions frontières de température constante en surface du sol comme celles utilisées dans le modèle numérique (voir section 5.1). Les

détails mathématiques sont présentés à la section 3.5.1. Le modèle numérique, pour être valide, doit donc avoir un flux total semblable à celui obtenu avec l'équation de Delsante *et al.* (1983). La coupe du sol de la figure 5.4 montre les vecteurs du flux, ce qui indique qu'en se rapprochant du mur ($x=20\text{m}$), le flux nécessaire pour maintenir la dalle à $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ est plus grand. La frontière à la surface impose une température de $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui induit une différence de température plus grande près de la frontière du mur et par conséquent un flux plus grand. À la frontière de la dalle, l'intégrale du flux entrant dans le sol obtenue par le modèle numérique pour une longueur de 1 mètre est égale à 55.33 W/m . L'équation analytique donne un flux de 58.01 W/m . L'erreur relative entre les deux flux est de 4.6%, une différence jugée acceptable. Le flux entrant dans le sol du modèle numérique est de 2.77 W/m^2 pour une longueur de 20 mètres. Le flux géothermique varie selon la région tectonique. Comme le Canada est l'un des plus stables continents, son degré de tectonisme est faible. Par conséquent les flux géothermiques sont faibles variant entre 0.015 W/m^2 et 0.025 W/m^2 (Giordanengo, 2009). Le flux d'une dalle est donc nettement plus élevé que celui correspondant au flux géothermique.

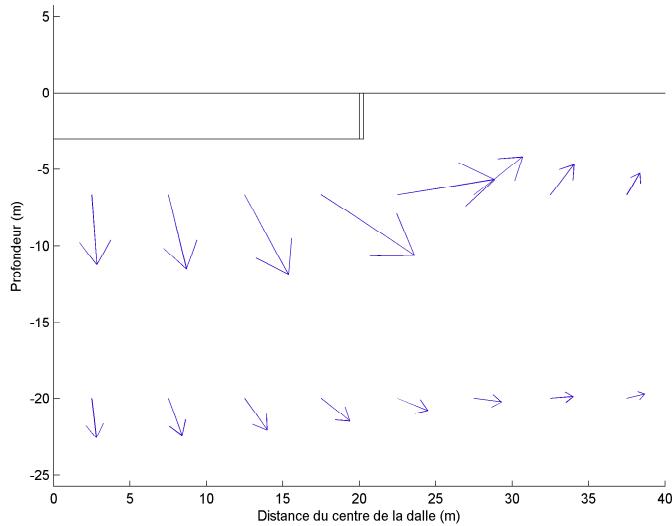


Figure 5.4 Vecteurs proportionnels du flux de chaleur en W/m^2 (petite flèche : 0.135 W/m^2 , grande flèche : 0.670 W/m^2)

5.2 Condition de température variable en surface du sol

Le modèle numérique 2D est le même que celui présenté à la section précédente. Toutefois la condition frontière à la surface du sol change. Le but est de déterminer l'effet des saisons sur la distribution de la température sous la dalle de béton, il faut donc dans un premier temps

modéliser la surface du sol ayant une température constante et ensuite faire un deuxième modèle où la température en surface fluctue. Une comparaison des profils de température est ensuite réalisée pour déterminer si l'influence des variations saisonnières est un facteur important dans le dimensionnement des systèmes géothermiques construits sous bâtiment. Les deux modèles sont évalués en mode transitoire sur une période de dix ans.

5.2.1 Propriétés thermiques et conditions frontières

Les propriétés thermiques et géologiques du sol restent les mêmes que dans le cas du modèle du bâtiment en 2D (voir section 5.1). Le seul changement se situe au niveau de la condition frontière en surface du sol. Dans le premier cas, la température est constante et égale à 8 °C et dans le deuxième cas la température suit une fonction périodique calquée sur des données horaires de températures de l'année 1996 mesurées à l'aéroport de Dorval (E.C., 2004).

5.2.2 Cas 1. Température constante

Le modèle de température constante est identique au modèle de la section 5.1 soit un bâtiment posé directement sur le sol. Les conditions frontières sont celles de la section 5.1.1. Le modèle est toutefois évalué en mode transitoire, afin de le comparer au modèle à température variable.

Résultats

Après une simulation portant sur 10 ans, les profils de température pour différentes positions par rapport au centre de la dalle sont illustrés sur la figure 5.5. Comme attendu, les températures au centre de la dalle sont plus élevées que celles à l'interface entre la dalle et le mur. Ceci est expliqué par la condition de température en surface du sol qui est plus froide que celle en surface de la dalle de béton. Plus on se rapproche du mur, plus l'influence de la surface devient importante et donc le profil de température en est affecté. Notons ici que si le bâtiment était plus petit, l'influence de la surface se ferait ressentir encore sur une plus grande distance sous la dalle.

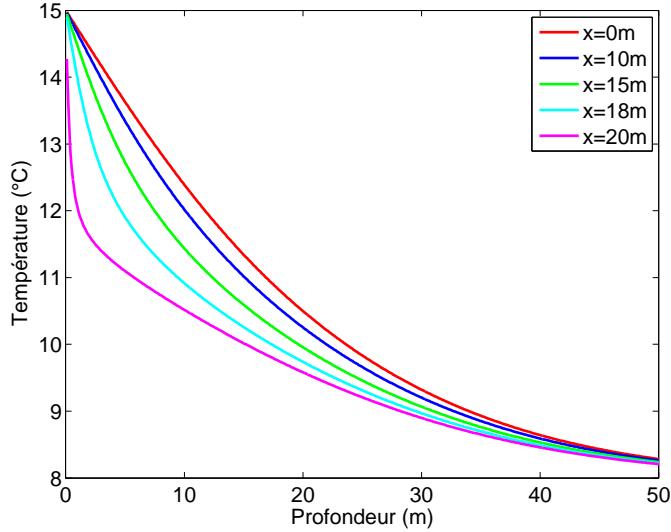


Figure 5.5 Profils de température sous la dalle de béton en fonction de la profondeur à différentes positions sous la dalle avec une condition de température constante en surface du sol ($t=87\ 600$ heures)

5.2.3 Cas 2. Fluctuation de la température

Le modèle de simulation est basé sur les données horaires de 1996 de l'aéroport Dorval (E.C., 2004) à Montréal. Le modèle est périodique et stationnaire basé sur l'équation de Ingersoll (Ingersoll *et al.*, 1954) présentée à la section 3.3. La moyenne de température de l'année 1996 est de 8 °C, l'onde de chaleur oscille donc autour de cette moyenne de température. L'amplitude par rapport à la température moyenne annuelle choisie pour calquer les données de température est de 15 °C et l'amplitude par rapport à la température moyenne journalière est de 8 °C. La conductivité thermique du sol utilisée est de 2.5 W/mK (Ji, 1999), la masse volumique est de 2.7 kg/m³ et la capacité calorifique du sol est de 750 J/kgK, comme dans le modèle de base. Le modèle est illustré en bleu sur le graphique 5.6 et les données horaires de température de 1996 sont illustrées en rouge.

Résultats

Sur le graphique 5.7, les profils de température pour différentes positions par rapport au centre de la dalle sont illustrés. L'effet de la fluctuation de température se traduit sur le profil de température comme une onde amortie dans le sol. Pour une période d'onde d'un an, la profondeur d'influence de l'onde est de l'ordre de 15 à 20 mètres (Giordanengo, 2009). Au delà de cette profondeur, l'amplitude de l'onde est atténuée de plus de dix fois son amplitude initiale. Son influence sur la température du sol est considérée négligeable. La variation de

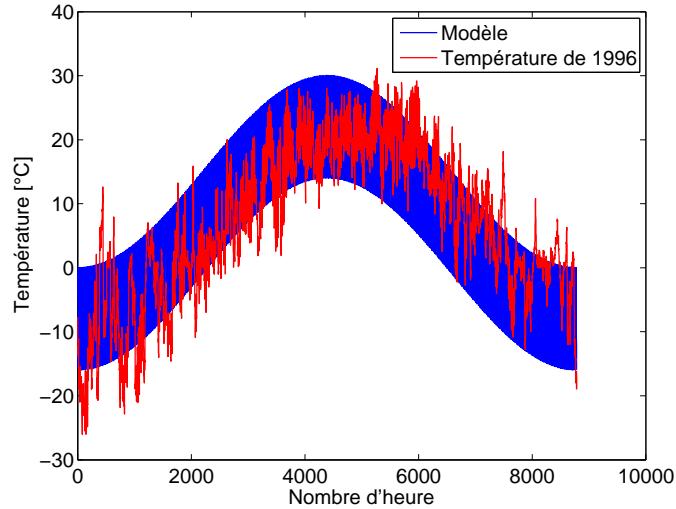


Figure 5.6 Modèle basé à partir des données horaires de température de 1996

température en surface se fait ressentir seulement en périphérie du bâtiment. À 5 mètres du mur, le profil de température est presque lisse, il y a donc peu d'influence de la variation annuelle de la température en surface du sol. La différence maximale de température du sol entre l'hiver et l'été à 5 mètres du mur est de 0.58 °C. Évidemment, plus le bâtiment sera petit et plus les fluctuations de la température auront de l'influence sous le bâtiment. Comme les effets de la variation de température à la surface du sol influencent la distribution de température sur une certaine distance sous le bâtiment, les petits bâtiments comme les maisons ne seront pas de bons candidats pour bénéficier de l'échange thermique maximal entre la dalle de béton et les puits géothermiques.

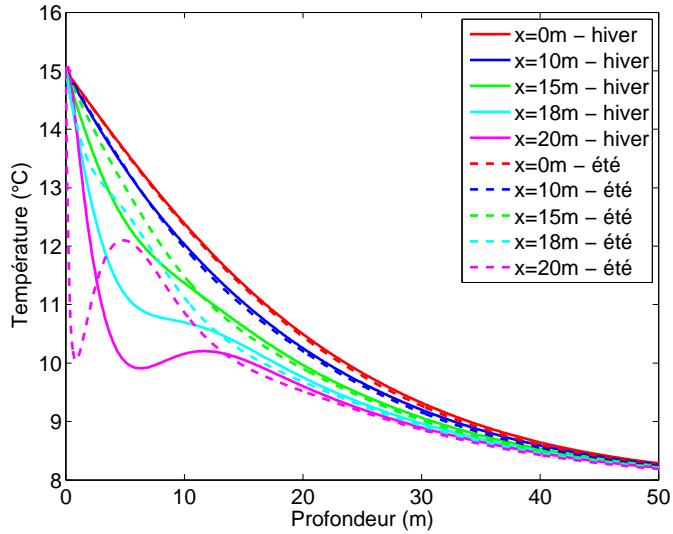


Figure 5.7 Profils de température sous la dalle de béton en fonction de la profondeur à différentes positions sous la dalle avec une condition de température variable en surface du sol ($t_{\text{hiver}} = 87\ 600$ heures, $t_{\text{été}} = 83\ 280$ heures)

5.2.4 Discussion

En juxtaposant les graphiques des figures 5.5 et 5.7, on obtient la figure 5.8. Afin de ne pas surcharger le graphique, seules les températures en hiver sont illustrées. Il est plus facile de voir que l'effet des variations annuelles dans le présent cas a des répercussions jusqu'à 5 mètres sous la dalle, pour un point situé à 15 mètres du centre de la dalle. Au delà de 15 mètres du centre de la dalle, la différence entre les deux modèles est supérieure à 2%. Malgré les variations de profils entre les deux cas, la température moyenne sur 150 mètres à 87 600 heures ne varie que très peu. À la limite intérieure du mur ($x=20m$) après dix ans de simulation, la température moyenne pour une condition frontière de température constante en surface du sol est de 8.51 °C, tandis que pour la température qui fluctue annuellement la température moyenne est de 8.49 °C. L'erreur relative est donc de 0.23%, ce qui est très faible. Même si la moyenne de température est prise sur une plus petite profondeur (50m), l'erreur relative est toujours minime, soit de 0.63%. En disposant le système géothermique sous le bâtiment, il devient possible de négliger l'effet des saisons lors du dimensionnement des systèmes géothermiques.

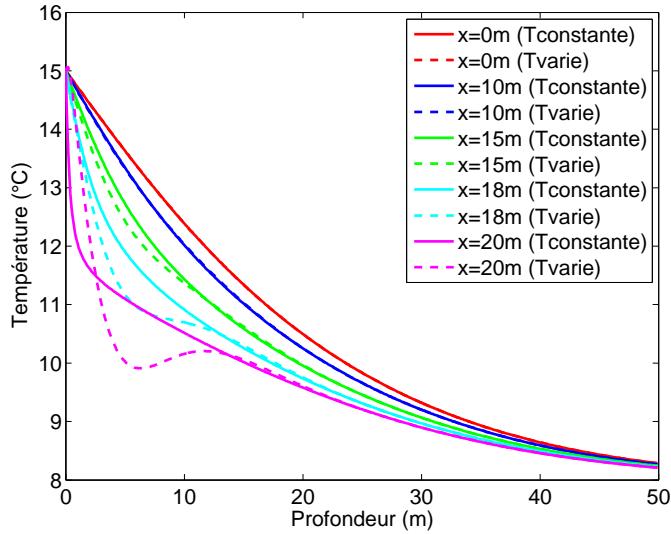


Figure 5.8 Comparaison des profils de température sous la dalle de béton en fonction de la profondeur à différentes positions sous la dalle et de la condition de température en surface du sol ($t_{\text{hiver}} = 87\,600$ heures)

5.2.5 Température moyenne le long d'un puits

À la figure 5.9, les températures moyennes le long d'un puits vertical selon la longueur du puits sont illustrées. Selon la période de l'année (hiver ou été), la température du sol change. Lorsqu'une dalle de béton est disposée à la surface du sol, la température moyenne sous celle-ci ne varie pas dans le temps (section 5.2.4). On note que globalement l'effet de la dalle augmentera la température moyenne le long d'un puits. La figure 5.10 illustre la variation de température moyenne entre le cas d'un puits situé sous le centre d'une dalle de béton ($x=0$) et le cas sans dalle avec des variations périodiques. Le tout est obtenu en soustrayant sur la figure 5.9 la courbe avec dalle des courbes sans dalle. La différence de température moyenne avec et sans dalle est plus grande en hiver qu'en été. Les écarts de températures moyennes sont maximums en hiver pour des puits courts, ce qui est bénéfique puisque l'hiver la chaleur est puisée dans le sol. En été, la température moyenne augmente aussi, mais de beaucoup moins. Dans ce cas, la dalle réduit l'échange thermique, puisque l'été on rejette la chaleur dans le sol. La figure 5.10 montre que l'effet des variations de température en surface est relativement mineur par rapport à l'effet d'une dalle dès que les forages ont quelques dizaines de mètres de longueur. À environ 50 mètres de profondeur, le gain de température du sol est d'environ 3.5 °C par rapport à la température du sol non-perturbé de 8 °C. Pour des forages plus long de l'ordre de 150 mètres, la température du sol augmente d'environ 1.5 °C. Dans ce cas-ci, l'influence du bâtiment se traduit à de grandes profondeurs. Pour des dimensions de bâtiments plus petites, la perturbation du sol ne se traduit pas de façon significative à

d'aussi grandes profondeurs (section 5.3.3).

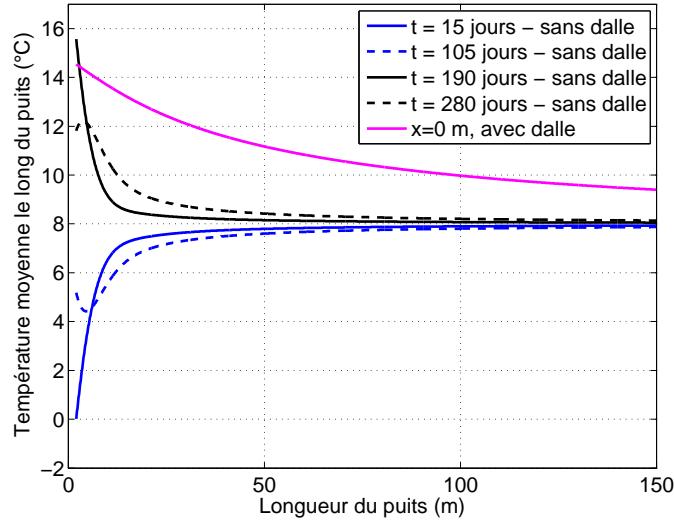


Figure 5.9 Variation de la température moyenne le long d'un puits selon sa longueur en incluant les variations saisonnières et distribution de température au centre de la dalle

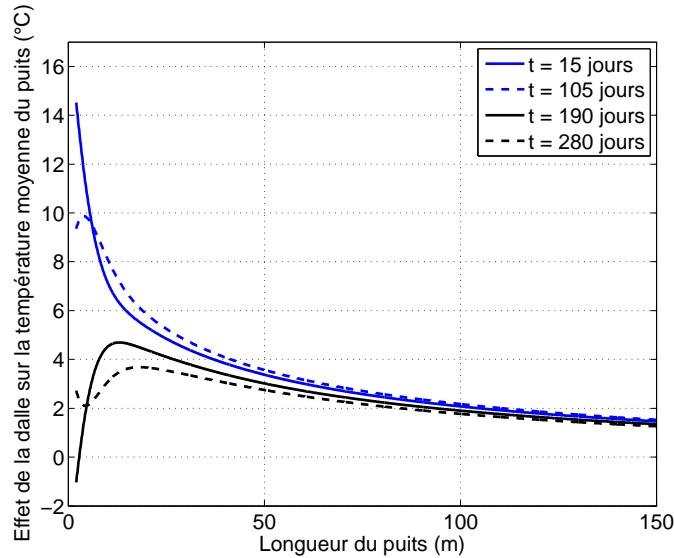


Figure 5.10 Effet de la dalle sur la température moyenne du puits pour différents temps

5.3 Modèle 3D

D'après les résultats obtenus avec les modèles 2D, il est maintenant possible d'extrapoler le problème en 3D. Avec le modèle 2D du bâtiment (5.1), on a démontré que l'effet de la

dalle augmentait la température du sol sous la fondation. Par la suite en comparant un modèle de température variable en surface au modèle de température constante, on a conclu que l'effet des variations annuelles de températures est négligeable sous le bâtiment et que l'approximation de température constante est suffisante. En se basant sur ces résultats, le modèle 3D peut donc être simplifié et ainsi réduire les temps de simulation en posant le modèle comme étant stationnaire. Le modèle comporte 59 373 éléments avec 87 351 degrés de liberté.

5.3.1 Description du modèle numérique 3D

Le modèle 3D (figure 5.11) représente un bâtiment dont la fondation repose dans le sol. Le problème est simplifié en modélisant le quart du problème, puisque celui-ci est symétrique. La dalle de béton est sans épaisseur et d'une longueur de 10 mètres par 20 mètres située dans un bloc de sol de 50 X 50 X 200 mètres. Contrairement au modèle 2D, puisque dans la réalité des climats nordiques la fondation ne repose pas directement à la surface du sol, le modèle 3D a sa fondation à 3 mètres de profondeur. Celle-ci a été choisie afin d'éviter l'effet du gel/dégel sur la structure. La dalle de béton et le mur sont caractérisés par des frontières de température constante. Le modèle utilisé ici n'inclut pas l'épaisseur du mur, celui-ci étant remplacé par une condition de température constante. Dans la section 3.6.1, on a estimé la température sous la structure de fondation et celle-ci sera utilisée comme condition de température pour le bâtiment. Les frontières verticales représentant l'axe de symétrie du problème ont une frontière de flux nul. Les autres frontières propres au bloc de sol ont une température constante égale à la température du sol non-perturbé. Le régime est stationnaire.

5.3.2 Propriétés thermiques et conditions frontières

La température du sol non-perturbé est fixée à 8 °C. La température à la surface de la dalle de béton et des murs est constante et égale à 15 °C (Rantala, 2005). La conductivité thermique du sol utilisée est de 2.5 W/mK (Ji, 1999), la masse volumique est de 2.7 kg/m³ et la capacité calorifique du sol est de 750 J/kgK. Dans ce modèle les propriétés thermiques du mur du bâtiment sont considérées égales à celle du sol (Anderson, 1991). Les frontières verticales représentant l'axe de symétrie du problème ont une frontière de flux nul. Les autres frontières propres au bloc de sol ont une température constante égale à la température du sol non-perturbé soit de 8 °C.

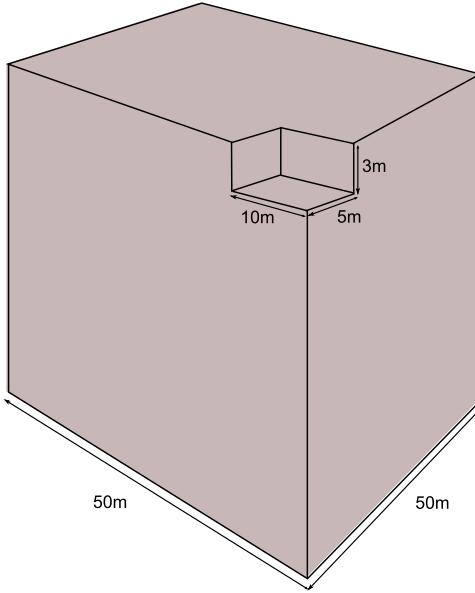


Figure 5.11 Modèle 3D de bâtiment avec dalle dans le sol

5.3.3 Résultats

La distribution de température dans le bloc de sol est illustrée à la figure 5.12. La perturbation apportée par la dalle est présentée à la figure 5.13. La température moyenne sous la dalle à l'état stationnaire passe de 9.2 °C à 8.4 °C d'une profondeur de 50 mètres à une profondeur de 150 mètres. Comme mentionné dans l'approche proposée, la superposition du modèle numérique se fait sur la température moyenne le long d'un puits et plus celui-ci sera situé près du centre de la dalle, plus la température sera influencée par le bâtiment. Dans cette optique, pour bénéficier de l'interaction thermique maximale, les puits devraient être positionnés près du centre du bâtiment. On peut alors négliger les effets des saisons, même pour des forages courts.

Pour les dimensions de bâtiment choisies, on peut gagner jusqu'à 1.3 °C pour des puits de 50 mètres situés au centre du bâtiment (figure 5.13). La température moyenne sous l'ensemble de bâtiment pour une profondeur de 50 mètres est de 1.2 °C. La différence entre les deux courbes est faible, de l'ordre de 0.1 °C, ce qui permet d'approximer la distribution de température moyenne le long des puits par la température moyenne sous la dalle lorsque de nombreux puits sont présents. Pour une dalle plus grande, comme celle du cas en 2D de la figure 5.10, on gagne environ 3.5 °C au centre de la dalle pour 50 mètres des forages. La surface du bâtiment en contact avec le sol est donc un facteur prépondérant sur la quantité de chaleur transmise à celui-ci. Notons ici qu'on parle de surface de contact et non pas de dimension du

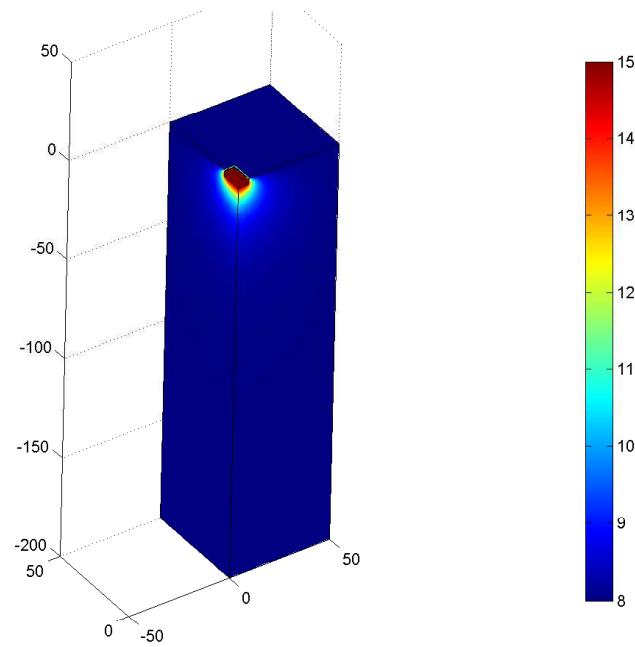


Figure 5.12 Distribution de température dans le sol provenant du modèle 3D en régime stationnaire

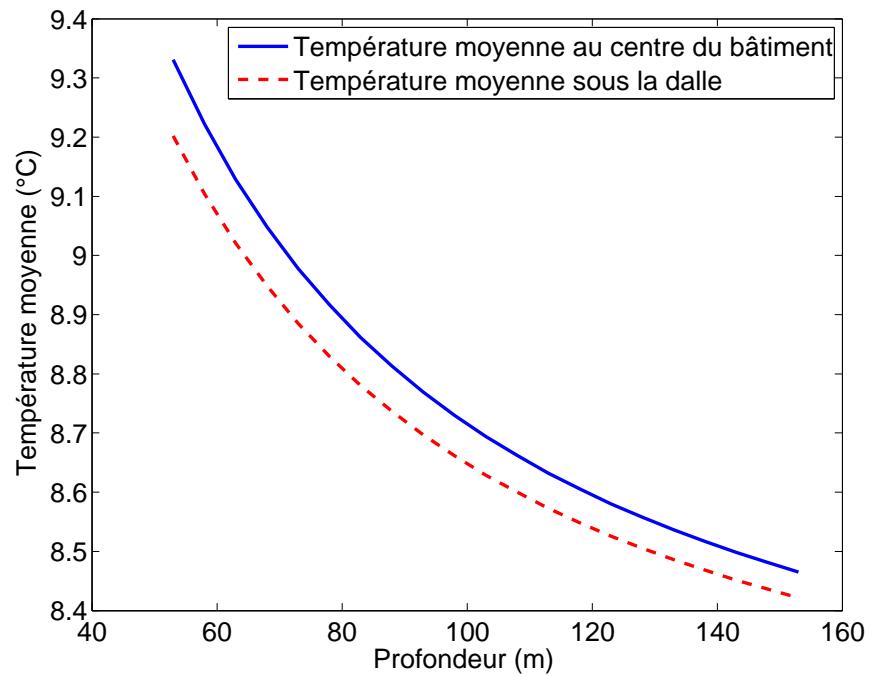


Figure 5.13 Température moyenne intégrée jusqu'à la profondeur indiquée en abscisse à la verticale du centre de la dalle (-) et moyenne dans le cube sous la dalle (-)

bâtimen. Puisque pour une même dimension de bâtimen, si celui-ci est posé dans le sol, la quantité de chaleur amenée au sol sera plus importante que s'il est située en surface du sol.

5.4 Dimensionnement - Puits verticaux

5.4.1 Description du modèle 3D

Le modèle numérique 3D est celui décrit dans la section 5.3. Le modèle analytique est composé de puits verticaux situés au centre du bâtimen à une profondeur de 3 mètres dans le sol. Les critères à respecter pour la PAC sont énumérés ci-dessous :

- EWT en climatisation est de 35 °C et en chauffage est de 0 °C.
- La charge totale maximale de la PAC en mode climatisation est de 12kW et -12kW en mode chauffage ($\pm 3\text{kW}/\text{puits}$).
- Les COP sont fonction de la température du fluide à l'entrée de la PAC (EWT) et varient entre 3 et 3.9 (figure 5.14).

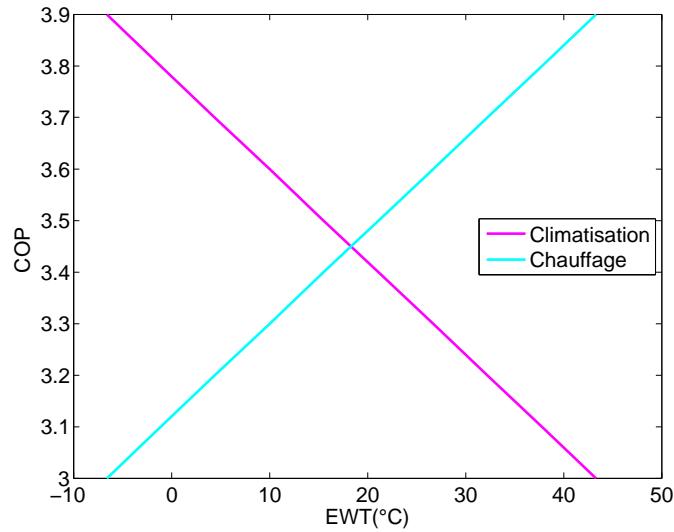


Figure 5.14 COP en climatisation et en chauffage

L'effet de la dalle est ajouté à la température du sol non-perturbé à chaque puits en calculant pour chaque position de puits la température moyenne le long du puits à une distance r_b de son centre.

La distance entre les puits est de 3 mètres. La disposition des puits est illustrée à la figure 5.15, le point (0,0) représente le centre de la dalle. La longueur des puits est de 50 mètres.

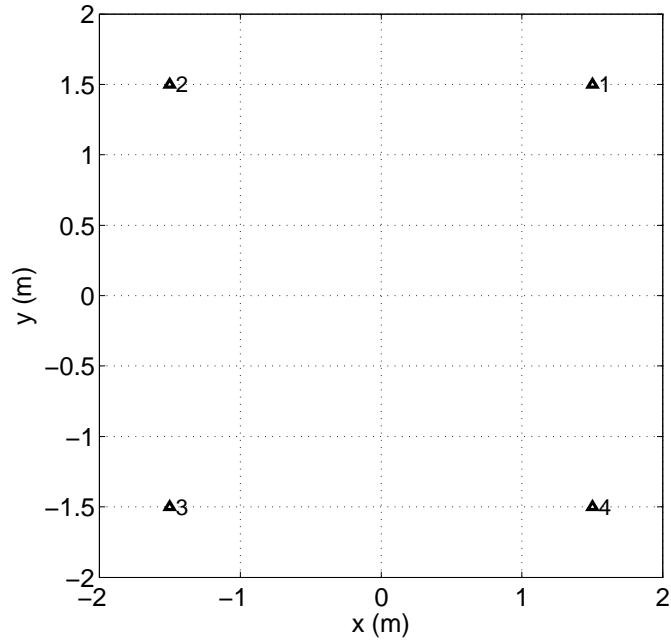


Figure 5.15 Position des puits

5.4.2 Cas 1. Sans bâtiment

Au départ, on simule le système géothermique traditionnel, c'est-à-dire sans l'effet du bâtiment. La charge du bâtiment est déterminée pour obtenir environ 50% à 70% de charge fournie par le système géothermique. Les résultats futurs sont exprimés en terme de pourcentage d'autonomie. Le pourcentage d'autonomie du système géothermique est déterminé par le ratio entre la charge que la géothermie peut supporter en tenant compte des limites de la PAC et la demande réelle du bâtiment. Une autonomie de 70% indique que le système géothermique subvient à 70% de la demande énergétique totale du bâtiment et que les 30% manquants sont comblés par un système auxiliaire. Les deux modèles sans bâtiments à puits verticaux constituent les références pour les comparaisons futures.

Cas 1a. Charges portées au sol déséquilibrées en mode chauffage

Le profil de charges synthétiques transmises au sol par puits est illustré à la figure 5.16 et représente un mode chauffage dominant. Le profil est déterminé par l'équation 3.1 pour les paramètres suivants : $A = -20$, $B = 90$, $C = 40$, $D = 20$ et $Cte = 11.782$. La constante Cte contrôle l'amplitude des charges.

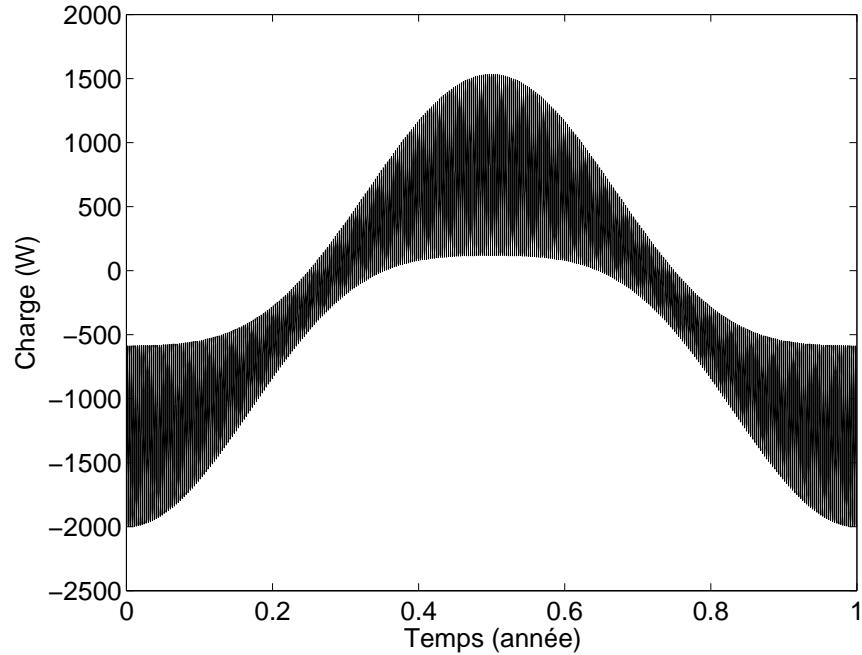


Figure 5.16 Cas 1a. Profil de charges transmises au sol déséquilibrées en mode chauffage par puits

Sur la figure 5.17(a), on observe qu'après 10 ans de fonctionnement du système géothermique, la charge minimale fournie par le système est de 50.8% en hiver et 100% en été. La température à l'entrée de la PAC est illustrée à la figure 5.17(b). La limite supérieure de la PAC est respectée en tout temps, tandis que la limite inférieure n'est pas respecté en hiver et les charges sont ajustées en conséquences et fournies par le système auxiliaire. Sur la figure 5.17(c) on observe la portion des charges supportées par le système géothermique, celles-ci ne dépassent pas les critères limites de la PAC, soient -3000W en chauffage et 3000W en climatisation par puits. Comme le système est dominé par le chauffage, un déséquilibre de charges est porté au sol. Ce déséquilibre fait diminuer la température d'entrée à la PAC dans le temps et par conséquent le système géothermique devient de moins en moins autonome. On observe ce phénomène sur la figure 5.17(b). La diminution de EWT est visible sur la première année et semble se stabiliser par la suite. Cette répercussion se voit sur le pourcentage de la charge du bâtiment fournie par puits (figure 5.17(a)). Le pourcentage moyen d'autonomie après 9 ans de durée d'opération en hiver est de 85.7%.

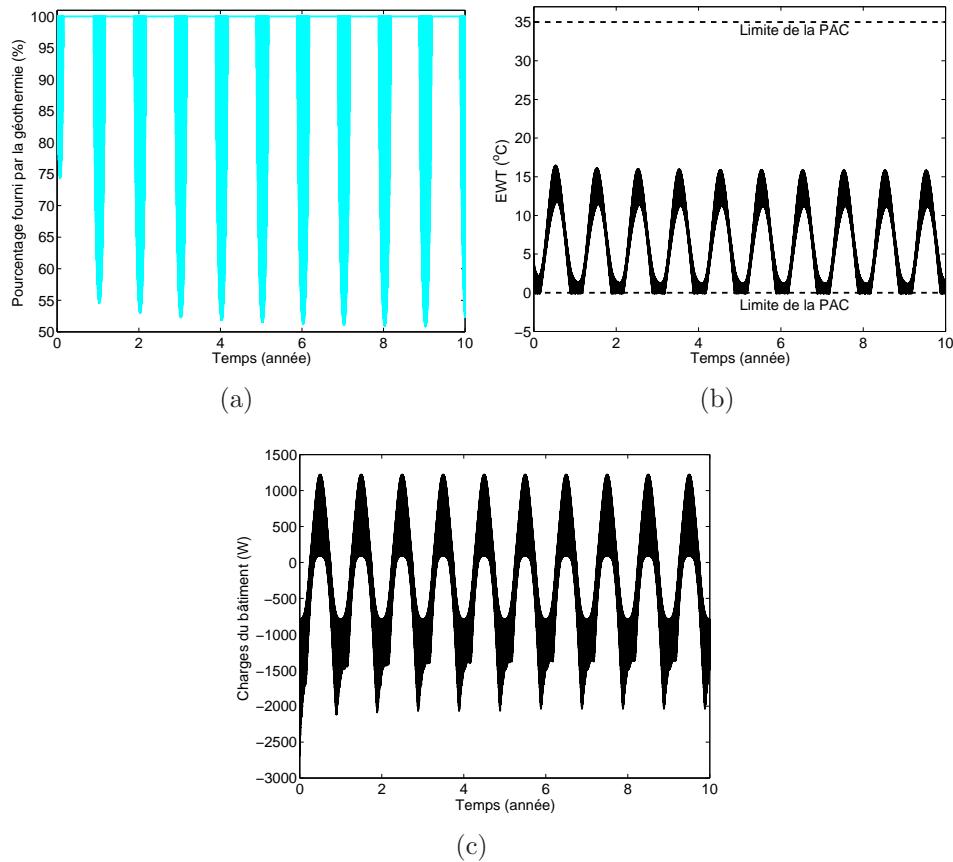


Figure 5.17 Cas 1a. Sans bâtiment pour des puits verticaux (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits

Cas 1b. Charges portées au sol déséquilibrées en mode climatisation

Le profil de charges synthétiques transmises au sol par l'ensemble des puits est illustré à la figure 5.18 et présente un mode climatisation dominant. Le profil est déterminé par l'équation 3.1 pour les paramètres suivants : $A = 80$, $B = 130$, $C = 50$, $D = 25$ et $Cte = 11.782$.

Le mode climatisation dominant se traduit sur la courbe EWT par une augmentation dans le temps, contrairement au mode chauffage dominant(5.19). Sur la figure 5.19(b), on note que le design du système est désormais limité par la température supérieure de la PAC. Dès la deuxième année, le champ de puits ne subvient plus à la demande énergétique du bâtiment en été. Après 10 ans de roulement du système, l'autonomie minimale en est réduite à 77.9%. On voit bien cette décroissance sur la courbe de charges du bâtiment fournies par la géothermie (figure 5.19(c)). Le pourcentage moyen d'autonomie après 9 ans de durée d'opération en été est de 95.8%.

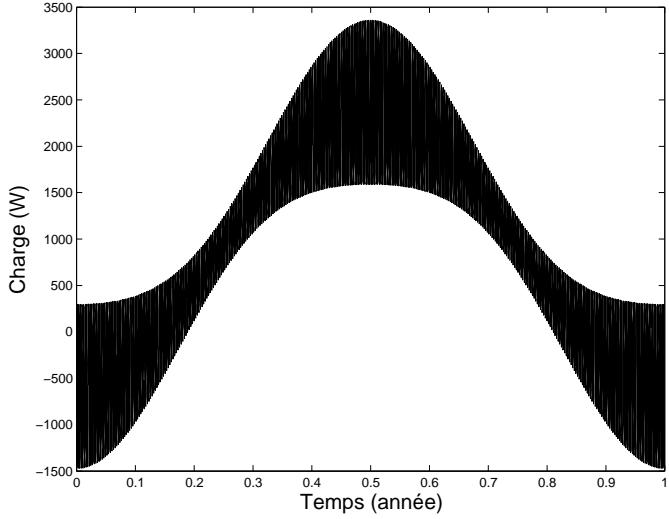


Figure 5.18 Cas 1b. Profil de charges transmises au sol déséquilibrées en mode climatisation par puits

5.4.3 Cas 2. Avec bâtiment

Le modèle avec bâtiment superpose le modèle analytique de la section précédente avec le modèle numérique de la section 5.3.

Cas 2a. Charges portées au sol déséquilibrées en mode chauffage

Sur la figure 5.20(a), on observe qu'après 10 ans de fonctionnement du système géothermique, la charge minimale fournie par le système est de 61.5% en hiver et 100% en été. Le pourcentage moyen d'autonomie après 9 ans de durée d'opération en hiver est de 92.4%. La température à l'entrée de la PAC est illustrée à la figure 5.20(b). De même que pour le cas traditionnel, la limite supérieure de la PAC est respectée en tout temps. La limite inférieure de la PAC n'est pas respectée en hiver et les charges sont donc ajustées. Sur la figure 5.20(c) on observe la portion des charges par puits supportées par le système géothermique.

Cas 2b. Charges portées au sol déséquilibrées en mode climatisation

De même que dans le cas sans bâtiment, le système géothermique est limité par la borne supérieure de EWT (figure 5.21(b)). Dès la première année, le champ de puits ne subvient plus à la demande énergétique du bâtiment en été. Après 10 ans de roulement du système, l'autonomie minimale en est réduite à 71.3%, il faut donc que le système auxiliaire fournisse 28.7% de l'énergie demandé en été (figure 5.21(c)). Le pourcentage moyen d'autonomie après 9 ans de durée d'opération en été est de 92.5%.

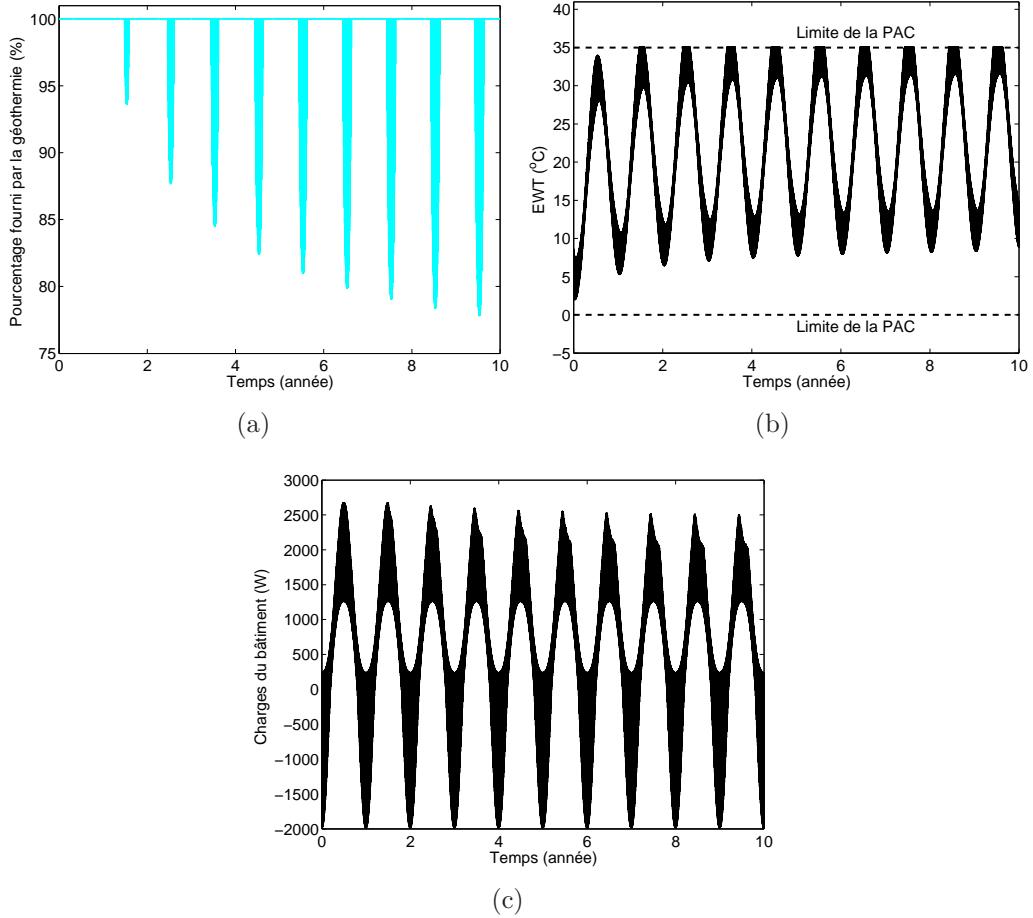


Figure 5.19 Cas 1b. Sans bâtiment pour des puits verticaux (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits

5.4.4 Discussion

En comparant le cas avec bâtiment et le cas traditionnel, on remarque que pour le premier cas de charge synthétique, le positionnement du système géothermique sous la fondation du bâtiment est favorable. Le système passe d'une autonomie minimale de 50.8% à 61.5%. En prenant le pourcentage moyen après 9 ans de simulation en hiver, on obtient une autonomie passant de 85.7% à 92.4%, une augmentation de l'ordre de 6.7%. Le résultat était prévisible puisque la charge synthétique dominait en chauffage. L'augmentation de la température du sol suite à l'ajout du bâtiment dans ce cas augmente la température d'entrée à la PAC, ce qui permet une diminution des charges fournies par le système auxiliaire en hiver et une augmentation de la durée de fonctionnement du système géothermique.

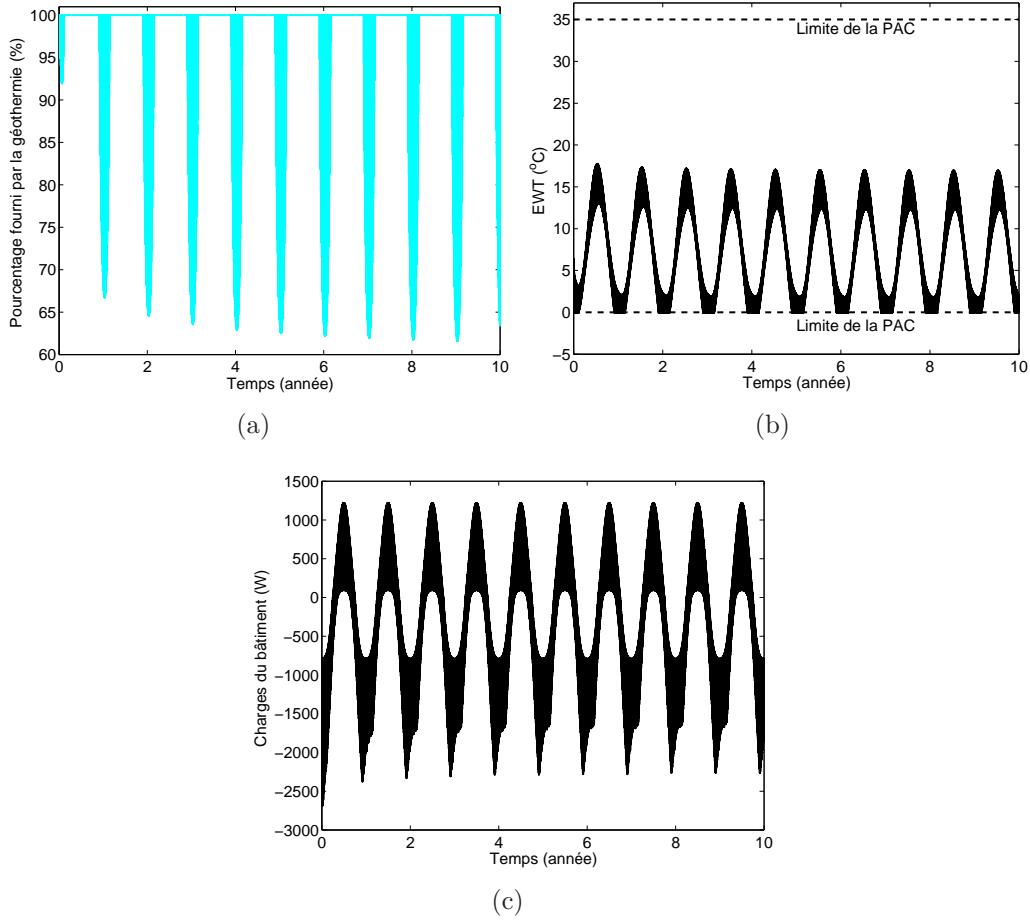


Figure 5.20 Cas 2. Avec bâtiment pour des puits verticaux (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits

Au contraire, le deuxième cas montre que l'effet de la dalle est négatif puisque celle-ci augmente la température du sol et par conséquent la température d'entrée à la PAC. Dans un mode de climatisation dominant, la courbe EWT tend à augmenter dans le temps, ce qui accélère l'atteinte de la limite supérieur de la PAC. Le cas échéant, l'ajout de la dalle ne fait que diminuer l'autonomie minimale du système passant de 77.9% à 71.3%. En prenant le pourcentage moyen après 9 ans de simulation en été, on obtient une autonomie passant de 95.8% à 92.5%, une diminution de l'ordre de 3.3%.

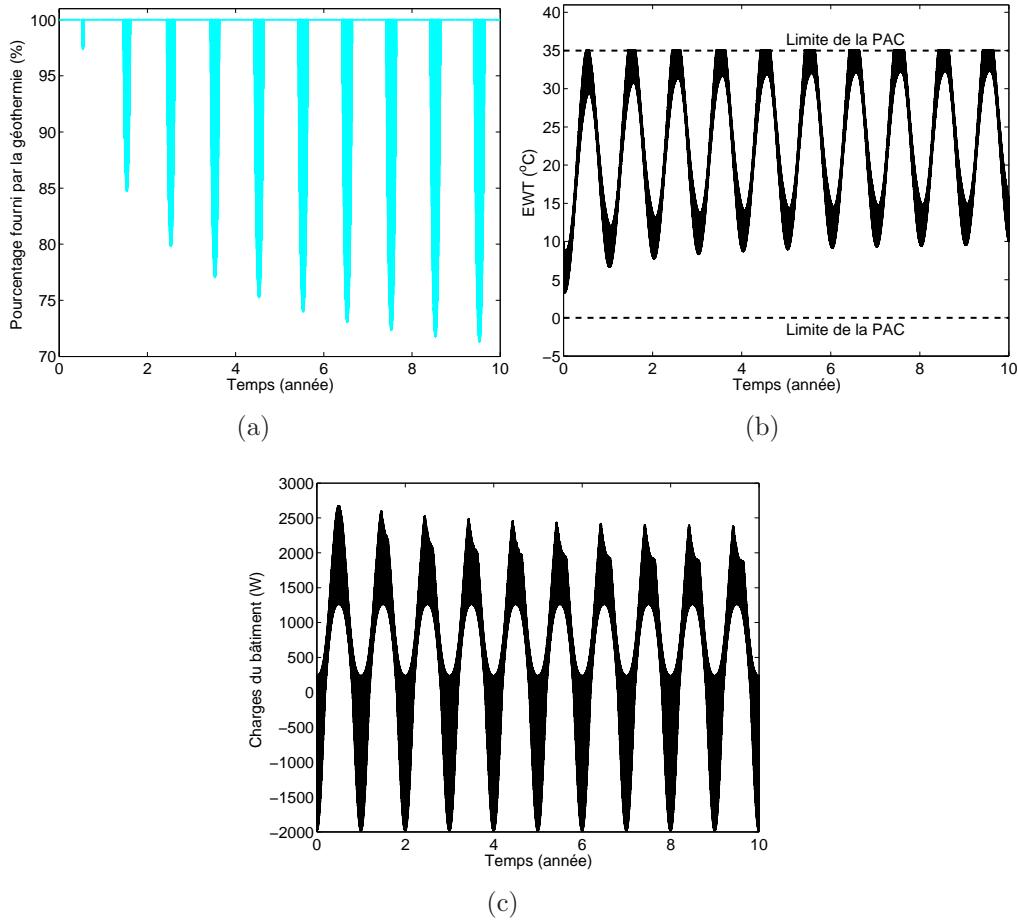


Figure 5.21 Cas 2. Avec bâtiment pour des puits verticaux (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits

5.5 Dimensionnement - Puits inclinés

5.5.1 Description du modèle 3D

Le modèle numérique utilisé est identique à celui de la section précédente. La portion analytique diffère dans l'inclinaison des puits. Les puits ont un pendage de 70 degrés vers l'extérieur et sont disposés à 3 mètres de profondeur sous la structure de fondation du bâtiment. Les critères de la PAC sont les mêmes que pour le cas des puits verticaux. L'effet de la dalle est aussi additionné à la température du sol non-perturbé en faisant la moyenne de la température du sol au mur de chaque puits. La disposition des puits est celle de la figure 5.15.

5.5.2 Cas 1. Sans bâtiment

Au départ, on simule le système géothermique traditionnel, c'est-à-dire sans l'effet du bâtiment comme mentionné dans la section 5.4.2.

Cas 1a. Charges portées au sol déséquilibrées en mode chauffage

Le profil de charges synthétiques est illustré à la figure 5.16 et présente un mode chauffage dominant. On prend ici le même profil de charges pour ensuite comparer l'effet de l'inclinaison des puits sur le dimensionnement des systèmes géothermiques.

Après 10 ans de simulation et pour les propriétés énumérées ci-haut, l'autonomie minimale du système géothermique est de 62.9% (figure 5.22(a)). Le pourcentage moyen en hiver de la charge fournie par la géothermie est de 92.7% après la neuvième année de simulation. La température à l'entrée de la PAC est illustrée à la figure 5.22(b). La limite inférieure de la PAC n'est pas respectée en hiver et les charges supplémentaires sont supportées par le système auxiliaire. Sur la figure 5.22(c) on observe la portion des charges par puits fournies par le système géothermique.

Cas 1b. Charges portées au sol déséquilibrées en mode climatisation

La charge synthétique est la même que celle de la section 5.4.2. Pour des puits inclinés, l'échangeur thermique répond à 100% de la demande énergétique sur une durée de 10 ans. Il y a augmentation de la température du fluide à l'entrée de la pompe à chaleur sur les 4 premières années et ensuite celle-ci se stabilise, sans atteindre les limites de la PAC. Les courbes de EWT et de la charge du bâtiment fournie par le système géothermique sont illustrées à la figure 5.23.

5.5.3 Cas 2. Avec bâtiment

Le modèle avec bâtiment superpose le modèle analytique de la section précédente avec le modèle numérique de la section 5.3.

Cas 2a. Charges portées au sol déséquilibrées en mode chauffage

Après 10 ans de simulation, l'autonomie minimale du système géothermique est de 77.6% (figure 5.24(a)). Le pourcentage moyen en hiver de la charge fournie par la géothermie est de 97.8% après neuf ans de simulation. La température à l'entrée de la PAC est illustrée à la figure 5.24(b). La limite inférieure de la PAC n'est pas respectée en hiver et les charges

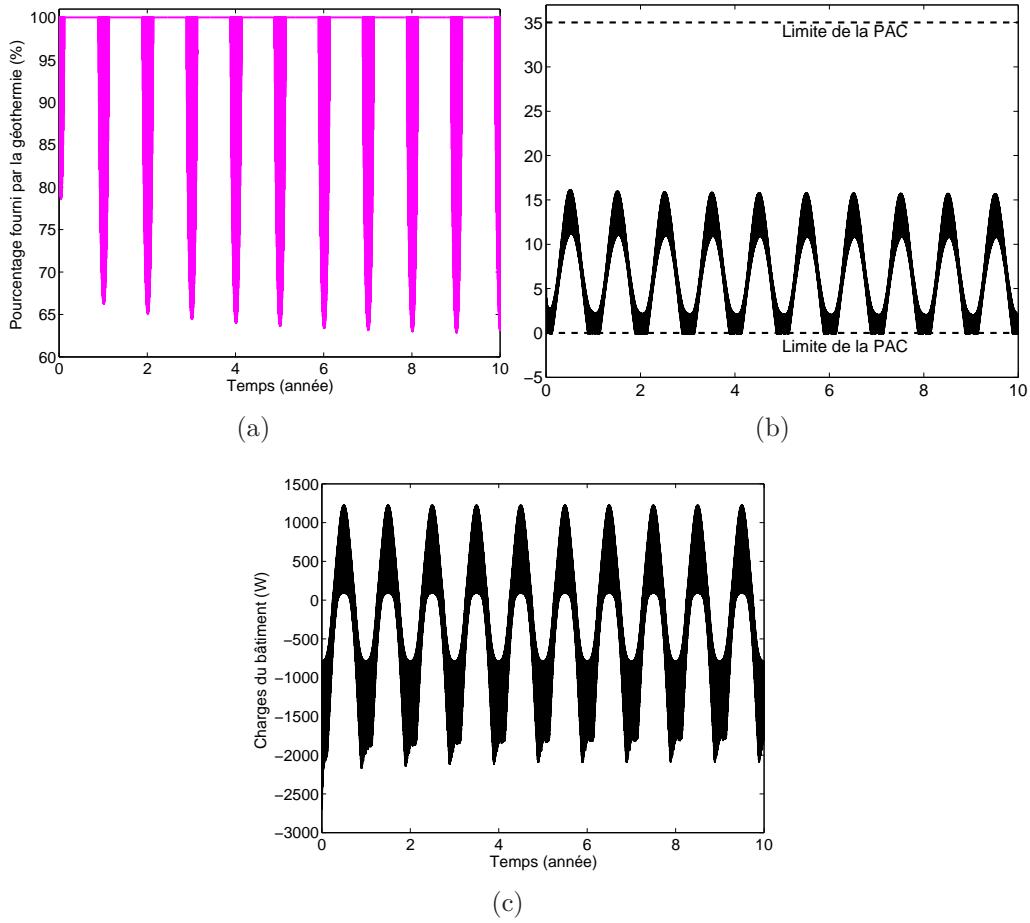


Figure 5.22 Cas 1a. Sans bâtiment pour des puits inclinés (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits

sont donc ajustées en conséquences. Sur la figure 5.24(c) on observe la portion des charges par puits supportées par le système géothermique.

Cas 2b. Charges portées au sol déséquilibrées en mode climatisation

Même après l'ajout de l'effet de la dalle, l'échangeur thermique répond à 100% de la demande énergétique sur une durée de 10 ans. On observe la même tendance que sans bâtiment, il y a augmentation de la température du fluide à l'entrée de la pompe à chaleur sur les 4 premières années et ensuite celle-ci se stabilise, sans atteindre les limites de la PAC. Les courbes de EWT et de la charge du bâtiment fournie par le système géothermique sont illustrées à la figure 5.25.

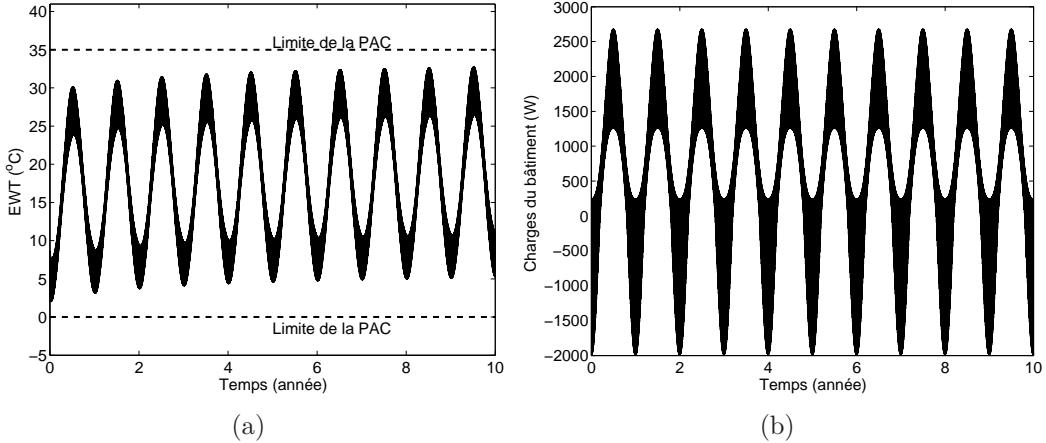


Figure 5.23 Cas 1b. Sans bâtiment pour des puits inclinés (a) Température d'entrée à la PAC, (b) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits

5.5.4 Discussion

En comparant le cas avec dalle et le cas traditionnel pour les forages inclinés, on remarque que pour la charge synthétique dominante en chauffage, le positionnement du système géothermique sous la fondation du bâtiment est favorable passant d'une autonomie minimale de 62.9% (sans dalle) à 77.6% (avec dalle). En comparant le pourcentage moyen d'autonomie de la neuvième année en hiver, on obtient donc une autonomie passant de 92.7% à 97.8%. Finalement, pour la charge synthétique dominante en climatisation choisie dans ce cas, l'inclinaison des puits fournit un pourcentage d'autonomie total au système que se soit avec ou sans dalle.

5.6 Effet de l'implantation des puits en profondeur sur le dimensionnement des systèmes géothermiques

Dans cette section il est question de vérifier si le positionnement des puits en profondeur influence le dimensionnement des puits géothermiques. Un profil de charges au sol déséquilibrées en mode chauffage a été choisi (figure 5.16). Le cas de puits verticaux en surface du sol est celui de la section 5.4.2 et on obtient après 10 ans de simulation une autonomie minimale de 50.8%. Les résultats pour le cas de puits situés à 3 mètres de profondeur sont présentés à la figure (5.26).

Le pourcentage minimal fourni par la géothermie après 10 ans de simulations pour le cas des puits à 3 mètres dans le sol est de 50.5%. La différence entre les deux modèles est de

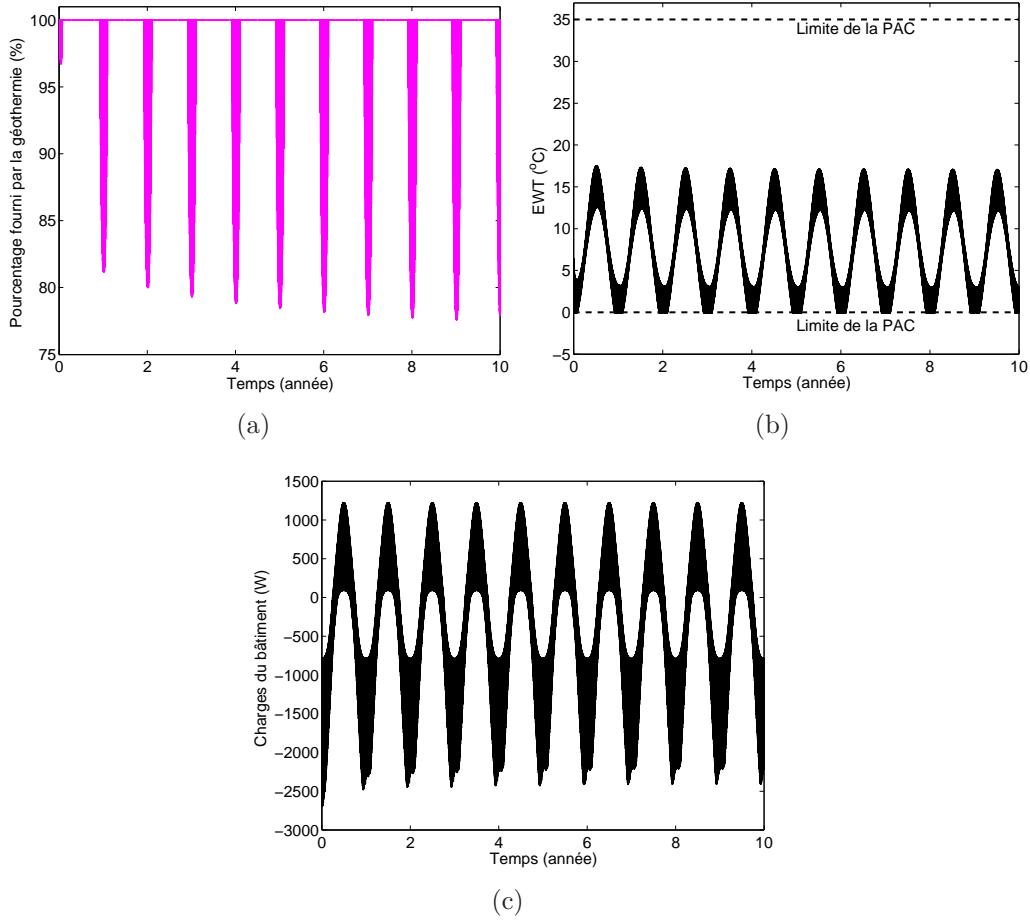


Figure 5.24 Cas 2a. Avec bâtiment pour des puits inclinés (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits

0.4%, ce qui est jugée négligeable. De même pour les puits inclinés on obtient une autonomie minimale de 62.9% pour le cas en surface et 62.4% pour le cas situé en profondeur. Le modèle de référence peut donc être situé en surface sans avoir un impact considérable sur le dimensionnement du système géothermique.

5.7 Effet du système géothermique sur la température du sol sous la fondation

Dans cette section, on veut vérifier l'impact de l'interaction thermique entre les puits géothermiques et la température du sol. En disposant les puits sous le bâtiment, la température sous-celle si change dans le temps. En hiver on retire la chaleur du sol pour l'acheminer à la PAC, il est important de vérifier si le sol gel puisque l'effet du gel-dégel pourrait endommager grandement l'intégrité de la fondation.

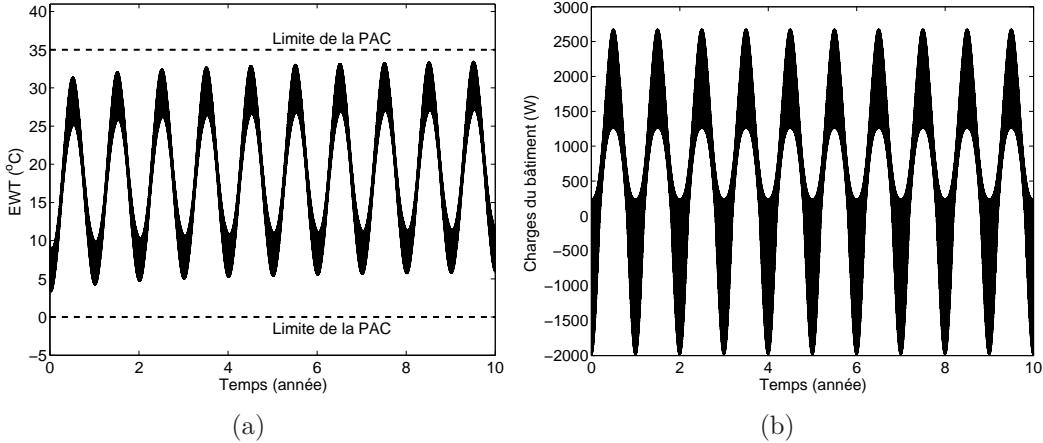


Figure 5.25 Cas 2b. Avec bâtiment pour des puits inclinés (a) Température d'entrée à la PAC, (b) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie par puits

Le modèle utilisé est le cas fournissant des températures au mur du puits les plus faibles en hiver, c'est-à-dire le cas à puits verticaux déséquilibré en chauffage (section 5.4.2). Sur la figure 5.28 deux courbes sont présentées montrant la température au mur d'un des quatre puits. Notons ici que la distribution de température au mur des quatre puits est la même puisque la disposition des puits est symétrique. La première en tireté représente le cas traditionnel et la deuxième, en trait pleins, le cas à puits verticaux positionnés sous le bâtiment.

Pour le cas traditionnel, les températures au mur du puits sont sous la température de gel à 2 mètres de la surface du sol. Avec un champ géothermique construit sous le bâtiment la température au mur du puits est sous zéro à partir de 12.5 mètres de profondeur. Malgré le fait que la température du fluide à l'entrée de la boucle en U verticale soit à des température de l'ordre de -6 °C en hiver, la résistance thermique du coulis et la chaleur dégagée par le bâtiment permettent de maintenir une température du sol au dessus du niveau de gel sur une certaine profondeur. Puisque l'épaisseur du sol dans la région de Montréal est de l'ordre de quelques mètres et repose sur le roc, l'effet du gel à long terme est donc négligé. Comme on simule le transfert de chaleur d'un bâtiment au sol à l'état stationnaire, il faut prendre ce résultat avec réserve. Au départ lorsque le bâtiment vient d'être construit, la chaleur ne s'est pas propagée à de grandes profondeurs et par conséquent le sol peut geler près de la surface et endommager la fondation du bâtiment. Par sécurité, il faudrait isoler les puits sur les deux premiers mètres pour éviter des dommages au bâtiment.

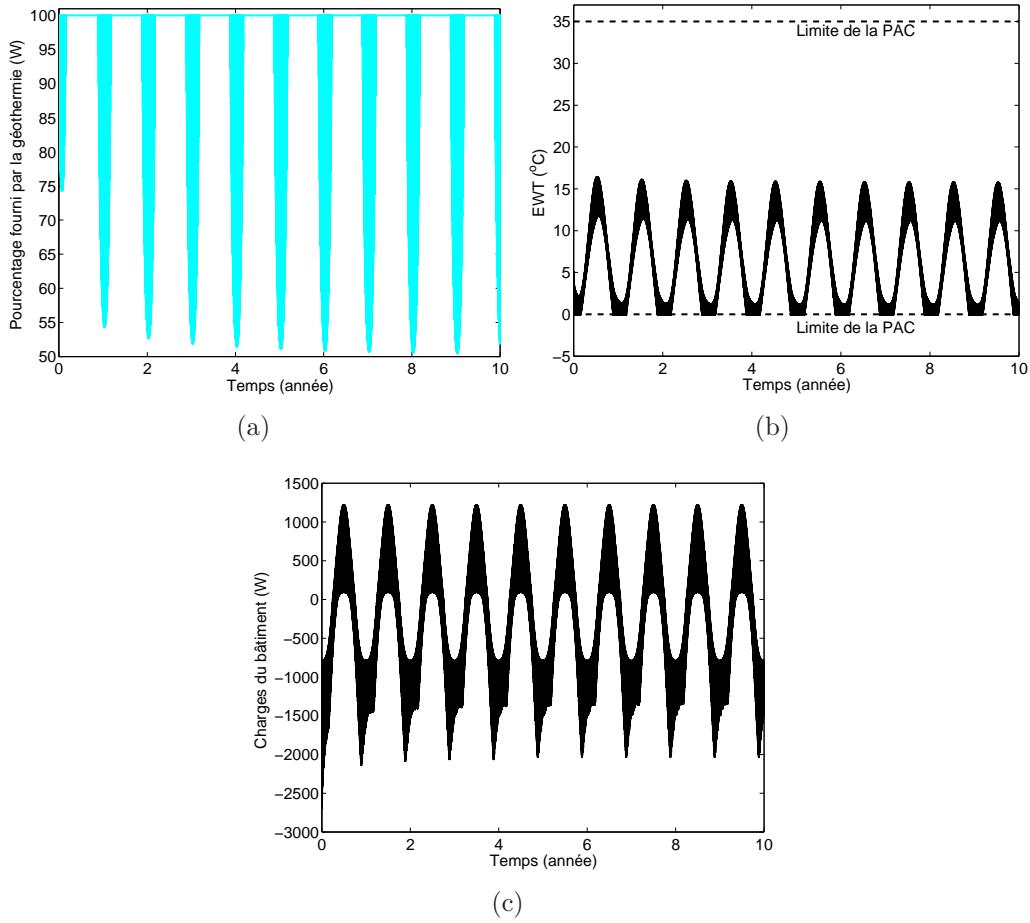


Figure 5.26 Sans bâtiment pour des puits verticaux situés à 3 m de profondeur (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie

5.8 Résumé

En résumé, le positionnement du système géothermique sous la fondation d'un bâtiment peut être globalement positif si la charge est dominée par le mode chauffage. Lorsqu'il y a un déséquilibre de charges négatif (chauffage), la température d'entrée à la pompe à chaleur diminue, ce qui augmente la probabilité d'atteindre la température limite inférieure de la PAC. La perturbation créée par la dalle augmente la température du sol, ce qui influence EWT à la hausse et permet de rester davantage dans les limites de la PAC. Cependant, il se peut que la distribution de charges soit déséquilibrée en mode climatisation, ce qui augmente la température d'entrée à la PAC et la limite supérieure de la PAC peut être atteinte. Dans ce cas, l'augmentation de EWT n'est pas souhaitable, car l'autonomie du système en sera réduite en mode climatisation.

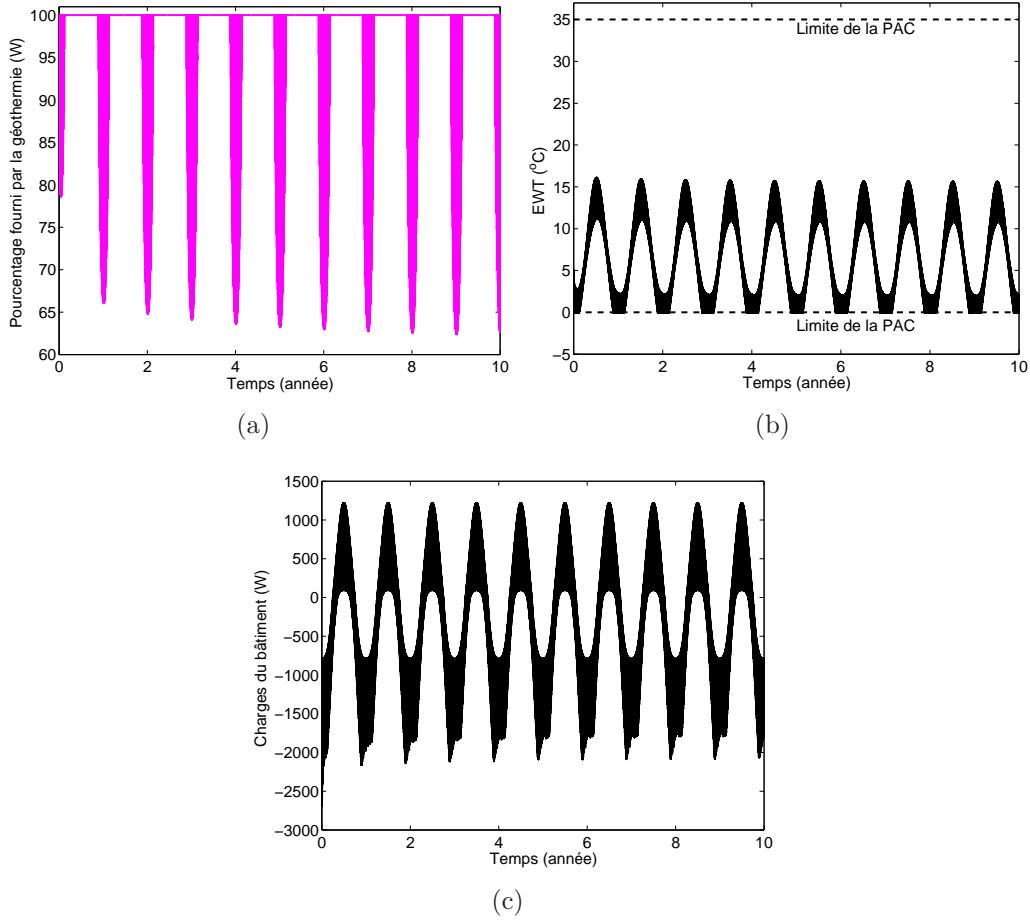


Figure 5.27 Sans bâtiment pour des puits inclinés situés à 3 m de profondeur (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment fourni par la géothermie

L'inclinaison des puits réduit l'interaction entre les puits et permet une plus grande autonomie de système. Pour le cas de charges amenées au sol déséquilibrées en chauffage (tableaux 5.1 et 5.2), on gagne au maximum 12.1% pour le cas traditionnel à puits verticaux. En moyenne, on gagne 6.7%. Avec l'influence de la dalle l'autonomie minimale passe de 61.5% pour des puits verticaux à 77.6% pour des puits inclinés. La combinaison de puits inclinés positionnés sous la fondation du bâtiment dans ce cas est le meilleur choix de dimensionnement. Toutefois, pour le cas de charges amenées au sol déséquilibrées en climatisation (tableaux 5.3 et 5.4), on gagne au maximum 22.1% pour le cas traditionnel à puits verticaux. Avec l'influence de la dalle l'autonomie minimale passe de 71.3% pour des puits verticaux à 100% pour des puits inclinés. Dans ce cas, le design optimal serait des puits inclinés sans ou avec dalle. Pour des forages de 50 mètres et le mode chauffage dominant, le gain en énergie géothermique dû à la

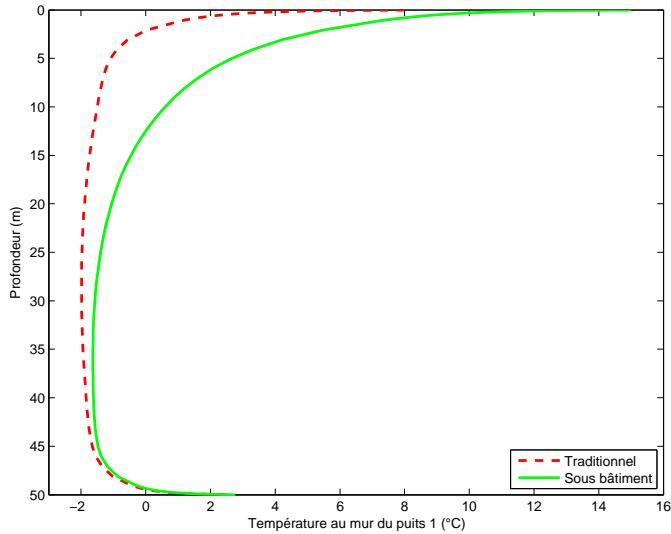


Figure 5.28 Distribution de température le long d'un puits

dalle se compare en importance au gain dû à l'inclinaison des forages (tableaux 5.1 et 5.2). Toutefois pour des forages plus long, le gain de la dalle aurait été réduit, alors que celui des forages inclinés aurait augmenté.

Tableau 5.1 Pourcentage minimal de la charge fournie en hiver après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque le chauffage domine pour les différentes options

		Dalle	
		non	oui
Forages inclinés	non	50.8%	61.5%
	oui	62.9%	77.6%

Tableau 5.2 Pourcentage moyen de la charge fournie en hiver après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque le chauffage domine pour les différentes options

		Dalle	
		non	oui
Forages inclinés	non	85.7%	92.4%
	oui	92.7%	97.8%

Tableau 5.3 Pourcentage minimal de la charge fournie en été après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque la climatisation domine pour les différentes options

		Dalle	
		non	oui
Forages inclinés	non	77.9%	71.3%
	oui	100%	100%

Tableau 5.4 Pourcentage moyen de la charge fournie en été après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque la climatisation domine pour les différentes options

		Dalle	
		non	oui
Forages inclinés	non	95.8%	92.5%
	oui	100%	100%

CHAPITRE 6

Étude de cas - Immeuble à condos

L'installation des puits géothermiques sous bâtiment et l'inclinaison des puits sont appliqués à des données réelles provenant d'un site d'immeuble à condos dont la conception a été réalisée par la compagnie Golder Associés. Le design utilisé pour cette construction sert de modèle de référence.

Les besoins énergétiques du bâtiment sont présentés à la figure 6.1. Ici on a illustré la demande de chauffage ('-') et de climatisation du bâtiment ('+') que doit fournir la géothermie. Le choix de design a été fait pour que le système géothermique fournisse 100% de la demande énergétique. Dans le présent cas, la longueur des puits a été réduite pour diminuer l'autonomie du système et ainsi noter l'effet du bâtiment et de l'inclinaison des puits.

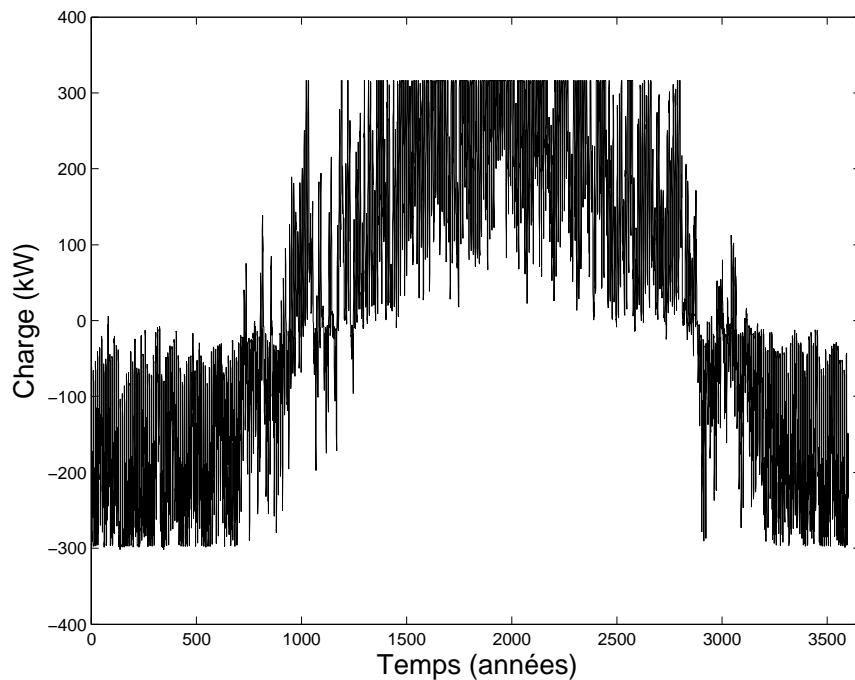


Figure 6.1 Charges du bâtiment

La géométrie du champ de puits (figure 6.2) est la suivante : 35 puits verticaux de 150 mètres de long disposés en cinq réseaux. Le fluide caloporteur est distribué par des collecteurs de type parallèle inversé. Les avantages de cette disposition sont les suivants :

- les pertes de charges hydrauliques sont identiques ;
- facile d'isoler un sous-circuit pour l'entretien ;
- chaque sous-circuit peut supporter des charges différentes (elles sont identiques dans cette étude).

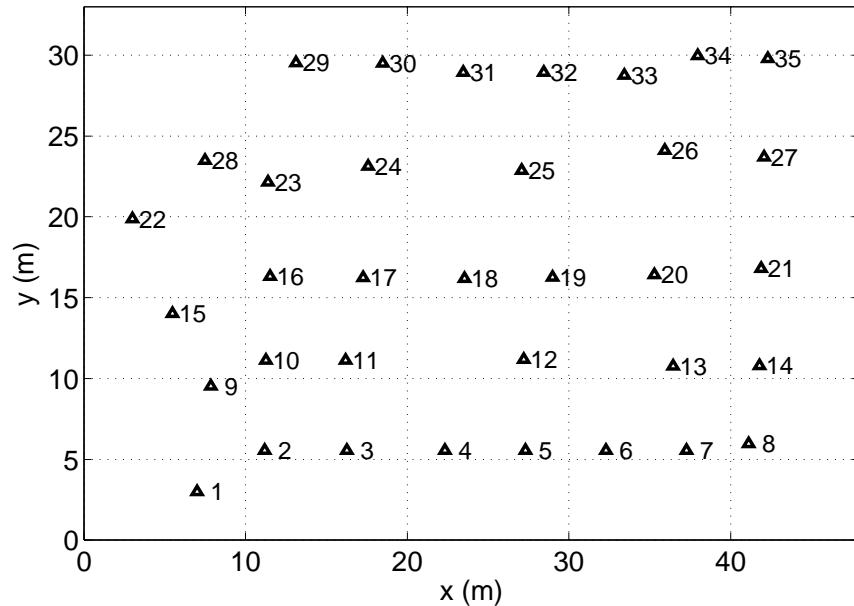


Figure 6.2 Champs de puits d'un cas réel

6.1 Description du modèle 3D

Le modèle de bâtiment (figure 6.3) se situe à une profondeur de 3 mètres de la surface du sol et a une superficie de 3600 m². La dalle de béton est sans épaisseur, d'une longueur de 60 mètres par 60 mètres, et est située dans un bloc de sol de 165 X 165 X 180 mètres. La dalle de béton et les murs sont caractérisés par des frontières de température constante égales à 15 °C. Les autres frontières propres au bloc de sol ont une température constante égale à la température du sol non-perturbé, soit 8 °C. La conductivité thermique du sol utilisée est de 2.5 W/mK (Ji, 1999), la masse volumique est de 2.7 kg/m³ et la capacité calorifique du sol est de 750 J/kgK. Le modèle comporte 435 426 éléments avec 614 028 degrés de liberté. Deux dispositions de puits seront présentés : à puits verticaux et à puits inclinés. La disposition à puits inclinés va comme suit (figure 6.2) :

(2-7) : pendage de 70 °vers l'extérieur

(8,14,21,27,35,1,9,15,22,28) : pendage de 70 °vers l'extérieur

(29-34) : pendage de 70 °vers l'extérieur

(10-13) : pendage de 80 °vers l'extérieur

(23-26) : pendage de 80 °vers l'extérieur

(16-20) : puits verticaux

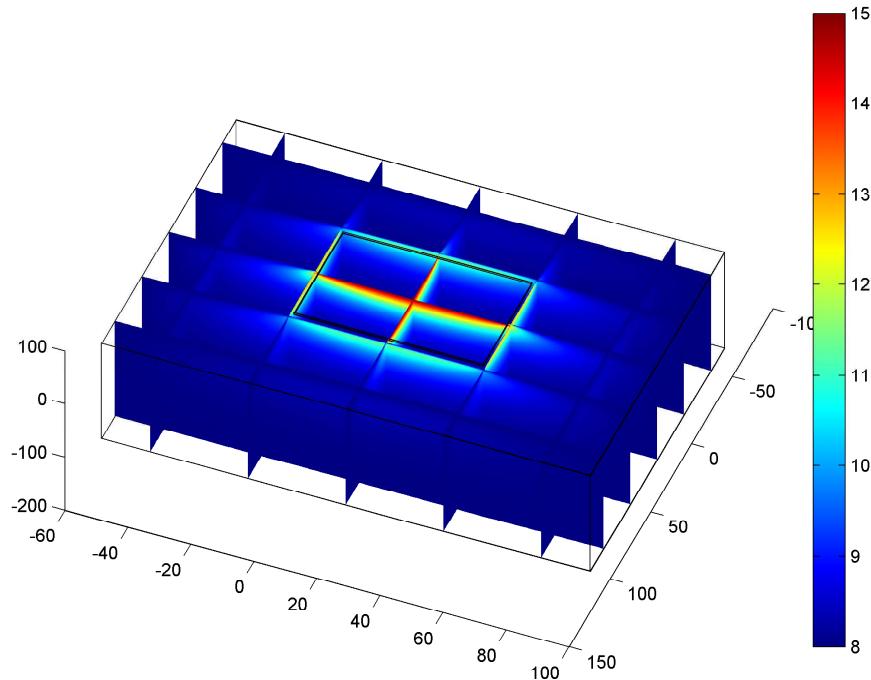


Figure 6.3 Distribution de température dans le bloc de sol pour le cas réel

Le modèle thermique de bâtiment est ensuite superposé au modèle analytique incluant les 35 puits géothermiques. Le modèle analytique calcule la température d'entrée à la PAC et ajuste les charges portées au sol si celles-ci engendrent des EWT ou des charges de bâtiment supérieures aux limites de la pompe à chaleur. Puisque les puits ne sont pas disposés symétriquement, la perturbation moyenne du sol créée par le bâtiment est calculée à chaque puits et additionnée à la différence de température au mur du puits (équation 3.36). Les critères de la PAC sont les suivants :

- EWT en climatisation est de 35 °C et en chauffage est de 0 °C.
- La charge totale maximale de la PAC en mode climatisation est de 315kW et -315kW en mode chauffage ($\pm 9\text{kW/puits}$).
- Les COP sont fonction de la température du fluide à l'entrée de la PAC (EWT) et varient entre 3 et 3.9 (figure 5.14).

Dans les sections suivantes, on veut démontrer l'influence de la demande énergétique du bâtiment sur le dimensionnement du système en incluant la perturbation que crée la dalle et l'inclinaison des puits.

6.1.1 Cas 1. Charges portées au sol déséquilibrées en mode climatisation

En observant le profil des charges du bâtiment de la figure 6.1, on observe que la charge est équilibrée. Cependant à cause de la chaleur générée par la pompe à chaleur, les charges portées au sol ne le sont pas (figure 6.4). Dans ce cas, ce déséquilibre a tendance à augmenter la température d'entrée à la pompe à chaleur du fluide caloporeur et influence donc l'autonomie à long terme du système.

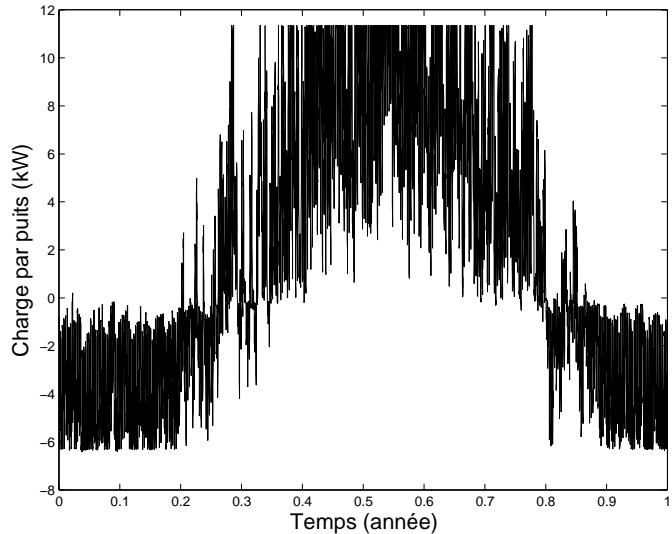


Figure 6.4 Cas 1. Charges portées au sol par puits pour le cas réel

Sur les figures 6.5 et 6.6, le cas sans bâtiment avec puits verticaux et le cas sans bâtiment avec puits inclinés sont illustrés. Dans le modèle de design original, les puits sont verticaux et le cas présenté à la figure 6.5 devient le point de comparaison. Pour le design original, le système géothermique a une autonomie minimale après 9 ans de 63.6%. Le pourcentage d'autonomie moyen après 9 ans en été est de 90.5%. L'inclinaison des puits géothermiques permet de rendre le système complètement autosuffisant dès la première année. Les limites de la PAC ne sont pas atteintes (figure 6.6(a) et 6.6(b)), tandis que pour des puits verticaux après 4 ans d'utilisation du système les EWT surpassent les températures admissibles de la PAC en été (6.5(b)). Par conséquent, le système géothermique ne subvient plus aux besoins énergétiques et le système d'appoint doit entrer en fonction.

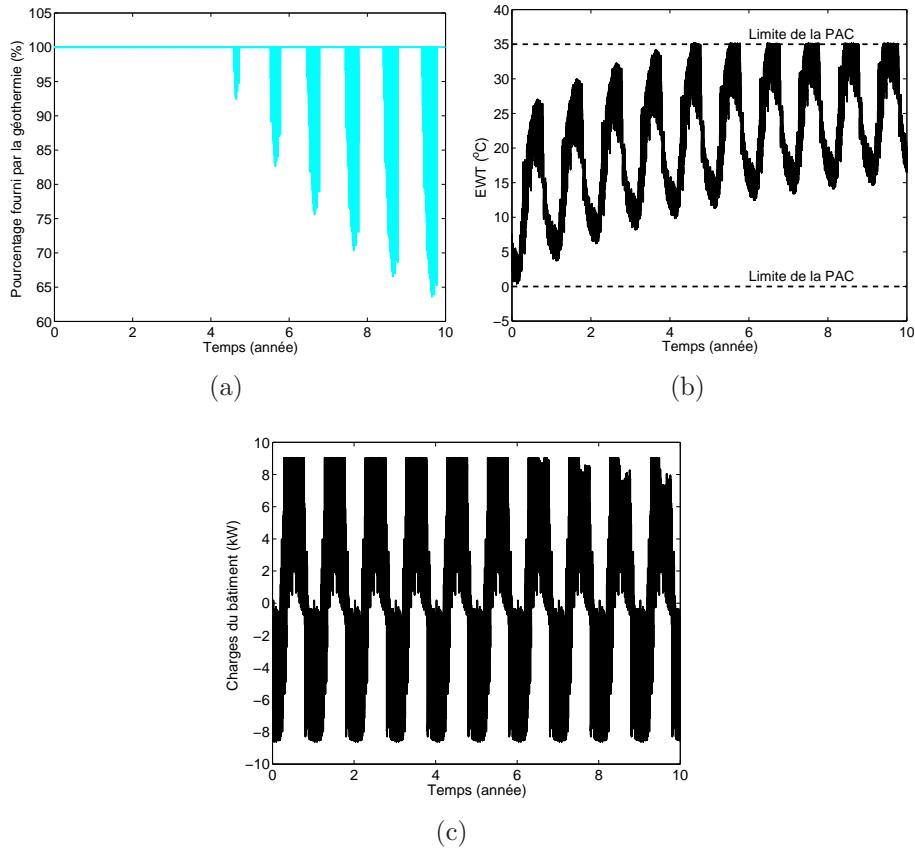


Figure 6.5 Cas 1a. Sans bâtiment avec des puits verticaux pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie

En ajoutant l'effet du bâtiment on retrouve le cas avec les puits verticaux à la figure 6.7 et le cas des puits inclinés à la figure 6.8. En comparant les puits verticaux avec et sans bâtiment, on se rend compte que le pourcentage d'énergie fourni par la géothermie diminue. Ce résultat était prévisible puisque, la température d'entrée à la pompe à chaleur augmente avec le temps sur le graphique de la figure 6.5(b). La perturbation de la dalle augmente encore plus cet effet et réduit donc l'autonomie minimale du système passant de 63.6% à 43.5%. Le pourcentage moyen d'autonomie en été après la neuvième année passe de 90.5% à 73.6%. On observe la même tendance avec les puits inclinés (6.8(b)). Le pourcentage d'énergie minimale soutenu par le système géothermique diminue passant de 100% à 67.3%, en moyenne sur les périodes d'été on passe de 100% à 89.7%.

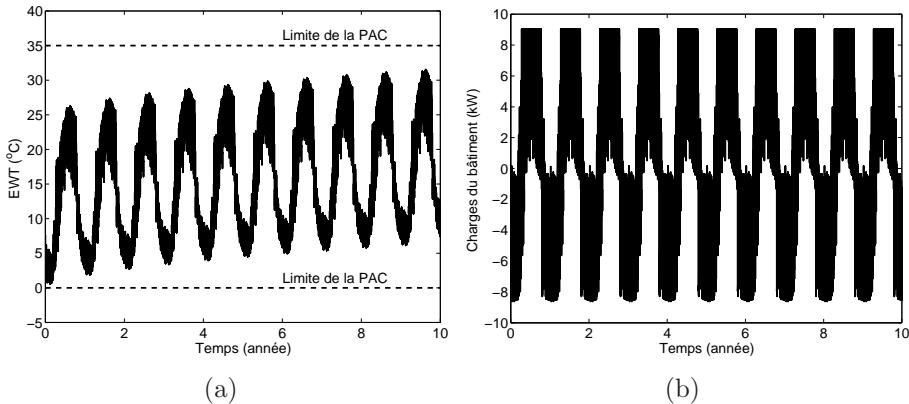


Figure 6.6 Cas 1a. Sans bâtiment avec des puits inclinés pour le cas réel (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie

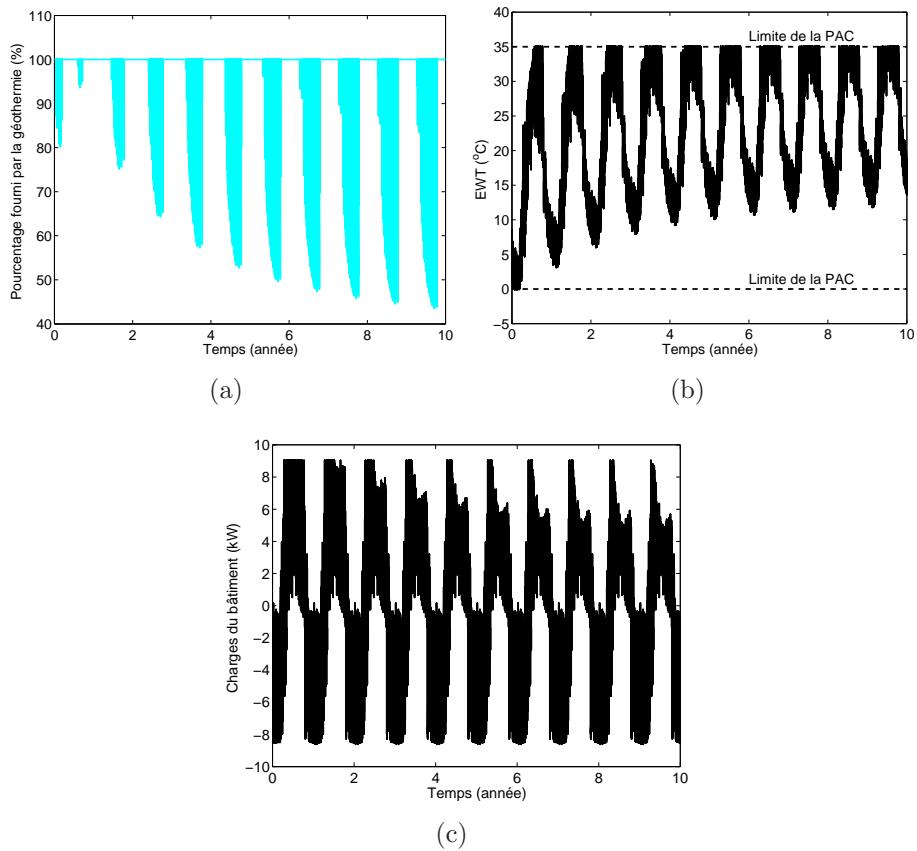


Figure 6.7 Cas 1b. Avec bâtiment avec des puits verticaux pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie

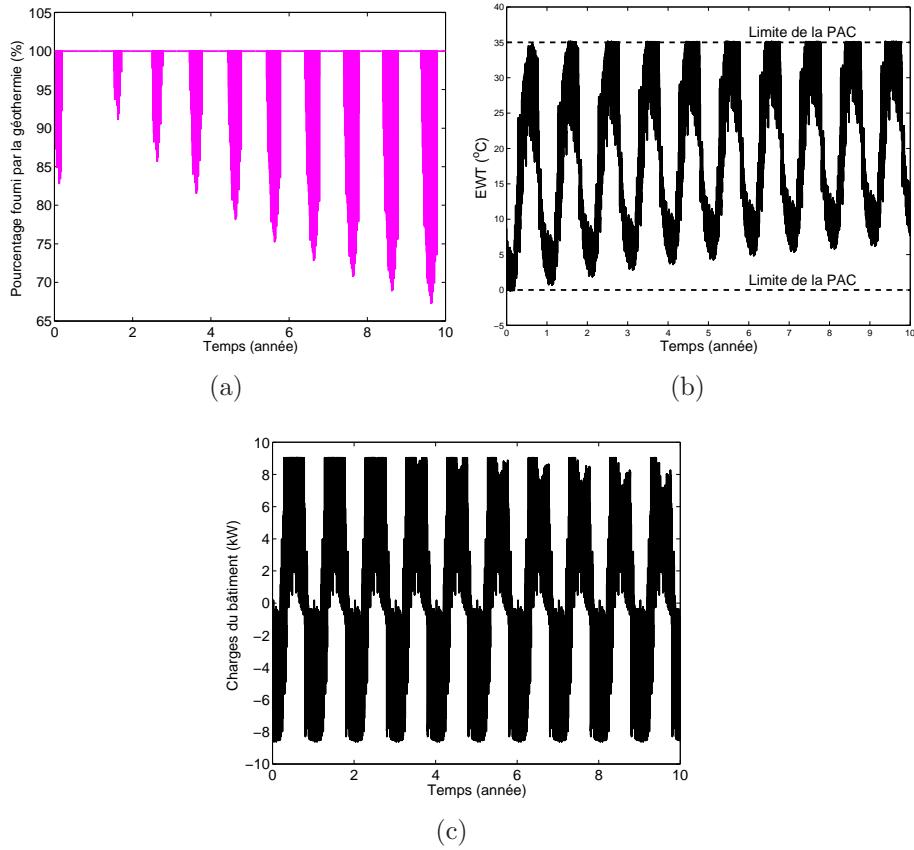


Figure 6.8 Cas 1b. Avec bâtiment avec des puits inclinés pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie

6.1.2 Cas 2. Charges portées au sol déséquilibrées en mode chauffage

Comme dans le cas de référence la charge du bâtiment fournie par le système géothermique en chauffage est près de la limite de la pompe à chaleur (6.5(c)), on ne peut augmenter la charge en chauffage. Ainsi pour créer un déséquilibre en mode chauffage, on retranche une constante en mode climatisation de 4.5kW par puits. Pour le champ de puits, on retire 157.5kW du profil illustré à la figure 6.1 et on obtient la figure 6.9. Le nouveau profil de charges au sol est illustré à la figure 6.10.

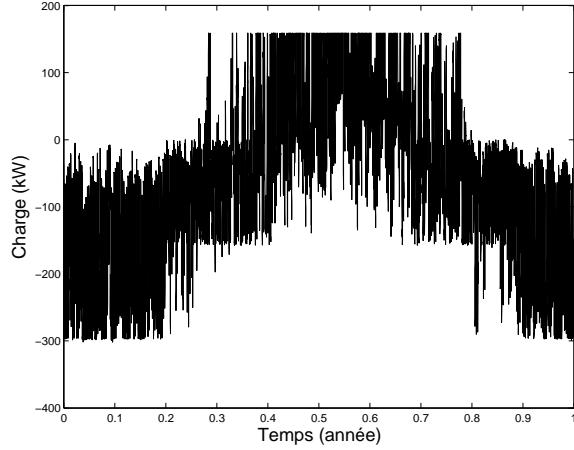


Figure 6.9 Cas 2. Charges du bâtiment pour le cas réel

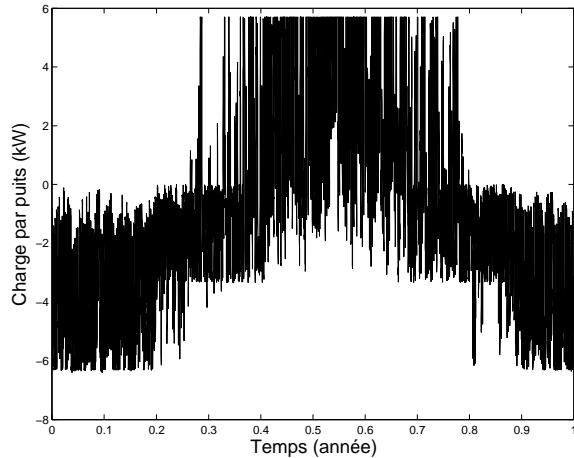


Figure 6.10 Cas 2. Charges portées au sol pour le cas réel

Sur les figures 6.11 et 6.12, le cas sans bâtiment avec puits verticaux et le cas sans bâtiment avec puits inclinés sont illustrés. Pour les puits verticaux, la température du fluide diminue pendant 8 ans, par la suite celle-ci tend à se stabiliser. La figure 6.11(c) montre la charge correspondante du bâtiment fournie par la géothermie. La charge en hiver en provenance du champ de puits géothermique ne subvient jamais complètement au besoins du bâtiment. Après 10 ans, le système possède 46.5% d'autonomie minimale. En moyenne sur les mois d'hiver de la neuvième année on obtient 86.5%.

Le modèle à puits inclinés est encore une fois plus favorable que le modèle à puits verticaux. La température du fluide diminue beaucoup moins rapidement pour les puits inclinés que pour les puits verticaux, résultant en une réduction moins rapide d'autonomie du système.

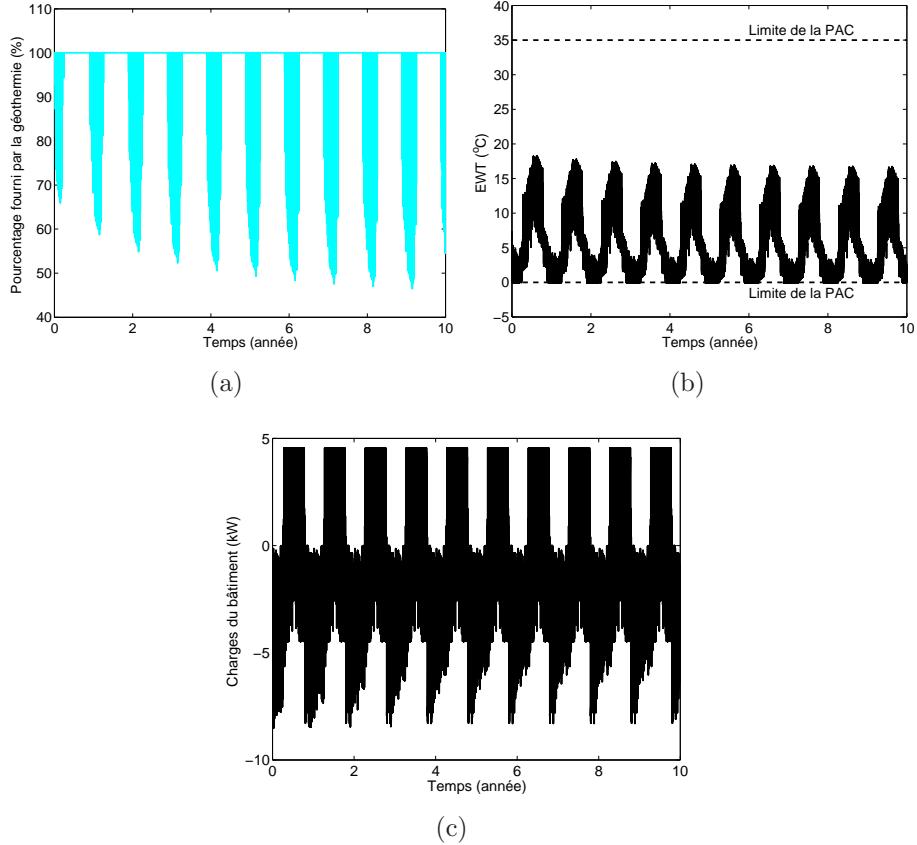


Figure 6.11 Cas 2a. Sans bâtiment avec des puits verticaux pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie

La figure 6.12(c) montre la charge correspondante du bâtiment fournie par la géothermie. Le système géothermique passe d'une autonomie minimale de 69.0% pour la première année à 56.5% à la dixième année en chauffage. En terme d'autonomie moyenne après 9 ans, le système atteint 91.2%.

En ajoutant l'effet du bâtiment on retrouve le cas avec les puits verticaux à la figure 6.13 et le cas des puits inclinés à la figure 6.14. En comparant les puits verticaux avec et sans bâtiment, on se rend compte que le pourcentage d'énergie fourni par la géothermie augmente. La perturbation de la dalle augmente le EWT et dans ce cas favorise l'autonomie du système. La charge du bâtiment minimale comblée par le système géothermique après seulement 10 ans augmente à 52.5%. On observe la même tendance avec les puits inclinés et celui-ci atteint 65.7% d'autonomie après 10 ans. L'autonomie moyenne pendant l'hiver après 9 ans de simulation atteint 92.5% pour le cas des puits verticaux positionnés sous le bâtiment et

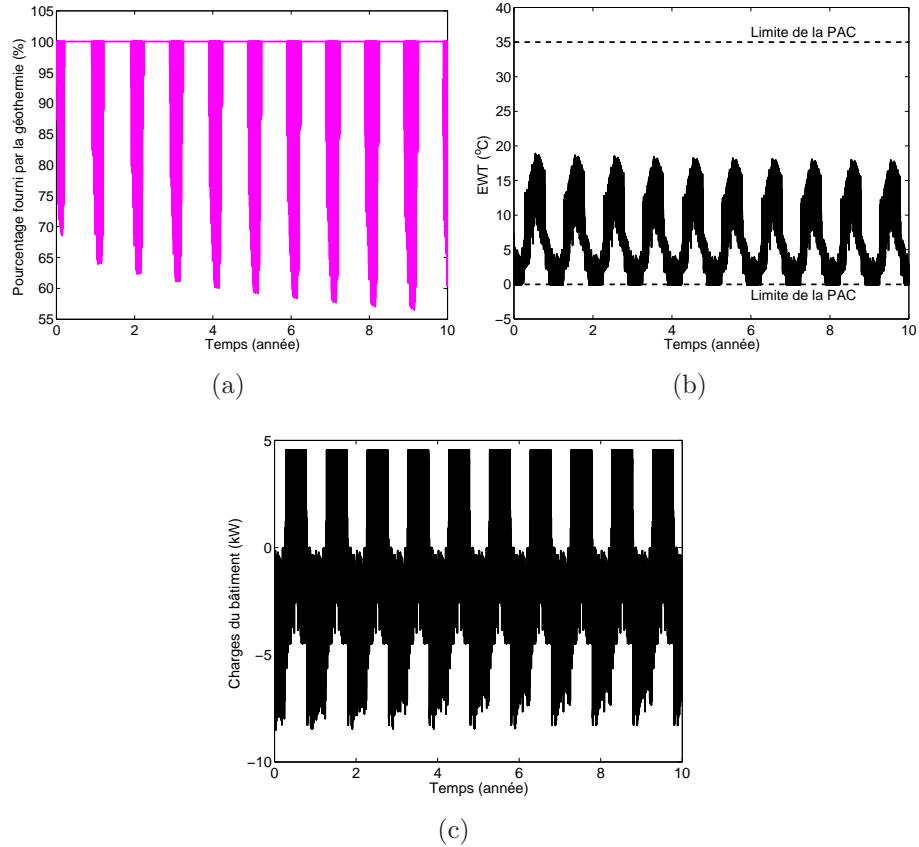


Figure 6.12 Cas 2a. Sans bâtiment avec des puits inclinés pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie

97.5% pour la cas de puits inclinés sous le bâtiment.

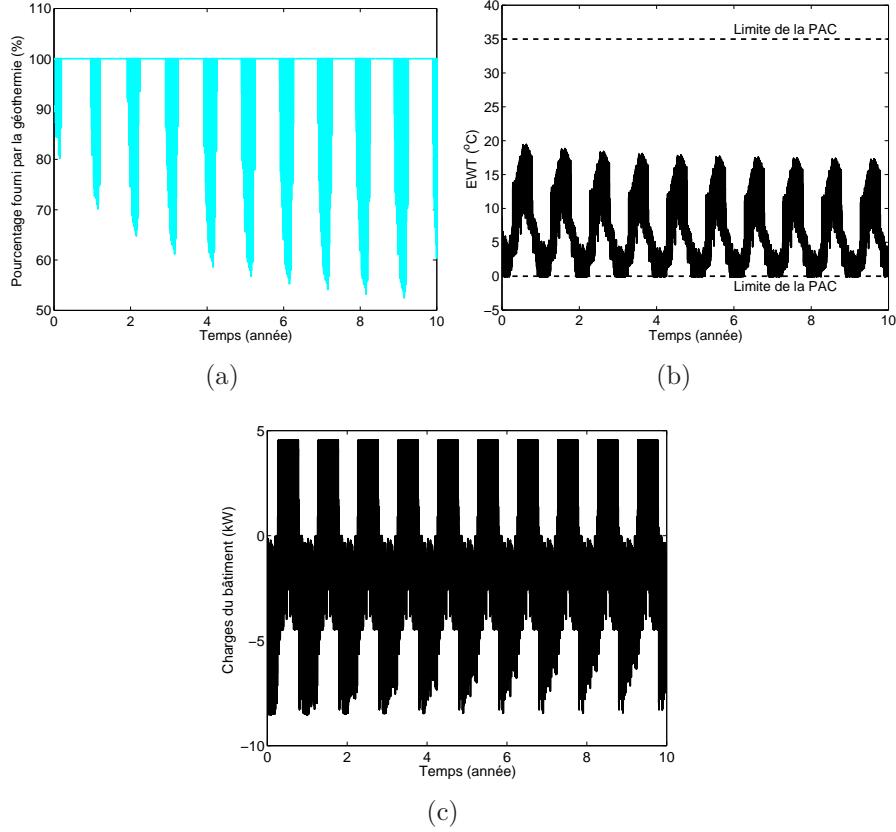


Figure 6.13 Cas 2b. Avec bâtiment avec des puits verticaux pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie

6.2 Discussion

Pour le premier cas, c'est-à-dire pour une charge portée au sol dominante en climatisation (tableaux 6.1 et 6.2), l'effet de la dalle est défavorable. Ceci est expliqué par le déséquilibre de charges portées au sol en mode climatisation faisant augmenter la température d'entrée à la PAC. La limite supérieure est atteinte et le système perd de l'autonomie. En ajoutant l'effet de la dalle, l'EWT augmente encore plus et l'autonomie en est encore plus touchée. L'inclinaison des puits est favorable réduisant la température d'entrée à la PAC permettant une plus grande autonomie du champ géothermique.

Dans le second cas, pour un déséquilibre de charges portées au sol en mode chauffage (tableaux 6.3 et 6.4), l'effet de la dalle est concluant. Ce déséquilibre diminue l'EWT et la limite inférieure de la PAC est atteinte. Comme la perturbation que crée la dalle augmente l'EWT, la courbe est décalée vers le haut permettant une meilleure autonomie du système. L'inclinaison des puits est favorable réduisant la température d'entrée à la PAC permettant une plus grande autonomie du champ géothermique.

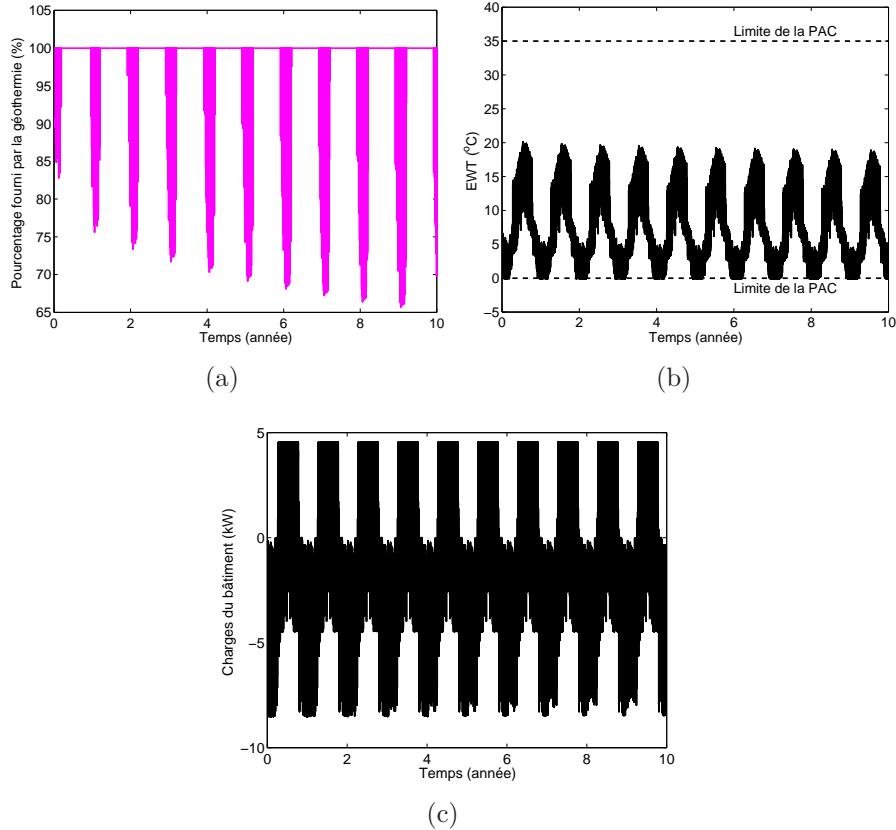


Figure 6.14 Cas 2b. Avec bâtiment avec des puits inclinés pour le cas réel. (a) Pourcentage fourni par la géothermie, (b) Température d'entrée à la PAC, (c) Profil de charges du bâtiment par puits fourni par la géothermie

maison des puits est aussi favorable puisqu'elle augmente la température d'entrée à la PAC en mode chauffage dominant et par conséquent augmente l'autonomie du système.

Tableau 6.1 Proportion de la climatisation fournie par les différentes options lorsque la climatisation domine pour le cas réel pour les différentes options

		Dalle	
		non	oui
Forages inclinés	non	63.6%	43.5%
	oui	100%	67.3%

Tableau 6.2 Pourcentage moyen de la charge fournie en été après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque la climatisation domine pour les différentes options

		Dalle	
		non	oui
Forages inclinés	non	90.5%	73.6%
	oui	100%	89.7%

Tableau 6.3 Pourcentage minimal de la charge fournie en hiver après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque le chauffage domine pour les différentes options

		Dalle	
		non	oui
Forages inclinés	non	86.6%	92.5%
	oui	91.2%	97.5%

Tableau 6.4 Pourcentage moyen de la charge fournie en hiver après 9 ans de simulation par la géothermie lorsque le chauffage domine pour les différentes options

		Dalle	
		non	oui
Forages inclinés	non	85.7%	92.4%
	oui	92.7%	97.8%

CHAPITRE 7

Discussion

Avant de pouvoir appliquer l'effet du bâtiment et l'inclinaison des puits à un cas réel, plusieurs étapes ont été réalisées. Un modèle 2D a d'abord été étudié et celui-ci a permis de comprendre la dynamique du transfert de chaleur sous un bâtiment. On a noté que la dalle d'un bâtiment maintenue à la température ambiante, soit 20 °C, réchauffait la surface du sol sous-jacent jusqu'à une température de 15 °C (section 3.6.1). Dans les équations développées de la littérature sur le transfert de chaleur d'un bâtiment au sol, les variations de température extérieure sont négligées (section 3.5). Un modèle a été élaboré pour vérifier l'exactitude de cette hypothèse. On a conclu que l'effet des saisons influençait peu la distribution de température sous la dalle. Comme ce qui nous intéresse ici est la température moyenne le long d'un forage, la différence entre le cas à température constante et le cas avec fluctuations de la température extérieure est très faible, soit 0.02 °C sur 150 mètres au droit du mur du bâtiment. On peut donc négliger les effets saisonniers. La profondeur d'influence de l'onde de chaleur pour atteindre 90% d'atténuation est de 75 mètres pour le cas 2D. Au-delà de cette profondeur l'influence est dite négligeable. Ainsi, pour pleinement bénéficier de l'effet du bâtiment, les puits géothermiques doivent être courts.

En modélisant en 3D, la distribution de température dans le sol sous la dalle a pu être déterminée. Notons que la température du sol est fortement influencée par la dimension du bâtiment. Puisque dans la réalité des climats nordiques, la fondation ne repose pas directement à la surface du sol, le modèle 3D a sa fondation à 3 mètres de profondeur. Celle-ci a été choisie afin d'éviter l'effet du gel/dégel sur la structure. L'augmentation de la température du sol dépend de la position sous la dalle (x,y,z). Pour les dimensions choisies, la température moyenne du sol au centre de la dalle augmente de 1.3 °C sur 50 mètres de profondeur.

Par la suite, en superposant l'effet du bâtiment à la réponse analytique de puits géothermiques pour une charge au sol déséquilibrée en mode chauffage, on note que l'autonomie moyenne du système pour des puits verticaux passe de 85.7 % à 92.4%. L'effet du bâtiment augmente l'EWT, ce qui permet de réduire les EWT qui atteignent la limite de la PAC et d'augmenter l'autonomie du système géothermique. En utilisant des puits inclinés à 70 degrés vers l'extérieur, l'autonomie moyenne du système passe de 85.7% à 92.7%. Le système géothermique à puits inclinés subvient mieux à la demande du bâtiment, car les interactions

thermiques entre les puits sont moins importantes lorsque ceux-ci sont inclinés. L'effet de l'inclinaison des forages est comparable à l'effet de la dalle (gain d'environ 7% d'autonomie). En ajoutant l'effet du bâtiment aux puits inclinés l'autonomie du système atteint 97.8%. Le design optimal dans ce cas est donc le positionnement des puits inclinés sous le bâtiment.

Cependant, il se peut que la distribution de charges soit déséquilibrée en mode climatisation, ce qui augmente la température d'entrée à la PAC et la limite supérieure de la PAC peut être atteinte. Dans ce cas, l'augmentation de EWT dû à la dalle n'est pas souhaitable, car l'autonomie moyenne du système en est réduite passant de 95.8% à 92.5% pour le cas synthétique. Toutefois, en utilisant des puits inclinés à 70 degrés vers l'extérieur, on atteint 100% d'autonomie. Avec l'influence de la dalle l'autonomie passe de 92.5% pour des puits verticaux à 100% pour des puits inclinés. Dans ce cas, le design optimal serait des puits inclinés sans ou avec dalle.

L'étude de cas avec données réelles ayant un profil de charges de bâtiment équilibré, mais un profil de charges portées au sol déséquilibré en mode climatisation est un cas où l'effet de la dalle est négatif. L'ajout de la dalle au système traditionnel fait décroître la quantité de chaleur moyenne fournie par la géothermie de 90.5% à 73.6%. Cependant l'inclinaison des puits apporte un effet bénéfique. Le système géothermique traditionnel fournit en moyenne 90.5% de l'énergie demandée en climatisation, tandis qu'en inclinant les puits on va chercher 100% d'autonomie. En ajoutant l'effet de la dalle aux forages inclinés, celle-ci diminue en moyenne jusqu'à 89.7% après 10 ans de fonctionnement du système.

Dans le second cas, pour un déséquilibre de charges portées au sol en mode chauffage, l'effet de la dalle est concluant. Ce déséquilibre diminue l'EWT et la limite inférieure de la PAC est atteinte. Comme la perturbation que crée la dalle augmente l'EWT, la courbe est décalée vers le haut permettant une meilleure autonomie du système. L'inclinaison des puits est aussi favorable puisqu'elle augmente la température d'entrée à la PAC en mode chauffage dominant et par conséquent augmente l'autonomie du système.

Comme au Québec on est plutôt en mode chauffage dominant, on peut dire qu'il est généralement avantageux d'incliner les forages et de les positionner sous le bâtiment. Si cette option est choisie, il peut être prudent, voire nécessaire, d'isoler les tuyaux sur une courte longueur pour éviter tout risque de soulèvement de la dalle par le gel. Ce risque reste cependant faible considérant que la PAC a un EWT limite de 0 °C et que la température sous la dalle est initialement près de 15 °C et que la résistance thermique du forage assure un sol plus chaud

en hiver que la température moyenne du fluide même sans l'effet de la dalle.

Il convient de rappeler que les résultats obtenus dans cette étude reposent sur plusieurs approximations et simplifications :

- l'utilisation du modèle SLF suppose un flux constant le long du forage. Cette hypothèse n'est jamais parfaitement vérifiée en pratique et constitue donc une approximation commode de la réalité ;
- on suppose que le principe de superposition s'applique à tous les niveaux. Dans le temps, cette hypothèse est valide. Dans l'espace, elle constitue au mieux une approximation puisque l'interaction entre les forages ou entre les forages et la dalle peut modifier verticalement les flux supposés constants dans le modèle SLF. Ainsi, sous une dalle de béton au haut du puits on pourrait, en été, utiliser pour la SLF un flux sortant du puits vers le sol alors qu'en réalité le flux pourrait être inversé à certains moments. Cette interaction entre les solutions élémentaires dalle-forage est négligée ;
- on néglige la capacité thermique des forages, i.e. on représente le transfert thermique dans le forage par une résistance, donc on suppose implicitement qu'après une heure, le régime permanent entre le fluide et le mur du forage est atteint ;
- on néglige les variations verticales de résistance dues par exemple à des matériaux différents utilisés pour le remplissage du forage, à des variations de position du tube en U par rapport au mur du forage et à une saturation ou compaction variables du matériau de remplissage le long du forage ;
- on néglige les variations de résistance du forage dues aux variations de température du fluide caloporteur ;
- on néglige les variations de conductivité thermique du sol et de capacité thermique dues aux variations de température dans le sol ;
- on néglige les hétérogénéités latérales et verticales du sol (e.g. changements stratigraphiques, zone vadose, fracturation, écoulement de l'eau, etc.) ;
- on suppose négligeable le transfert convectif de chaleur dû à l'écoulement de l'eau souterraine ;
- on néglige le gradient géothermique naturel ainsi que le flux de grande longueur d'onde provenant de la surface dû par exemple au réchauffement climatique ou à l'urbanisation croissante ;
- on néglige l'effet d'un éventuel gel de l'eau souterraine suite à des périodes prolongées de chauffage et bien sûr l'effet consécutif du dégel. On néglige aussi l'impact que pourrait avoir des cycles de gel-dégel sur les propriétés thermiques du sol ;
- on suppose une dalle homogène et d'épaisseur constante ;

- on néglige les interactions des bâtiments voisins ;
- on suppose un régime périodique annuel des charges thermiques du bâtiment.

L'ensemble de ces limitations fait qu'il faut interpréter avec une certaine réserve les résultats numériques présentés. Comme toute étude numérique, ils constituent au mieux un modèle de la réalité. Toutefois, les ordres de grandeur obtenus, les tendances dégagées et les conclusions générales de l'étude sont considérées être valides.

CHAPITRE 8

CONCLUSION

En conclusion, pour vérifier si l'effet du bâtiment sera positif pour une charge donnée d'un bâtiment, il faut calculer la charge qui sera amenée au sol. Si celle-ci est déséquilibrée en mode chauffage, l'effet de la dalle sera positif. Il sera négatif si la charge est déséquilibrée en mode climatisation. Après avoir vérifié la charge portée au sol, il faut simuler le système traditionnel et vérifier où se situe la courbe EWT dans le domaine des limites de la PAC. Si la courbe EWT atteint ou est proche de la limite supérieure de la PAC, l'effet de la dalle risque de nuire à l'autonomie du système. Inversement, si la courbe EWT atteint la limite inférieure de la PAC, l'ajout de la dalle fera décaler la courbe vers le haut et par conséquent augmentera l'autonomie du système. Si la courbe n'atteint aucune des deux limites de la PAC, le système peut être sur-dimensionné et des coûts inutiles engendrés. Il faut alors refaire l'analyse pour un dimensionnement réduit.

D'autre part, l'inclinaison des puits s'est révélée favorable à long terme dans tous les cas de figures étudiés. En mode climatisation dominant, elle vient réduire ou éliminer l'effet négatif du bâtiment. En mode chauffage dominant, l'effet positif de l'inclinaison s'ajoute à celui du bâtiment.

L'étude a également permis de valider les équations analytiques pour le flux thermique sous une dalle en 2D. On a aussi pu démontrer que l'effet saisonnier des variations de température à la surface pouvait être négligé lorsque les forages sont situés sous la dalle.

L'approche proposée a l'avantage de simplifier grandement les temps de calculs par rapport à un modèle entièrement numérique. L'information contenue dans le modèle de bâtiment peut être modélisée à l'aide du logiciel *Comsol* et des dimensions quelconques de bâtiments peuvent être choisies. Celui-ci peut être utilisé directement de *Matlab*, la superposition du modèle numérique au modèle analytique devient très simple à réaliser.

Cette étude a démontré que les effets de la dalle, positifs ou négatifs, ne pouvaient être négligés. En mode climatisation dominant, il faut si possible positionner les puits à l'extérieur du bâtiment. Sinon, il faut alors soit incliner les forages, soit choisir un design avec moins de forages, plus longs, pour ainsi limiter l'effet de la dalle. En mode chauffage dominant, on

a tout intérêt à positionner les puits sous la dalle, choisir des forages courts et incliner ceux-ci.

Comme recommandation pour travaux futurs, il serait très utile de pouvoir confronter nos résultats numériques à des données mesurées in-situ. Il faudrait suivre sur plusieurs années l'évolution de deux bâtiments, un pour chaque mode dominant. On devrait mesurer, à relativement haute fréquence d'échantillonnage, les températures à l'entrée et à la sortie de la PAC pour ainsi connaître avec précision la charge fournie au bâtiment. De même, on devrait mesurer, à plus basse fréquence, la température du sol en quelques points sous la dalle, idéalement à différentes profondeurs.

RÉFÉRENCES

- ANDERSON, B. R. (1991). Calculation of the steady-state heat transfer through a slab-on-ground floor. *Building and Environment*, 26, no. 4, 405–415.
- ASHRAE (1992). Thermal environmental conditions for human occupancy. ansi/ashrae standard 55-1992.
- ASHRAE (1999). *HVAC Application Handbook*. Atlanta,GA.
- BAREITHER, H. et FLEMING, A.N. ANDALBERTY, B. (1948). Temperature and heat loss characteristics of concrete floors laid on ground. Rapport technique, University of Illinois.
- BEDFORD, T. (1964). *Basic Principles of Ventilation and Heating*. H.K. Lewis.
- BERGLUND, L. G. (1995). Proceedings of pan pacific symposium on building and urban environmental conditioning in asia 2 :369-382. *Comfort criteria : Humidity and standards*. University of Nagoya, Japan.
- BERNIER, M. (2000). A review of the cylindrical heat source method for the design and analysis of vertical ground-coupled heat pump systems. *Fourth International Conference on Heat Pumps in Cold Climates*.
- BERNIER, M., PINEL, P., LABIB, R. et PAILLOT, R. (2004). A multiple load aggregation algorithm for annual hourly simulations of gchp systems. *HVAC&R Research*, 10, 471–487.
- BRIGHAM, E. O. (1988). *The Fast Fourier Transform and Applications*. Englewood Cliffs, NJ.
- BUSCH, J. (1992). A tale of two populations : Thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in thailand. *Energy and Buildings*, 18, 235–249.
- CARSLAW, H. et JAEGER, J. (1959). *Conduction of heat in solids, 2nd edition*. Oxford : Clarendon Press.
- CHAPUIS, S. (2009). *Stockage thermique saisonnier dans un champ de puits géothermique verticaux en boucle fermée*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- CHIASSON, A., REES, S. et SPITLER, J. (2000). A preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground-source heat pump systems. *ASHRAE Transactions*, 106, Part 1, 107–121.
- CLAESSON, J. et HAGENTOFT, C.-E. (1991). Heat loss to the ground from building-i. general theory. *Building and Environment*, 26, No.2, 195–208.

- CUI, P., YANG, H. et FANG, Z. (2006). Heat transfer analysis of ground heat exchangers with inclined boreholes. *Applied thermal engineering*, 26, 1169–1175.
- DE DEAR, R., LEOU, K. et AMEN, A. (1991). *Thermal comfort in the humid tropics-Part I*, vol. 97(1). ASHRAE Transactions.
- DELSANTE, A., STOKES, A. et WALSH, P. (1983). Application of fourier transforms to periodic heat flow into the ground under a building. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 26, 121–132.
- DILL, R., ROBINSON, W. et ROBINSON, H. (1945). Measurements of heat losses from slab floors. u.s. department of commerce. national bureau of standards, bms 103.
- ENVIRONNEMENT CANADA (2004). Rapport des données horaires de 1996. montréal : Environnement canada. consulté le 15 septembre 2009, tiré de <http://climate.weatheroffice.gc.ca>.
- ESKILSON, P. (1987). *Thermal analysis of heat extraction boreholes*. Thèse de doctorat, University of Lund, Sweden.
- FANGER, P. O. (1970). *Thermal Comfort*. Danish Technical Press.
- FANGER, P. O. (1972). *Thermal Comfort*. McGraw-Hill, New-York.
- GEHLIN, S. (2003). Comparison of four models for thermal response test evaluation. *ASHRAE Transactions*, v. 109, 131–142.
- GIORDANENGO, M. (2009). Rapport technique : Modélisation de la température du sol. montréal : École polytechnique de montréal.
- HAGENTOFT, C.-E. (1988). Heat loss to the ground from a building. slab on the ground and cellar. Rapport technique, Lund Institute of Technology.
- HART, D. et COUVILLION, R. (1986). Earth coupled heat transfer. Rapport technique, Dublin, OH : National Water Well Association.
- INGERSOLL, L., ZOBEL, O. et INGERSOLL, A. (1954). *Heat conduction with engineering, geological and other applications*. McGraw-Hill, New York.
- JI, S. (1999). Notes de cours - physique du globe. montréal : École polytechnique de montréal. 181–235.
- KAVANAUGH, S. et RAFFERTY, K. (1997). *Ground-source heat pumps. Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*. ASHRAE.
- KREIDER, J. F. (2001). *HVAC Handbook*. CRC Press LLC.
- LACHENBRUNCH, A. (1957). Three-dimensionnal heat conduction in permafrost beneath heating building. *Geological Survey Bulletin 1052-B*.

- LAMARCHE, L. et BEAUCHAMP, B. (2007a). New solutions for the short-time analysis of geothermal vertical boreholes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 1408–1419.
- LAMARCHE, L. et BEAUCHAMP, B. (2007b). A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. *Energy and Buildings*, 39, 188–198.
- MACEY, H. (1949). Heat loss through a solid floor. *Journal of the Institute of Fuel*, 2, 369–371.
- MARCOTTE, D. et PASQUIER, P. (2008a). Fast fluid and ground temperature computation for geothermal ground-loop heat exchanger systems. *Geothermics*, 37, 651–665.
- MARCOTTE, D. et PASQUIER, P. (2008b). On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. *Renewable Energy*, 33, 2407–2415.
- MARCOTTE, D. et PASQUIER, P. (2009). The effect of borehole inclination on fluid and ground temperature for glhe systems. *Geothermics*, 38, 763–770.
- MARCOTTE, D., PASQUIER, P., SHERIFF, F. et BERNIER, M. (2010). The importance of axial effects for borehole design of geothermal heat-pump systems. *Renewable Energy*, 35, 763–770.
- MORRIS, GRENFELL et DAVIES (2004). *Building heat transfer*. John Wiley and Sons, Liverpool.
- NOUANEGUE, H. F., PEYSSON, P., COSTES, V. et BERNIER, M. A. (2009). Influence de la température ambiante et du flux géothermique sur le transfert thermique dans un puits géothermique vertical. *IXème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes*.
- PAHUD, D. (2002). Geothermal energy and heat storage. canobbio : Scuola universitaria professionale della svizzera italiana, consulté le 9 septembre 2009, tiré de www.isaac.supsi.ch/isaac/pubblicazioni/geotermia.
- POSTMA, M. et WALKER, C. (2006). Building envelope design guide-floor slabs. washington : National institute of building sciences. consulté le 20 janvier 2010, tiré de http://www.wbdg.org/design/env_bg_slab.php.
- RANTALA, J. (2005). Estimation of the mean temperature distribution underneath a slab-on-ground structure. *Journal of Building Physics*, 29, 51–68.
- REES, S. W. et THOMAS, H. R. (1997). Two-dimensional heat transfer beneath a modern commercial building : Comparison of numerical prediction with field measurement. *Building Services Engineering Research & Technology*, 18, 169–174.

- SHERIFF, F. (2007). *Génération de facteurs de réponse pour champs de puits géothermiques verticaux*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- SUTTON, M., NUTTER, D. et COUVILLION, R. (2003). A ground resistance for vertical bore heat exchangers with groundwater flow. *Journal of energy ressources technology*, 125, 183–189.
- YAVUZTURK, C. (1999). *Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems*. Thèse de doctorat, Oklahoma State University.
- YAVUZTURK, C. et SPITLER, J. (1999). A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers. *ASHRAE Transactions*, 105, 475–485.
- ZENG (2002). A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers. *Heat Transfer - Asian Research*, 31, 558–567.
- ZENG, H., DIAO, N. et FANG, Z. (2002). A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers. *Heat Transfer - Asian Research*, 31, 558–567.