

Étude des performances d'un échangeur géothermique air-sol
horizontal placé autour des fondations d'un bâtiment
résidentiel

par

Mathieu PATIN

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MEMOIRE EN EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET ÉNERGIES
RENOUVELABLES
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 21 JUILLET 2020

ECOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Mathieu Patin, 2020



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE RAPPORT DE MEMOIRE A ETE EVALUE

PAR UN JURY COMPOSE DE :

M. Daniel Rousse, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

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

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

LE 12 JUIN 2020

À L'ECOLE DE TECHNOLOGIE SUPERIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribués à la rédaction de ce mémoire. Premièrement monsieur Daniel Rousse qui de par son soutien m'a permis de travailler sans problèmes administratifs et techniques. Ainsi que pour son optimisme et son enthousiasme qui aide énormément à avancer. J'aimerais également remercier monsieur Michel Trottier. Grâce à son soutien financier, j'ai pu me concentrer pleinement sur la rédaction de ce document.

Je remercie également tout le personnel de l'INSA Centre val de Loire et de l'ETS sans qui je n'aurais pas eu l'occasion d'entreprendre ce travail.

Finalement, merci à ma famille et à mes proches pour m'avoir soutenue moralement tout au long de mes études à l'ETS.

Étude des performances d'un échangeur géothermique air-sol horizontal placé autour des fondations d'un bâtiment résidentiel

Mathieu PATIN

RÉSUMÉ

Un échangeur air-sol aussi appelé puits canadien est un système qui permet de diminuer la charge de chauffage/climatisation créée par la ventilation. Il consiste en un réseau de tubes souterrains dans lesquels circule l'air avant d'être introduit dans le bâtiment. Bien que connu depuis longtemps ces systèmes restent rares, entre autres en raison des coûts liés à l'excavation. En plaçant l'échangeur autour des fondations du bâtiment lors de sa construction, ces coûts sont annulés. Cependant l'espace disponible est alors limité. L'étude présente cherche à estimer si une configuration de ce type est viable économiquement pour une habitation unifamiliale située à Montréal. Dans ce but des simulations utilisant le logiciel TRNSYS furent effectuées.

Une étude de dimensionnement est menée pour trouver la configuration donnant les meilleurs résultats. Elle conclut que des tubes de petits diamètres constitués de matériaux peu chers donnent de meilleurs résultats. Ils doivent également être placés le plus profond et le plus loin possible des fondations. Les résultats mettent en avant des pertes importantes par court-circuitage et par couplage. En somme, environ 50 % de la chaleur sensible échangée avec le sol est ainsi réellement utile. Pour l'habitation étudiée, l'échangeur dans sa configuration optimale permet de réduire la charge de chauffage/climatisation de 711 kWh/an. Cette valeur est trop faible pour compenser, dans un délai raisonnable, l'achat et l'installation de l'échangeur. L'étude n'indique donc pas de bonne perspective pour le système au Québec. Une étude de sensibilité est également effectuée et conclue que les résultats des simulations sont fortement liés aux paramètres utilisés pour caractériser le sol et le climat.

Mots-clés : Échangeur air-sol, puits canadien, TRNSYS, simulation de bâtiment, VRC

Performance study of a horizontal earth-to-air heat exchanger placed around the foundations of a residential building

Mathieu PATIN

ABSTRACT

An earth-to-air heat exchanger is a system that decreases a building heating/cooling load. It is composed of an underground pipe network in which air circulates before being injected into the building. Even if though this technology had been known for a while, it is rarely used namely because of the cost associated with excavation. Nevertheless, if the heat exchanger is placed around the foundations during their construction, this cost is vanished. However, the space available is then limited. This study tries to estimate the economic viability of this kind of configuration for a one-family house in Montréal. For this, simulations were carried out using the TRNSYS software.

A sizing study was done to find the configuration that gives the best results. It concluded that ducts with small diameters made of a cheap material are better and that they should be placed as deep and as far of the foundation as possible. The results show significant losses by thermal short-circuiting and coupling. Only around 50 % of the sensible heat exchanged with the ground is used to reduce the load. The heat exchanger in its optimal configuration reduces the heating/cooling load of the building by 711 kWh/year. This value is too low to yield a reasonable payback period for the purchase and the installation of the exchanger. This study does not indicate a great potential for this type of system in Quebec. A sensitivity study was also carried out and its conclusion are that the simulation results are strongly tied to the ground and weather parameters used.

Keywords: Earth-to-air heat exchanger, TRNSYS, building simulation, HRV

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Caractéristiques thermiques du sol	3
1.1.1 Température du sol	3
1.1.1.1 Méthodes analytiques.....	3
1.1.1.2 Modèles numériques	6
1.1.2 Caractéristiques du sol	7
1.2 Échangeurs de chaleurs géothermiques	8
1.2.1 Échangeurs géothermiques à air (puits canadien).....	8
1.2.1.1 Utilisation.....	8
1.2.1.2 Fonctionnement.....	9
1.2.1.3 Risques et protections associés	10
1.2.2 Réseau de tubes.....	11
1.2.2.1 Géométrie du réseau	11
1.2.2.2 Placement traditionnel du réseau	13
1.2.2.3 Installation du réseau dans les fondations.....	14
1.3 Modèles de simulation de l'échangeur	17
1.3.1 Modèles 1D.....	17
1.3.2 Modèles 2D.....	19
1.3.3 Modèles 3D.....	21
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	25
2.1 Environnement TRNSYS.....	25
2.2 Simulation du bâtiment.....	25
2.2.1 Enveloppe	26
2.2.2 Mouvement d'air.....	27
2.2.2.1 Ventilation.....	27
2.2.2.2 Infiltrations.....	28
2.2.3 Transfert d'énergie.....	30
2.3 Données météo.....	31
2.4 Ventilateur récupérateur de chaleur (VRC)	32
2.4.1 Caractéristiques.....	32
2.4.2 Dégivrage.....	33
2.5 Échangeur air-sol	35
2.5.1 Simulation du sous-sol.....	35
2.5.2 Simulation du tube	38
2.5.3 Commande de l'échangeur	39
CHAPITRE 3 DIMENSIONNEMENT DE L'ÉCHANGEUR.....	41
3.1 Étude préliminaire.....	41

3.1.1	Étude du bâtiment sans échangeur	41
3.1.2	Étude du bâtiment avec échangeur	42
3.1.2.1	Effet du couplage échangeur géothermique-VRC	43
3.1.2.2	Pertes par court-circuitage thermique	45
3.2	Paramètres de l'étude économique	46
3.2.1	Coût de l'échangeur géothermique air-sol	46
3.2.2	Économies apportées par l'échangeur géothermique	50
3.3	Étude paramétrique	51
3.3.1	Matériaux	52
3.3.2	Nombre de tubes	53
3.3.3	Diamètre.....	54
3.3.4	Profondeur.....	56
3.3.5	Distance entre l'échangeur et le bâtiment	57
3.3.6	Longueur de l'échangeur	58
3.4	Bilan du dimensionnement	60
CHAPITRE 4	ÉTUDE DE SENSIBILITÉ	63
4.1	Sensibilité aux paramètres du sous-sol du bâtiment	63
4.1.1	Consigne de chauffage du sous-sol.....	63
4.1.2	Isolation du sous-sol	65
4.2	Sensibilité aux paramètres de la ventilation.....	67
4.2.1	Débit de ventilation.....	67
4.2.2	Efficacité du VRC.....	68
4.3	Sensibilité à l'emplacement du bâtiment.....	69
4.3.1	Conduction du sol	69
4.3.2	Météo	70
CONCLUSION		73
RECOMMANDATIONS		75
ANNEXE I	ANALYSE DES EFFETS DE COUPLAGE ÉCHANGEUR/VRC.....	77
ANNEXE II	ARTICLE (VERSION PRÉLIMINAIRE)	81
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE		99

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Valeurs de la conductivité et la diffusivité pour différents sols adapté de (Giardina, 1995).....7
Tableau 1.2	Performances de trois puits canadiens adaptés de (Pfafferott, 2003)15
Tableau 2.1	Résistances thermiques du bâtiment adapté de (Conseil National de Recherches Canada (CNRC), 2015)27
Tableau 2.2	Débits d'infiltrations recommandés par différents instituts tiré de (Law & Williams, 2016) ¹29
Tableau 2.3	Valeurs régissant le dégivrage du modèle 65H adapté de (VänEE, 2011)34
Tableau 2.4	Propriétés thermiques des matériaux utilisés pour la simulation du sol38
Tableau 2.5	Paramètres pour le calcul de l'échange convectif dans le tube en fonction de son rayon tiré de (Hollmuller, 2002)39
Tableau 3.1	Coût d'un mètre de tube en PEHD en fonction de son diamètre47
Tableau 3.2	Pertes de charge dans le système en fonction du diamètre des tubes49
Tableau 3.3	Tarif moyen de l'électricité au Canada tiré de (Urban, 2020)50
Tableau 3.4	Propriétés thermiques des matériaux utilisés pour la simulation du sol52

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Variation de la température du sol au cours de l'année à différentes profondeurs (calculés avec l'équation 1.1)5
Figure 1.2	Schéma d'un puits canadien, tiré de (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), 2012)10
Figure 1.3	Schéma des configurations pour un échangeur horizontal, adapté de (Desmeules, 2017)12
Figure 1.4	Fondation Fondatherm [®] , tiré de (Taurines et al., 2019)16
Figure 2.1	Représentation de l'habitation simulée26
Figure 2.2	Moyennes mensuelles des données météo utilisées pour la simulation.....32
Figure 2.3	Schéma du fonctionnement normal et en dégivrage du VRC tiré de (VänEE, 2018)34
Figure 2.4	Commande des cycles de dégivrage35
Figure 2.5	Coupe y-z de la simulation du sol.....36
Figure 2.6	Évolution de la charge du bâtiment en fonction du maillage du type : (a) 460 (b) 124437
Figure 2.7	Schéma de la simulation sous TRNSYS.....40
Figure 3.1	Charges mensuelles de chauffage/climatisation du bâtiment sans échangeur42
Figure 3.2	Variation du gain apporté par l'échangeur en fonction du matériau utilisé pour les tubes.....53
Figure 3.3	Variation du gain apporté par l'échangeur en fonction du nombre de tubes le composant.....54
Figure 3.4	Variations en fonction du diamètre a) du gain apporté par l'échangeur, b) de l'énergie reçue par l'échangeur et c) des effets de court-circuitage .56
Figure 3.5	Variation du gain apporté par l'échangeur en fonction de sa profondeur d'enfouissement57

Figure 3.6	Variations en fonction de la distance échangeur-fondation a) de la réduction de la charge, b) des effets de court-circuitage58
Figure 3.7	Variation du gain apporté par l'échangeur géothermique en fonction de sa longueur59
Figure 3.8	PRI de l'échangeur en fonction de sa longueur60
Figure 4.1	Gain en fonction de la température du sous-sol.....64
Figure 4.2	Effets de court-circuitage dus à la présence de l'échangeur en fonction de la température du sous-sol.....64
Figure 4.3	Effets de court-circuitage mensuel dus à la présence de l'échangeur en fonction de la température du sous-sol65
Figure 4.4	Variation en fonction de l'isolation du sous-sol a) du gain apporté par l'échangeur b) de l'effet de court-circuitage.....66
Figure 4.5	Variation en fonction du débit de ventilation a) du gain apporté par l'échangeur b) des pertes de couplage.68
Figure 4.6	Variation en fonction de l'efficacité du VRC a) du gain apporté par l'échangeur b) de la perte de couplage.69
Figure 4.7	Variation du gain apporté par l'échangeur en fonction de la conductivité du sol entourant le bâtiment70
Figure 4.8	Températures mensuelles dans les 6 villes étudiées72
Figure 4.9	Charge annuelle de chauffage et de climatisation dans différentes villes .72
Figure 4.10	Gains de chauffage et climatisation apportés par l'échangeur.....72

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
APCHQ	Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec
ASES	American Solar Energy Society
ASHRAE	American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
COP	Coefficient de performance
CWEC	Canadian Weather Year for Energy Calculation
D	Dimension
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
MFN	Mécanique des Fluide Numérique
PRI	Période de retour sur investissement
PEHD	Polyéthylène Haute Densité
TESS	Thermal Energy Systems Specialists
VRC	Ventilateur Récupérateur de Chaleur

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A	Amplitude de température [$^{\circ}\text{C}$]
c	Chaleur spécifique [$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
D	Diamètre
f	Coefficient de friction de Darcy
h	Coefficient de convection [$\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$]
K_f, K_m, K_i, K_d	Coefficients pour le calcul des pertes de charge
k	Conductivité thermique [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
L	Longueur [m]
l	Enthalpie de vaporisation [J/kg]
N	Nombre
P	Pression [Pa]
Q	Débit [L/s]
r	Coordonnée polaire, distance radiale de l'axe du tube [m]
Re	Nombre de Reynolds
T	Température de l'élément [$^{\circ}\text{C}$]
t	Temps [s, jour]
t_0	Temps de déphasage annuel [jour]
v	Vitesse (m/s)
y	Coordonnée polaire, distance de l'entrée du tube [m]
z	Profondeur du sol [m]

Lettres grecques

α	Diffusivité thermique par heure [m^2/h]
----------	---

XX

ε	Coefficient de rugosité [m]
μ	Viscosité cinématique [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$]
ρ	Densité [kg/m^3]

Indices

air	Air
br	Chambre (bedroom)
eau	Eau
floor	Parquet
h	Humidité
moy	Moyenne
surf	Surface du sol ($z=0$)
sol	Sol
tot	Total

INTRODUCTION

La géothermie est une énergie renouvelable connue et couramment utilisée. Elle consiste comme sa racine latine l'indique à utiliser l'énergie de la terre (« géo ») pour produire ou évacuer de la chaleur (« thermos »). Il existe deux grands types d'exploitations géothermiques. Le premier consiste à prélever directement l'énergie produite par la terre. Certaines de ces exploitations travaillent avec de hautes températures (+ de 150 °C) et produisent généralement de l'électricité. Toujours dans le premier type, d'autres exploitations prélèvent l'énergie à températures plus basses (80-85 °C) et font circuler le fluide caloporteur issu d'un aquifère. Leur implantation est fortement dépendante de la présence d'un gisement géothermique et elle ne peut donc pas être utilisée partout. Le second type consiste lui à utiliser le sol comme un réservoir de chaleur. L'énergie utilisée ne provient ici pas des profondeurs de la terre ou d'un aquifère directement, mais de l'énergie emmagasinée dans le sol et qui y transite à bas taux de transfert par diffusion et qui est stockée à basses températures (6-22°C). Les transferts de chaleur dans ce second cas sont nettement plus faibles, réservant son utilisation à quelques applications spécifiques. Le travail développé ici porte sur une de ces applications : les échangeurs air-sol.

Utiliser les propriétés thermiques du sol pour mitiger la température des habitations est une ancienne pratique. Les premières traces de cette pratique remontent à plus de 600.000 ans av. J.-C. sous la forme de maisons souterraines (Alkaff, Sim, & Ervina Efzan, 2016). Le simple fait d'être placée sous la surface du sol permettait à ces habitations un meilleur confort thermique. Par la suite, des méthodes plus élaborées furent développées. L'une d'elles consistant à faire circuler de l'air sous les fondations d'une habitation pour la refroidir. On retrouve des vestiges d'habitations iraniennes utilisant ce type de système dès 3000 av. J.-C. (Bahadori, 1978). Un échangeur air-sol consiste également à faire circuler l'air dans un circuit de tubes enterré pour refroidir ou réchauffer l'air, en fonction de la saison. Il est ainsi envoyé avec une température plus proche de celle du bâtiment qu'avant d'entrer dans l'échangeur.

Il existe de nombreuses dispositions, pour les tubes, utilisées à travers le monde. Mais comme cela sera mis en avant par la revue de littérature, le coût important de l'excavation nécessaire pour installer l'échangeur limite souvent la viabilité économique de ces systèmes. Pour contourner ce problème il existe une configuration où l'échangeur est placé autour des fondations d'un bâtiment. Dans ce cas, une grande économie en frais d'installation est possible lorsque les tubes sont placés en même temps que la construction du sous-sol. Ainsi, les coûts d'excavation imputables à l'échangeur sont annulés.

L'étude présentée ici a pour but d'obtenir une première approximation du potentiel économique d'une configuration de ce type. Notamment pour le cas particulier d'un bâtiment résidentiel unifamilial situé au Sud du Québec. Pour cela, il est nécessaire d'estimer la charge de chauffage/climatisation de l'habitation puis l'économie qu'apporte l'échangeur en réduisant cette charge. Cette économie est ensuite comparée à une approximation du coût d'achat et d'installation de l'échangeur pour finalement statuer sur la viabilité économique du système. Le mémoire ne s'attarde pas à discuter des précautions requises pour évacuer la condensation qui se produit en mode climatisation lorsque la température de l'air qui circule atteint le point de rosée dans l'échangeur.

Le mémoire est découpé en 4 chapitres. D'abord, une revue de la littérature est présentée dans le but d'illustrer la pertinence d'utiliser une configuration placée autour des fondations ainsi que de développer les raisons amenant au choix du logiciel TRNSYS pour les simulations. Vient ensuite un chapitre consacré à la méthodologie qui détaille les différents paramètres qui déterminent le comportement de la simulation et les valeurs qui leurs sont attribuées. Les résultats des simulations sont répartis dans les deux derniers chapitres. Le premier consacré au dimensionnement de l'échangeur qui sert également à statuer sur la viabilité de l'échangeur dans le cadre précis du Québec. Puis, le dernier chapitre qui présente une étude de sensibilité du modèle. Cette dernière a pour but d'appréhender quels paramètres impactent fortement les simulations et d'estimer les limites des résultats.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Caractéristiques thermiques du sol

La puissance qui est récupérable par un dispositif géothermique de surface dépend directement de la différence entre la température du sol et la température ambiante. Cette différence est notamment gouvernée par la capacité du sol à absorber le rayonnement solaire et par son inertie thermique. En effet, bien que le sol réponde à la température extérieure sa réponse est toujours déphasée et amortie. Il sera ainsi plus froid que l'air en été et plus chaud en hiver.

L'étude et le dimensionnement de tout échangeur géothermique demandent donc une bonne connaissance de l'évolution des gradients de température dans le sol tout au long de l'année.

1.1.1 Température du sol

Il existe deux types de méthodes couramment utilisées pour obtenir la température du sol en fonction du temps et de la profondeur, celles analytiques et celles numériques.

1.1.1.1 Méthodes analytiques

Une première approche consiste à trouver une équation qui permet de facilement calculer la température. Une possibilité est de considérer le sol comme un solide semi-infini dans lequel seul le transfert de chaleur par conduction et suivant la loi de Fourier est considéré. Ces approximations permettent de calculer un gradient de température pour le sol en fonction de la profondeur. Pour une profondeur donnée, la variation est sinusoïdale et dépend uniquement des variations annuelles de la température à la surface (Kusuda & Achenbach, 1965). On peut représenter ces variations avec l'équation (1.1) tirée de (Carslaw & Jaeger, 1959).

$$T_{sol}(z, t) = T_{surf, moy} - A_{surf} \times e^{-z \left(\frac{\pi}{365\alpha} \right)^{0.5}} \times \cos \left(\frac{2\pi}{365} \times \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{\alpha\pi} \right)^{0.5} \right) \right) \quad (1.1)$$

Où $T_{surf, moy}$ est la température moyenne annuelle en surface (°C) ; A_{surf} est l'amplitude des variations de température sur l'année (°C); z est la profondeur (m); α est la diffusivité thermique du sol (m²/jour); t est le temps en nombre de jour par rapport au début de l'année; t_0 est le temps en jour correspondant à la température la plus faible de l'année (déphasage de la courbe de température).

Des modèles analytiques utilisant un nombre plus important d'harmoniques de la variation de la température de surface sur l'année existent. Ils permettent de mieux appréhender les variations mensuelles et journalières, le modèle à un harmonique conservant uniquement les variations saisonnières. Le modèle avec le spectre complet d'harmoniques peut être exprimé par l'équation (1.2) (Xing & Spitler, 2017), adaptée pour des variations horaires.

$$T_{sol}(z, t) = T_{surf, moy} - \sum_{n=1}^{\infty} A_{surf, n} \times e^{-z \left(\frac{n\pi}{365\alpha} \right)^{0.5}} \times \cos \left(\frac{2\pi}{365} \times \left(t - t_{0, n} - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{n\alpha\pi} \right)^{0.5} \right) \right) \quad (1.2)$$

Avec $t_{0, n}$ le déphasage pour l'harmonique n et $A_{surf, n}$ est l'amplitude des variations de température sur l'année pour l'harmonique n .

La principale limite à l'utilisation de ces deux équations est que la température de surface n'est que rarement connue. En effet, les stations météo ne fournissent en général que les données sur la température de l'air. Une approximation régulièrement effectuée dans la littérature consiste à l'estimer en considérant les valeurs de l'air ambiant (Peretti, Zarrella, De Carli, & Zecchin, 2013). Cependant, cela ne prend pas en compte les différences de couverture du sol ainsi que les effets liés au ruissellement d'eau. Une étude supplémentaire des données de terrain peut être ainsi nécessaire pour affiner les résultats obtenus. Cette méthode reste cependant largement utilisée dans la littérature.

Pour illustrer l'équation (1.1) avec l'exemple de Montréal il faut étudier les données météo ce qui donne une amplitude de 15,6 °C et une température moyenne de 7,6 °C pour l'air (Climat, 2019). Un sol avec une diffusivité thermique de 0,0557 m²/jour correspondant à un sol dense et humide (voir 1.1.2) est considéré. Les résultats approximatifs sont visibles sur la Figure 1.1

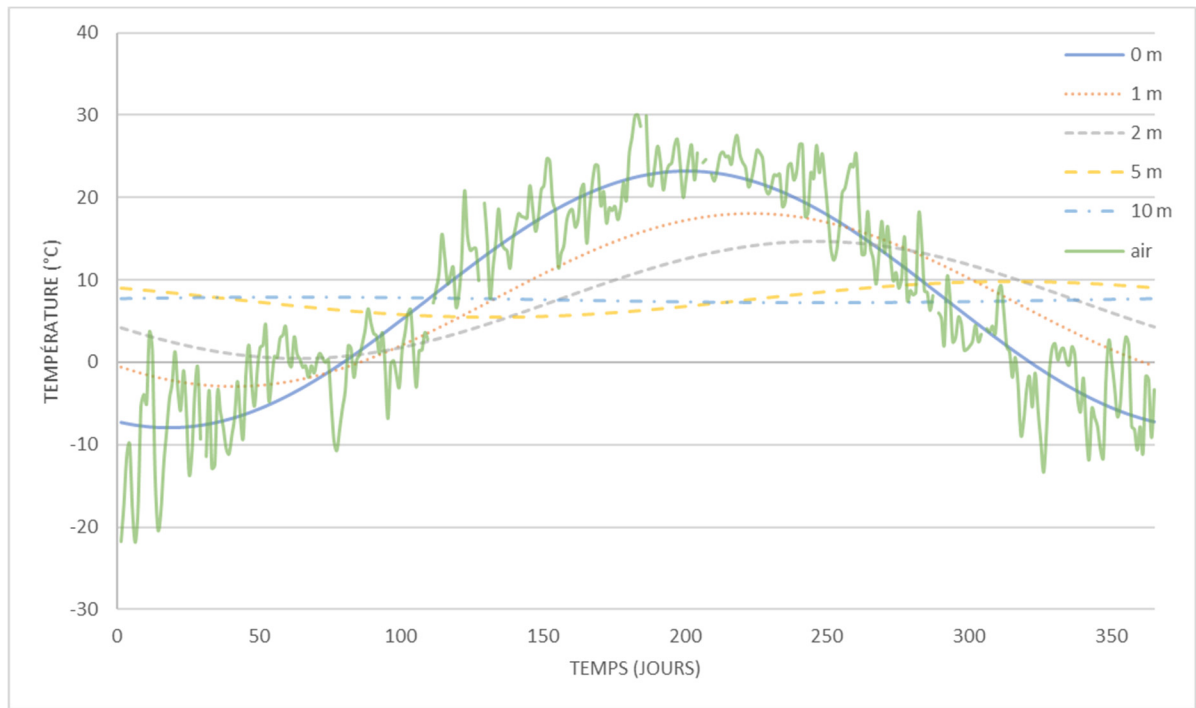


Figure 1.1 Variation de la température du sol au cours de l'année à différentes profondeurs (calculés avec l'équation 1.1)

Il est facile d'observer sur cet exemple les différences de température entre les différentes strates du sol. La chaleur qui sera utilisée dans un système géothermique basse profondeur provient de la différence d'amplitude entre les courbes et de leurs déphasages.

(Khatry, Sodha, & Malik, 1978) présentent un modèle basé sur des hypothèses similaires aux précédentes, mais en considérant le flux entrant au niveau de la surface du sol. Cependant, l'équation résultante dépend de paramètres issus des données de températures surfaces et devient *de facto* complexe ce qui limite son application. (Xing & Spitler, 2017).

Pour atteindre une précision plus importante, il peut être nécessaire de prendre en compte le type de couverture de la surface (végétation, sol nu, béton...). (Mihalakakou, Santamouris, Lewis, & Asimakopoulos, 1997) appliquent des bilans d'énergies sur la surface du sol pour obtenir la température moyenne et l'amplitude des variations de la température de surface. Les valeurs sont ainsi adaptées à la couverture.

1.1.1.2 Modèles numériques

Une autre méthode plus précise pour calculer la température du sol consiste en une analyse numérique du sol. Le domaine physique est alors transformé en un réseau de mailles dans lesquelles les équations de conservation sont appliquées. Sont généralement considérées comme énergie entrante dans le domaine : les radiations solaires et la convection avec l'air. Pour l'énergie sortante : les radiations émissent par le sol et la chaleur latente d'évaporation. Selon la précision recherchée, d'autres effets peuvent être pris en compte : comme le gel, la couverture par la neige, etc...

Cette méthode est exigeante en puissance de calcul en raison de la quantité de mailles à traiter et est donc rarement utilisée pour calculer la température du sol non perturbé. Son utilisation se justifie lorsque le domaine étudié devient plus complexe ou singulier. Notamment pour le cas où le sol est perturbé par la présence d'un échangeur ou d'un bâtiment. Comme cela est abordé dans la section 1.3.

Pour le cas de l'influence d'un bâtiment (Mihalakakou, Santamouris, Asimakopoulos, & Argiriou, 1995) présentent un modèle numérique permettant de calculer la température du sol dans cette configuration. Le modèle applique l'équation tridimensionnelle de transfert de chaleur à chaque volume de contrôle. Le modèle, ensuite développé dans le logiciel TRNSYS, est comparé à des données expérimentales mesurées dans le sol sous le bâtiment de la faculté de philosophie de l'université d'Ioannina. Le modèle prédit la température sous le bâtiment avec une erreur qui dépasse rarement les 0,3 °C.

(Xing, Li, Nan, & Hu, 2017) ont comparé l'utilisation d'un modèle numérique ainsi que celle d'un modèle analytique à deux harmoniques basés sur l'équation (1.2). Leur conclusion est que compte tenu de la complexité de calcul du modèle numérique l'utilisation du modèle analytique répondait mieux aux exigences des applications de conception.

1.1.2 Caractéristiques du sol

La diffusivité, la conductivité et la chaleur spécifique du sol influencent fortement son comportement thermique. Tel que discuté dans la partie 1.1.1 ces valeurs sont nécessaires pour calculer la température du sol. Le problème est qu'elles dépendent de nombreux paramètres. Mesurer la température sur site est donc la meilleure manière d'obtenir des valeurs fiables. Cependant, comme cela n'est pas possible ici, la présente étude s'appuiera sur les données de (Giardina, 1995) pour le sol. Elles sont résumées dans le Tableau 1.1. Pour les matériaux de remblais les données sont extraites de (Dalla Santa et al., 2017; Hamdhan & Clarke, 2010).

Tableau 1.1 Valeurs de la conductivité et la diffusivité pour différents sols adapté de (Giardina, 1995)

Sol	Densité (kg/m ³)	Conductivité (W/(m.K))	Diffusivité (m ² /jour)	Chaleur spécifique massique (J/(kg.K))
Dense et saturé	3200	2,42	0,078	837
Dense et humide	2096	1,3	0,0557	963
Dense et sec	2000	0,865	0,0446	837
Léger et humide	1600	0,865	0,0446	1047
Léger et sec	1400	0,865	0,024	837

La valeur de la diffusivité dépend du pourcentage d'humidité. Cela peut être problématique, car elle n'est alors pas uniforme dans le sol et sa répartition est influençable par un gradient de chaleur. Une attention particulière aux transferts de masse dans le sol est donc nécessaire.

1.2 Échangeurs de chaleurs géothermiques

Les échangeurs géothermiques sont constitués de tubes enterrés dans lesquels circule un fluide. Le fluide absorbe ou relâche de la chaleur dans le sol permettant respectivement de chauffer ou de climatiser. Ces échangeurs peuvent avoir différentes applications. Ils sont utilisés dans le secteur du bâtiment pour diminuer ou annuler les charges de chauffage/climatisation ainsi que dans le secteur agricole pour maîtriser l'environnement de culture et d'élevage. On peut aussi trouver ces échangeurs utilisés pour moduler la température de certains procédés industriels. Comme par exemple dans le système proposé par (Vidhi, 2014) où un échangeur à air est utilisé pour diminuer la température d'un drain thermique. L'ensemble des applications des échangeurs géothermiques à air peut être trouvé dans (Agrawal, Misra, Agrawal, Bhardwaj, & Jamuwa, 2019). Cette revue se concentrera sur les échangeurs dans le milieu résidentiel.

Les échangeurs diffèrent par : le fluide utilisé, la géométrie et la force motrice.

1.2.1 Échangeurs géothermiques à air (puits canadien)

Les échangeurs géothermiques à air peuvent être nommés de différentes manières : puits canadien, puits provençal, puits climatique, échangeur géothermique air-air, échangeur air-sol, etc. Quel que soit le nom utilisé, c'est une ancienne technique pour gérer la température des habitations. Les nouvelles exigences sur la consommation des habitations en font de nouveau un sujet de recherche.

1.2.1.1 Utilisation

Pour répondre aux normes de construction, toute habitation doit être pourvue d'un système de ventilation permettant de progressivement renouveler l'air. En 2006 l'Institut National de Santé Publique du Québec estimait à 60 L/s ce débit pour une habitation de 10 pièces (INSPQ, 2006). Cet air est généralement directement prélevé depuis l'extérieur et devra donc être conditionné une fois à l'intérieur pour répondre aux exigences de confort en termes de

température et d'humidité. L'objectif du puits canadien consiste à réduire la charge induite par cette entrée d'air en fournissant de l'air neuf déjà totalement ou en partie conditionné par l'échangeur géothermique.

1.2.1.2 Fonctionnement

Le principe de cet échangeur est assez simple. L'air est prélevé à température ambiante extérieure pour être envoyé sous terre dans des tubes. L'air est progressivement chauffé ou refroidi, selon les saisons, par échange thermique avec le sol. Il est ensuite diffusé dans un bâtiment. La Figure 1.2 comporte un schéma représentant un puits canadien.

En plus des tubes souterrains, un système de dérivation est nécessaire pour déconnecter le système dans le cas où l'effet du sol serait une contrainte pour le conditionnement de l'air. (Flaga-Maryanczyk, Schnotale, Radon, & Was, 2014) ont observé le cas où un échangeur à air refroidissait l'air ambiant pendant certains jours de l'hiver. Ce système de dérivation permet également au sol de récupérer de l'influence de l'échangeur. Le sol peut ainsi revenir à sa température non influencée lors des périodes de non-utilisation, comme la nuit pour les bureaux. Lorsque l'échangeur est utilisé sans interruption, donc sans possibilité de récupération, les performances peuvent être affectées. (Bansal, Misra, Agarwal, & Mathur, 2013) ; (Niu, Yu, Yu, & Li, 2015b).

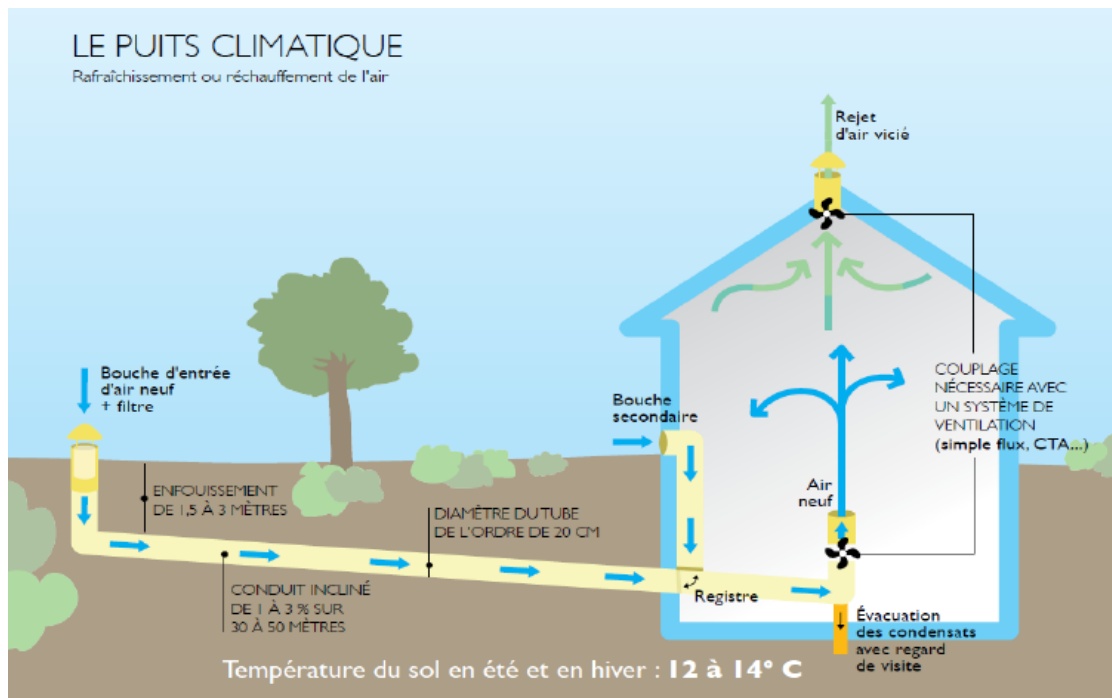


Figure 1.2 Schéma d'un puits canadien, tiré de (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), 2012)

Il est rare de voir un échangeur air-sol fournir la totalité de la charge de conditionnement. Un couplage est donc parfois effectué avec d'autres systèmes, on parle de système hybride. L'élément avec lequel il est couplé peut être passif (cheminée solaire, tour à vent, Ventilateur récupérateur de chaleur (VRC), etc...) ou actif (conditionneurs d'air, etc...) (Agrawal et al., 2019).

Des systèmes en boucle fermée où l'air est prélevé directement dans la maison pour y être renvoyé existent aussi. Dans ces systèmes, le but n'est plus de réduire la consommation due à la ventilation, mais de directement chauffer/refroidir le bâtiment.

1.2.1.3 Risques et protections associés

Un puits canadien peut avoir un impact sur la qualité de l'air qui est fournie au bâtiment. En effet, l'air circulant dans les tubes n'effectue pas qu'un échange thermique avec le sol. L'air peut aussi entrer en contact avec de l'eau stagnante issue de la condensation ou des infiltrations.

Cette eau peut poser de graves problèmes sanitaires, car c'est un milieu propice au développement de bactéries. Une solution pour éviter cela consiste à incliner les tubes pour évacuer l'eau, une inclinaison de 2 % est conseillée par (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2012). Diminuer les infiltrations d'eau peut bien sûr aussi réduire ce risque.

Une autre contamination de l'air pouvant avoir lieu dans l'échangeur est causée par le radon. Le radon est un gaz qui apparaît lorsque l'uranium contenu dans la croûte terrestre se décompose. Ce gaz est radioactif et peut causer, pour de longues expositions, des cancers du poumon chez les habitants. Il pénètre naturellement dans les maisons par les sous-sols à cause de la différence de pression (Loyau, 2005). De la même manière, un échangeur à air souterrain peut fournir de l'air avec une faible concentration de radon. Il faut donc être vigilant à la teneur en radon du sol et à l'étanchéité des tubes avant l'installation.

Comme pour tout système de ventilation l'entrée d'air doit être positionnée en hauteur et être équipée d'un filtre pour éviter l'entrée de poussières et empêcher la pénétration par de petits animaux (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2012).

1.2.2 Réseau de tubes

1.2.2.1 Géométrie du réseau

La différence de géométrie pour les échanges géothermiques s'effectue presque exclusivement sur l'agencement des tubes. Ce choix de design va fortement influencer les performances du système. Les tubes peuvent être disposés verticalement ou horizontalement.

Les dispositions verticales ont pour avantage de requérir un faible espace en surface. Cependant, le coût pour mettre en place les tubes est plus important (Gao, Li, Xu, Gang, & Yan, 2018). Ces géométries ne sont pas étudiées dans ce mémoire.

Ils existent quatre dispositions horizontales classiquement utilisées : simple, en anneau, en serpentín et en grille (Figure 1.3).

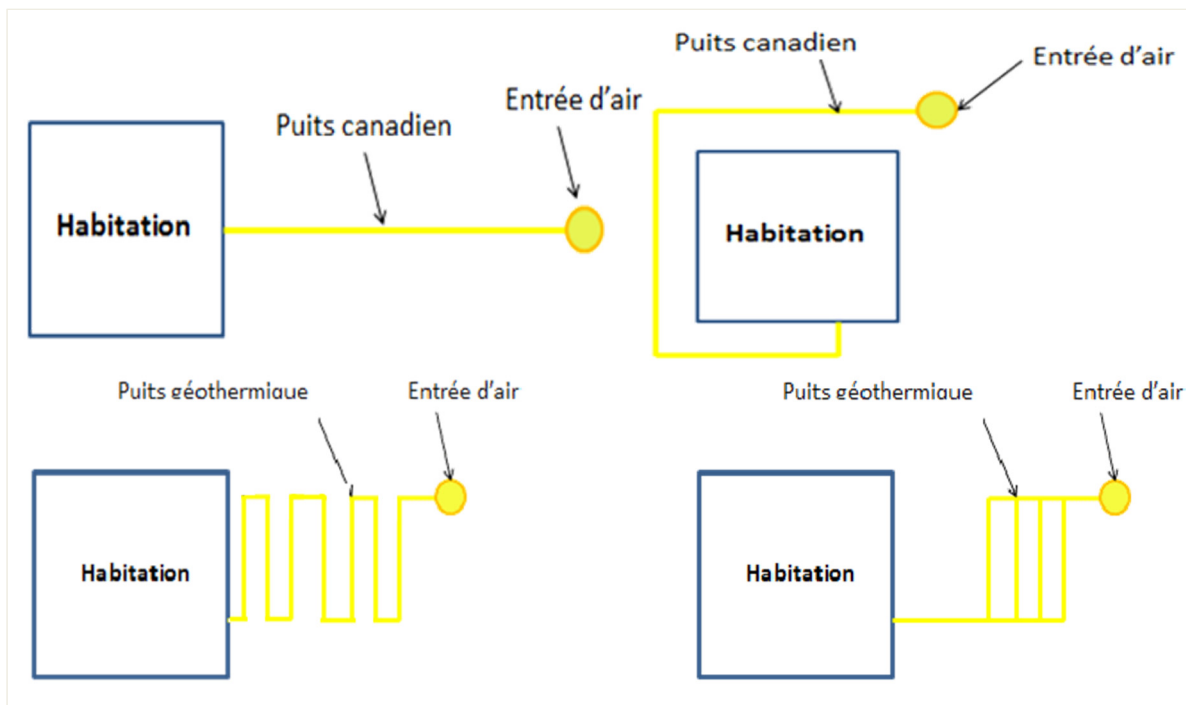


Figure 1.3 Schéma des configurations pour un échangeur horizontal, adapté de (Desmeules, 2017)

Le modèle simple, en anneau ou en serpentín ne possède qu'un seul tube, son utilisation est limitée pour des débits de faibles importances. La disposition en grille a pour but de répartir le débit total dans chaque tube. Cela permet d'augmenter la surface d'échange par rapport à un tube simple qui pour le même débit total devra avoir un diamètre très important. La disposition en grille est donc à favoriser pour des débits importants.

La présence de coudes dans la géométrie a pour effet de fortement augmenter les pertes de charge. Une disposition simple, limitant le nombre de coudes, demandera ainsi moins de puissance mécanique pour faire circuler l'air que les autres.

Le choix de la géométrie à adopter dépend de la surface disponible pour l'installation et du débit demandé par le bâtiment. Cette étude considère une configuration en anneau (Figure 1.3, partie supérieure droite), car c'est la seule configuration pouvant être placée autour des fondations d'une maison.

1.2.2.2 Placement traditionnel du réseau

Les géométries de la Figure 1.3 peuvent être disposées dans le sol sous différentes surfaces. On séparera ces surfaces en deux catégories. Les surfaces dites ouvertes qui donnent directement sur l'air (pelouse, sol nu, béton...) et les surfaces occupées par un bâtiment qui vont fournir ou absorber de l'énergie. Placer l'échangeur sous une surface ouverte est l'approche la plus classique. L'échangeur est placé sous un espace libre proche du bâtiment (jardin, parking...). Cela a comme inconvénient de demander un grand espace et un investissement important pour l'excavation.

(Ascione, Bellia, & Minichiello, 2011) illustrent la forte dépendance entre la rentabilité d'un puits canadien et les caractéristiques du sol dans lequel il est installé. Les périodes de retour sur investissement (PRI) estimées du système pour trois climats italiens (Milan, Rome et Naples) sont de 4,5 à 5,5 ans pour un sol meuble (excavation facile), de 7,4 à 9,1 ans pour un sol faiblement rocailleux (excavation standard) et de 22,8 à 28,1 ans pour un sol fortement rocailleux (excavation difficile). Le coût de l'électricité pour cette analyse est de 0,20 \$/kWh.

(Bansal, Misra, Agrawal, & Mathur, 2012) étudient en détail l'influence de la qualité des éléments utilisés dans un puits canadien en Inde. Ils présentent un retour sur investissement de 3,3 ans pour un système muni d'un ventilateur efficace et de 14,1 ans pour un ventilateur standard avec un coût de l'électricité de 0,16 \$/kWh. L'impact du système de conditionnement que l'échangeur remplace est aussi étudié. Les périodes de retour sur investissement varient de 5,8 à 51 ans selon sa qualité. Ils concluent donc que si le système déjà en place est très efficace, il est impossible de rentabiliser l'installation d'un échangeur géothermique.

(Hollmuller & Lachal, 2001) mesurent la performance d'un système installé en Suisse couplé avec un collecteur solaire. Les économies générées par le système sont calculées par rapport au coût équivalent de diesel utilisé pour le chauffage et de la ventilation pour le refroidissement. La période de retour sur investissement ainsi estimée s'élève à 15,7 ans.

Toutes ces études démontrent une forte sensibilité des performances des puits canadiens au climat, au type de sol, aux pièces et équipements utilisés pour la conception et aux méthodes utilisées pour le conditionnement de l'air. Un même système peut ainsi devenir complètement impossible à rentabiliser ($PRI > \text{durée de vie}$) très rapidement en fonction d'une variation paramétrique. De plus, les échangeurs sont en concurrence avec les VRC qui permettent aussi de réduire la charge de conditionnement. Les VRC étant plus faciles à installer et moins chers, les échangeurs géothermiques ont du mal à se développer dans le secteur du bâtiment (Quevillon, 2017).

Une des constantes dans toutes ces études est le coût important de l'excavation nécessaire pour installer les réseaux de tubes. L'avantage de positionner les tubes autour des fondations des bâtiments se justifie ici. En effet, dans ce cas, il est possible d'installer les tubes en même temps que la construction des fondations annulant ainsi totalement le coût de l'excavation imputable à l'échangeur.

1.2.2.3 Installation du réseau dans les fondations

Comme expliqué précédemment, pour annuler les coûts dus à l'excavation il est possible de placer l'échangeur dans ou sous les fondations d'un bâtiment. On obtient des systèmes moins chers, mais cela a un impact sur les performances du système. En effet, étant proche du bâtiment une interaction thermique entre celui-ci et l'échangeur se produit. De plus, l'espace disponible autour des fondations est généralement limité ce qui contraint l'emplacement, la longueur et le diamètre des tubes installables.

Plusieurs études récentes traitent de ce type de système. (Pfafferott, 2003) étudie les performances de trois échangeurs géothermiques à air dans des bâtiment de grandes tailles en Allemagne. Un positionné sous les fondations (Fraunhofer ISE) et les deux autres autour des fondations (DB Netz AG et Lamparter). Les comportements des trois échangeurs géothermiques sont observés et les résultats obtenus (Tableau 1.2) augurent de bonnes perspectives pour ce type de système.

Tableau 1.2 Performances de trois puits canadiens adaptés de (Pfafferott, 2003)

	DB Netz AG	Fraunhofer ISE	Lamparter
Nombre de tubes	26	7	2
Diamètre tubes (mm)	200 et 300	250	350
Longueur tubes (m)	67-107	Environ 95	90
Surface totale des tubes (m ²)	1650	522	198
Gain en chauffage (kWh/année)	27700	26800	3200
Gain en climatisation (kWh/année)	22300	12400	2400

Il existe également des systèmes placés à l'intérieur même de la structure des fondations. (Taurines, Girous-Julien, & Menezo, 2019) étudient l'un d'eux basé sur la technologie Fondatherm[®], voir Figure 1.4. La zone de passage de l'air est creusée à l'intérieur du bas de la fondation et suit ainsi le contour du bâtiment. Un bâtiment en France muni de ce type de fondation est étudié. Pour une surface des tubes totale de 80 m² les auteurs obtiennent sur l'année étudiée, un gain de 8,9 kWh/jour en chauffage et de 3 kWh/jour en climatisation. Une comparaison est aussi effectuée avec d'autres échangeurs à air conventionnels, la conclusion étant que malgré sa faible profondeur d'enfouissement le concept Fondatherm[®] performe mieux que beaucoup en chauffage et dans la moyenne en climatisation.

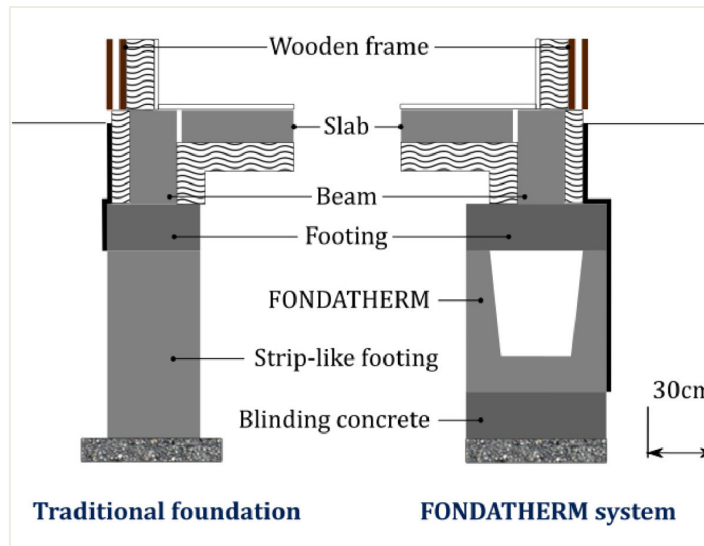


Figure 1.4 Fondation Fondatherm[®], tiré de (Taurines et al., 2019)

(Kayaci et al., 2019) comparent les performances de deux échangeurs sol-eau, un placé dans le sol sous les fondations et un placé dans la couche de béton des fondations. Ces systèmes n'utilisent pas le même fluide pour les échanges avec le sol. Mais la disposition du réseau de tubes présente des similarités avec les échangeurs air-sol. Les deux échangeurs sont composés de 10 tubes de 90 m de long avec un diamètre de 32 mm soit une surface d'échange de 90,5 m². Le bâtiment étudié de 2400 m² est situé à Istanbul et est monitoré du 8 février au 13 mars. Sur cette période, les mesures montrent un gain en 5,51 kWh/jour pour la boucle dans le sol et de 4,63 kWh/jour pour celle dans le béton. La conclusion de l'étude est ainsi que ce type de système est plus performant s'il est placé sous la fondation que dans celle-ci.

Une analyse économique de plusieurs configurations de puits canadiens pour augmenter la performance d'une thermopompe à air est effectuée par (Quevillon, 2017). L'une d'elles, placée dans les fondations, donne une période de retour sur investissement de 19,1 ans, avec un tarif pour l'énergie électrique de 0,0723 \$/kWh.

Une analyse plus complète d'un système placé dans les fondations pourrait permettre d'avoir un meilleur aperçu du potentiel économique. C'est dans ce but que l'étude ici présente fut

menée. Pour déterminer si un puits canadien placé autour des fondations d'une habitation peut être viable économiquement.

Un autre moyen de réduire les coûts pour enterrer les tubes est d'utiliser une méthode dite sans excavation où ils sont introduits dans le sol à l'aide d'une machine de forage. Il n'est donc ainsi pas nécessaire de creuser des tranchées cependant l'utilisation d'une machine spécialisée est requise. (Hamada, Nakamura, Saitoh, Kubota, & Ochifuji, 2007) ce qui limite fortement son utilisation.

1.3 Modèles de simulation de l'échangeur

De nombreux modèles pour simuler le comportement d'un échangeur à air existent. Les objectifs de ces modèles peuvent être différents. En effet, certains modèles recherchent des solutions simplifiées, facilement utilisables et rapide pour permettre le design d'un échangeur. D'autres en revanche sont beaucoup plus complexes et demandent des calculs complexes, longs et l'utilisation de logiciels spécifiques, mais permettent une simulation plus proche de la réalité.

Les modèles peuvent être classés selon le nombre de dimensions spatiales prises en compte dans les équations régissant le transfert de chaleur.

1.3.1 Modèles 1D

Les modèles une dimension sont souvent les plus rapides à converger et donnent ainsi les seules solutions utilisables directement par les designers (Bisoniya, Kumar, & Baredar, 2014). Dans ces modèles, seuls les échanges selon la direction radiale sont pris en compte.

(Tzaferis, Liparakis, Santamouris, & Argiriou, 1992) ont comparé 8 modèles différents provenant de la littérature de l'époque. Les valeurs prévues par les modèles sont comparées avec des valeurs mesurées. Des écarts très faibles sont observés : inférieures à 3,5 % pour 6 des modèles, 4,43 % et 5,37 % pour les deux autres. Les modèles utilisés sont donc tous viables

pour simuler les performances d'un puits canadien. Cependant, ils ont besoin pour la plupart de connaître la température de surface du tube : variable souvent inconnue.

Par la suite, d'autres modèles furent développés pour prendre en compte des cas plus complexes. En une dimension, on trouve celui de (Hollmuller, 2003) qui présente une solution analytique obtenue en considérant un échangeur cylindrique soumis à un signal de température périodique sur l'année. La solution obtenue illustre la diminution d'amplitude et le décalage de phase qu'induit le sol à la température de l'air.

Pour effectuer les calculs, plusieurs environnements peuvent être utilisés. Pour les modèles à une dimension, 3 logiciels sont généralement utilisés. (Al-Ajmi, Loveday, & Hanby, 2006) ont développé un modèle pour les climats chauds et arides dans le logiciel TRNSYS-IISIBAT. Pour l'échangeur les types 263 et 264 sont utilisés pour simuler respectivement le sol et le tube. L'étude est comparée à deux études expérimentales et une étude théorique et montre une différence dans la température de sortie estimée de $\pm 0,1$ à $\pm 0,6$ °C. On trouve maintenant d'autres modèles TRNSYS qui sont développés dans la suite du mémoire.

Un autre logiciel très utilisé est EnergyPlus. (Lee & Strand, 2006; Lee & Strand, 2008) ont développé et implémenté un nouveau module dans ce programme pour simuler un échangeur géothermique à air. Le module est validé avec une étude théorique (Al-Ajmi et al., 2006) et une étude expérimentale. Les résultats sont très proches de l'étude théorique, mais s'éloignent légèrement de l'étude expérimentale.

Finalement, (Thiers & Peuportier, 2008) utilisent le logiciel COMFIE pour simuler un échangeur géothermique. Le modèle prend en compte l'influence entre le bâtiment et l'échangeur. Pour ce faire, un terme de correction est appliqué dans l'expression de la température du sol. Si ce facteur est très important, la température du sol sera égale à la température des fondations. À l'inverse s'il est très faible l'influence du bâtiment ne sera pas prise en compte. Le modèle est validé avec des données de deux bâtiments parisiens. Une dérive inférieure à 2 °C pendant 98 % du temps est obtenue.

(Niu, Yu, Yu, & Li, 2015a) utilisent un modèle une dimension, calibré avec des données expérimentales provenant d'une installation de test spécialisée dans les énergies renouvelables. Une fois calibré le modèle est utilisé pour obtenir une équation paramétrique par régression linéaire. L'équation ainsi obtenue dépend de 6 paramètres : la température de l'air, l'humidité relative de l'air, la vitesse d'entrée, la température de surface du tube, sa longueur et son diamètre. La température de surface du tube étant une fois de plus l'élément le plus difficile à obtenir.

(Estrada, Labat, Lorente, & Rocha, 2018) comparent les résultats obtenus avec un modèle 1D et un modèle 3D. La différence d'enthalpie entre la sortie et l'entrée est comparée pour les deux modèles. Pour le cas d'un échangeur situé à Montpellier en France l'erreur moyenne est de 0,13 kJ/kg et pour un second situé à Rio de Janeiro au Brésil l'erreur moyenne est de 3,78 kJ/kg. (Jian Zhang & Haghighat, 2005) adoptent une démarche similaire et comparent les résultats entre un modèle CFD et un modèle 1D. La conclusion de ces deux études est que les modèles une dimension, même s'ils ne peuvent pas prendre en compte la complexité des phénomènes prenant place dans l'échangeur géothermique, suffisent généralement pour les problèmes de dimensionnement dans le cas de géométrie simple.

Dans le cas d'un système dans les fondations, ces modèles ne sont donc pas suffisants. Notamment, car ils ne peuvent pas capter les échangeurs avec les murs de l'habitation.

1.3.2 Modèles 2D

Les modèles deux dimensions sont plus précises que les précédents, mais sont aussi plus complexes. La majorité d'entre eux sont des modèles numériques. Ils décomposent l'espace étudié en petits éléments dans lesquels les variables étudiées sont supposées constantes. Pour chaque élément des équations de continuité sont établies. À partir d'un état initial et de conditions limites, l'évolution dans la totalité du domaine est calculée.

Un des modèles les plus utilisés dans la littérature est (Mihalakakou, Santamouris, & Asimakopoulos, 1994a). Ici deux équations de continuité sont considérées. Une pour la conservation d'énergie et une seconde pour le transfert d'eau dans le sol (Mihalakakou et al., 1994a). L'équation de transfert de masse prend en compte à la fois le flux dû au gradient de température et celui dû au gradient de concentration. Avec ce modèle numérique, un échangeur est simulé dans l'environnement TRNSYS. Les résultats obtenus sont comparés à des données expérimentales provenant d'un tube enterré. Une différence maximale obtenue est proche de 0,3 °C.

Ce modèle est très souvent cité et utilisé dans la littérature et entre autres par les auteurs eux-mêmes dans (Mihalakakou, Santamouris, & Asimakopoulos, 1994b). Dans cet article le modèle précédent est utilisé pour mettre en avant le potentiel de climatisation offert par un échangeur et l'impact de différents paramètres sur ses performances (profondeur, longueur, diamètre...). Dans un article suivant (Mihalakakou, 2003) le modèle est comparé à un réseau de neurones artificiels. Un réseau de neurones artificiels est un programme informatique qui s'inspire des neurones biologiques. Ce type de programme peut après une période d'apprentissage résoudre des problèmes similaires à ceux fournis lors de l'apprentissage. L'objectif ici est de créer un programme qui prévoit la température de sortie de l'échangeur géothermique en connaissant : la température d'entrée, le taux d'humidité, la température de surface et la température du sol à la profondeur du tube. Dans le cas présent une même base de données est utilisée pour l'apprentissage du programme (neuf premières années de la base) et pour la vérification de son efficacité (dixième année de la base). Une erreur quadratique moyenne de 0,78 °C entre les données expérimentales et le réseau est obtenu et un coefficient de corrélation de 0,92. Ces résultats montrent le potentiel de ce type d'approche.

Une approche similaire est considérée dans une série d'articles. Un modèle numérique deux dimensions basées sur les deux mêmes équations est d'abord développé dans (Kumar, Ramesh, & Kaushik, 2003). Le modèle est vérifié avec les données expérimentales d'un échangeur à Mathura en Inde. Une erreur de $\pm 0,35$ °C est observée sur les températures de sorties prédites et mesurées. Une fois, validé le modèle sert de base pour les deux articles suivants.

D'abord il est comparé à un réseau de neurones artificiel (Kumar, Kaushik, & Garg, 2006). Le réseau est entraîné en utilisant différents algorithmes présents dans la bibliothèque Matlab®. L'algorithme d'apprentissage le plus efficace est ensuite sélectionné. Le réseau finalement obtenu est validé avec le reste de la base de données utilisée pour l'apprentissage. Le réseau de neurones prédit les données avec une précision de $\pm 2,6$ % contre $\pm 5,3$ % pour le modèle numérique.

Le modèle est également utilisé dans un programme de design d'échangeurs basé sur un algorithme génétique (Kumar, Sinha, Singh, & Modhukalya, 2008). Ce programme a ici pour fonction de trouver les valeurs optimales de la conductivité du tube, de sa longueur, du débit d'air, du rayon intérieur et extérieur du tube qui donne une puissance de climatisation la plus importante. Pour cela, il sélectionne dans une population aléatoire les individus (ensemble de 6 valeurs de design) donnant les meilleures performances : performances calculées à l'aide du modèle (Kumar et al., 2003). Le programme est testé et converge vers un ensemble de valeurs optimales : rayon intérieur = 0,2567 m ; rayon extérieur = 0,3035 m ; longueur = 45,5 m ; débit = 0,03824 kg/s ; conductivité thermique = 0,5255 W/(m°C). Ces valeurs correspondant à un gain d'énergie de 38 kWh.

Un autre modèle deux dimensions est développé par (Ramírez-Dávila, Xamán, Arce, Álvarez, & Hernández-Pérez, 2014). La grande différence entre le modèle présenté dans cet article et les précédents, repose dans le fait de ne pas considérer le coefficient de convection comme connu. Les résultats sont comparés aux données expérimentales fournies par une autre source et une erreur maximum de 16,14 % est observée.

1.3.3 Modèles 3D

Les modèles trois dimensions prennent en compte des flux de chaleurs tridimensionnels. Ces modèles permettent d'étudier des cas complexes avec des géométries diverses. Ils peuvent

aussi prendre en compte avec plus de précision les interactions avec l'environnement. Leurs défauts étant, la longueur des calculs qu'ils entraînent.

On peut différencier les modèles 3D en deux types. Premièrement, ceux basés sur des codes commerciaux de Mécanique des Fluides Numériques (MFN) aussi appelée en anglais Computational Fluid Dynamics (CFD) et ceux ne les utilisant pas.

Les études en CFD sont de plus en plus courantes ces dernières années en raison de leurs polyvalences. De plus, la puissance des ordinateurs augmentant d'année en année, les modèles implantés convergent de plus en plus rapidement vers des solutions. Les deux logiciels CFD les plus couramment utilisés en simulations des échangeurs sol-air sont FLUENT et PHOENICS (Peretti et al., 2013). Ce type de simulation n'a souvent pas pour but d'aider au design d'un échangeur en particulier, mais plutôt de mettre en avant les phénomènes qui prennent place dans les échangeurs et le sol qui les entoure ainsi que de démontrer leurs performances.

Un exemple de ce type d'étude peut se trouver dans les articles de (Bansal, Misra, Agrawal, & Mathur, 2009, 2010). Dans ces articles FLUENT est utilisé pour calculer les performances respectivement de chauffage et de climatisation d'un puits canadien. Ainsi que pour étudier l'impact de plusieurs paramètres sur les performances. De ces mêmes auteurs on trouve également (Bansal et al., 2012) qui étudient avec FLUENT les performances et la viabilité économique d'un échangeur géothermique à air lié à un système de refroidissement pour les climats chauds. Enfin (Bansal et al., 2013) étudient l'impact de l'échangeur sur le sol environnant et concluent sur l'importance de laisser le sol reposer pendant certaines périodes pour ne pas dégrader ses performances.

Sur les modèles en eux même on trouve également quelques sources cherchant à améliorer la rapidité des simulations notamment (Brum, Vaz, Rocha, dos Santos, & Isoldi, 2013). Dans cet article, l'utilisation d'un modèle simplifié est étudiée. Le modèle est dit réduit et est comparé à un modèle dit complet. La différence se fait sur la taille du domaine étudié. Le modèle

complet prend en compte toute la géométrie (totalité du sol + échangeur) alors que le modèle réduit considère uniquement une petite zone de sol autour de l'échangeur. Le modèle complet provient de (Vaz, Sattler, dos Santos, & Isoldi, 2011). Une réduction du temps de calcul de 43 % (réduction de 16 h à 8 h) est observée sans perte de précision. Il faut cependant noter que le nouveau modèle demande une certaine connaissance des températures du sol non perturbé, car il les utilise comme conditions limites de la simulation.

Pour la sélection des équations régissant les transferts de masse et de chaleur dans le domaine de calcul, une vigilance particulière doit être appliquée pour la sélection des modèles de turbulence, notamment pour certaines géométries atypiques. (Jian Zhang & Haghighat, 2009) notent que bien que le modèle $k-\varepsilon$ soit utilisé avec succès dans de nombreuses études, il montre ses limites dans certains cas. Cela est dû au fait que ce modèle se base sur l'hypothèse que l'écoulement est totalement développé dans le tube ce qui n'est pas le cas, entre autres, pour des tubes avec de petits ratios longueur sur diamètre (Jian Zhang, 2009).

Bien que les modèles CFD offrent une grande flexibilité dans les géométries étudiables, il faut cependant être vigilant à bien les adapter aux cas étudiés. Des mauvais choix dans les équations du système pouvant entraîner une complexité de calcul plus importante que nécessaire ainsi que des écarts avec les valeurs réelles.

Pour les modèles 3D hors logiciel de CFD on trouve le modèle développé par Hollmuller et Lachal. Il est présenté et validé à travers de nombreuses publications dont (Hollmuller & Lachal, 2001; Hollmuller & Lachal, 1998, 2005). Le modèle considère un transfert de chaleur en trois dimensions ainsi qu'un transfert de masse pour l'eau provenant de la condensation et des infiltrations. Un bilan thermique et massique est ainsi effectué dans chaque volume de contrôle constituant le domaine d'étude. Le modèle est validé avec 3 bases de mesures expérimentales in situ. Une dans une serre agricole (Geoser), une dans une résidence (Caroulier) et une dans un bâtiment commercial et industriel (Schwerzenbacherhof). La conclusion indique que le modèle reproduit avec une bonne précision les échanges latents et sensibles ainsi que la présence éventuelle d'infiltration d'eau (Hollmuller & Lachal, 1998). Le

modèle est implanté dans TRNSYS sous la forme du type 460. Un des avantages d'utiliser ce type est sa comptabilité avec d'autres éléments présents dans l'environnement TRNSYS. Il est ainsi possible de lier la simulation de l'échangeur avec des données météo ou des données provenant de la simulation d'un bâtiment.

Ce dernier modèle semble être le mieux adapté pour cette étude. En effet, il combine une faible complexité des calculs et une prise en compte fine de l'interaction entre l'échangeur et le bâtiment. De plus, travailler dans l'environnement TRNSYS permet de facilement simuler les autres éléments comme le VRC, le bâtiment ainsi que leurs interactions.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Environnement TRNSYS

Les simulations présentées dans cette étude s'effectuent dans l'environnement TRNSYS pour les raisons évoquées dans la revue de littérature.

Dans TRNSYS chaque composant est simulé sous la forme d'un code fourni avec le logiciel appelé Type. Le travail développé ici consiste principalement à mettre en relation les types nécessaires et à bien les paramétrer. Par souci de synthèse, les modèles mathématiques de chaque module ne sont donc pas développés en détail ici, mais peuvent être trouvés dans la documentation du logiciel (University of Wisconsin--Madison. Solar Energy, 1975). Les simulations sont effectuées pour une période de 8760 h, soit une année entière de janvier à décembre, avec un pas de temps de 1 minute.

2.2 Simulation du bâtiment

Le premier élément à paramétrer est le bâtiment (Type 56). Sa charge de chauffage/climatisation sert à calculer les gains dus à l'échangeur. Bien saisir l'interaction entre le bâtiment, le sol environnant et l'échangeur est primordial pour le cas présent. Une attention particulière doit donc être portée à la simulation du sous-sol.

Pour pouvoir placer l'échangeur autour des fondations de la maison et ainsi réduire les coûts d'excavation, il faut l'installer au moment où la maison est bâtie. Le bâtiment est donc considéré comme neuf et ainsi toutes les normes sur la construction de nouveaux bâtiments sont prises en compte.

2.2.1 Enveloppe

Le bâtiment étudié correspond à une habitation de taille moyenne. Sa surface au sol est de 67 m^2 . Pour la simulation, il est découpé en 4 zones : le rez-de-chaussée, l'étage, le grenier et le sous-sol. Les zones interagissent entre elles et avec l'extérieur. Un bilan thermique est effectué par le logiciel sur chaque zone.

Le rez-de-chaussée et l'étage sont de même taille et représentent un volume de 201 m^3 chacun (67 m^2 de plancher sur une hauteur de 3 m). Le sous-sol est de plus petite taille avec un volume $167,5 \text{ m}^3$ et enfin le grenier représente environ 65 m^3 .

La surface d'échange totale entre l'air extérieur et le bâtiment est d'environ 291 m^2 dont 170 m^2 de mur, 44 m^2 de fenêtre et 77 m^2 de toiture. La surface d'échange avec le sol est elle de $150,5 \text{ m}^2$ dont $83,5 \text{ m}^2$ de mur et 67 m^2 de plancher. Une illustration schématique du bâtiment peut être trouvée sur la Figure 2.1.



Figure 2.1 Représentation de l'habitation simulée

Les résistances thermiques utilisées pour les parois sont résumées dans le Tableau 2.1. Elles sont issues du code national du bâtiment en particulier des tableaux 11.2.2.1.-A et 11.2.2.4. (Conseil national de recherche du Canada, 2015). Il est important de noter que ces valeurs correspondent à la norme pour les bâtiments neufs et ne représentent en aucun cas les valeurs moyennes pour les bâtiments déjà existants.

Tableau 2.1 Résistances thermiques du bâtiment adapté de (Conseil National de Recherches Canada (CNRC), 2015)

	Résistance thermique (m ² K/W)	U value équivalente (W/m ² K)	Surface concernée (m ²)
Toit	7,22	0,137	77,36
Murs extérieurs	4,31	0,230	170
Murs sous-sol	2,99	0,334	83,5
Plancher ¹	1,12	0,896	201
Plancher sous-sol	0,88	1,121	67
Fenêtres ²	0,94	1,06	44

1 : Pas spécifié dans la norme.

2 : La norme spécifie $U < 2 \text{ W/m}^2\text{K}$ la valeur utilisée de $1,06 \text{ W/m}^2\text{K}$ correspond à la valeur fournie par le catalogue TRNSYS.

2.2.2 Mouvement d'air

Les mouvements d'air dans les zones du bâtiment sont dus à deux phénomènes : la ventilation et les infiltrations.

2.2.2.1 Ventilation

Pour calculer le débit minimal de ventilation on utilise l'équation (2.1) adapté de (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2019).

$$Q_{tot} = 0,15S_{floor} + 3,5(N_{br} + 1) \quad (2.1)$$

Où Q_{tot} est le débit de ventilation minimal requis pour l'habitation en L/s ; S_{floor} est la surface totale de l'habitation en m² et N_{br} le nombre de chambres dans l'habitation.

Pour le bâtiment étudié, la surface chauffée est de 201 m² (3*67 m²) et un nombre de chambres égal à 4 est considéré. Un débit minimal de 47,65 L/s est donc obtenu soit 171,54 m³/h ou environ 101 cfm. Ce débit est ensuite réparti dans chaque zone proportionnellement à son volume. La température et le pourcentage d'humidité de l'air entrant les zones sont déterminés par la simulation du VRC et du puits canadien.

2.2.2.2 Infiltrations

Les infiltrations d'air dépendent de la non-étanchéité du bâtiment, mais également de facteurs variant dans le temps comme le vent, la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, l'humidité.... Le débit peut donc fortement changer d'un bâtiment à l'autre, mais également d'heure en heure pour une même habitation. Par souci de simplification, un débit d'infiltration fixe est souvent utilisé dans les modèles (Law & Williams, 2016). Cependant le débit recommandé varie fortement d'un institut à l'autre. Le Tableau 2.2 illustre ces différences.

Tableau 2.2 Débits d'infiltrations recommandés par différents instituts tiré de (Law & Williams, 2016)¹

	Reference	Whole Building Rates per m ² of Exterior Envelope	
		L/s/m ² @ 75 Pa	L/s/m ² @ 5 Pa
	American Architectural Manufacturers Association (2011)	0.30	0.05
Recommended Range for SBD Program	ASHRAE Fundamentals - Chapter 16, Tight Building (2013)	0.50	0.09
	United Kingdom Building Regulations (2006)	0.76	0.13
	U.S. Army Corps of Engineers (2012)	1.27	0.22
	National Energy Code for Buildings 2011 (Sentence 3.3.4.9.(6) and 8.4.3.4.(3))	1.45	0.25
	ASHRAE Fundamentals - Chapter 16, Average Building (2013)	1.50	0.26
	Air Barrier Association of America's recommendation (2016)	2.00	0.34
	RDH & RWDI's Recommended Starting Point for SBD Program Modelling	2.03	0.35
	ASHRAE 90.1-2013 (Sentence C.3.5.5.3)	2.03	0.35
	RDH Database, Survey of 87 Canadian buildings	2.93	0.50
	ASHRAE Fundamentals - Chapter 16, Leaky Building (2013)	3.00	0.52
	Emmerich and Persily's study of 200 buildings in the US (2005)	7.75	1.33
	Conglomeration of several studies referenced in Chapter 16 of ASHRAE Fundamentals (2013)	7.88	1.36

1 : Les valeurs à 75 Pa représentent les débits mesurés pendant les tests d'infiltrations et celles à 5 Pa les débits d'un bâtiment en conditions réelles.

Étant donné la forte incertitude quant à la valeur à utiliser une étude de sensibilité de la simulation fut menée. La conclusion de cette dernière est que la charge de chauffage/climatisation du bâtiment est fortement influencée par le choix de ce débit. Cependant, comme les infiltrations n'interagissent pas avec l'échangeur, les gains apportés par le puits canadien restent fixes, quel que soit le débit choisi. La simulation du puits canadien étant la priorité, il a été décidé de travailler avec une valeur fixe.

Dans cette étude, un débit de 0,25 L/s par m² de surface extérieure est utilisé. Il correspond à la valeur imposée par le code national de l'énergie pour les bâtiments (CNRC, 2017). Elle est issue de la partie du code de l'énergie portant sur le paramétrage de modèles numériques et pas sur la construction de bâtiment. De plus, cette étude reprend l'hypothèse que cette valeur englobe toutes les pertes d'air du bâtiment, incluant celles due à la ventilation naturelle (ouverture des fenêtres et entrée/sortie des habitants). Elle a donc uniquement comme but d'être utilisée pour des modèles de calcul et ne correspond nécessairement pas aux valeurs

mesurables dans une habitation, ni aux exigences pour la construction d'un bâtiment. Par exemple, ce débit est bien supérieur à celui nécessaire pour obtenir la certification Novoclimat 2.0 (Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétiques, 2014).

L'habitation simulée à une surface extérieure de 291 m² cela correspond à un débit de 72,75 L/s pour les infiltrations soit 261,9 m³/h ou environ 164 cfm. Les infiltrations sont réparties linéairement dans les différentes zones en fonction de leurs surfaces en contact avec l'air ambiant.

2.2.3 Transfert d'énergie

En plus d'échanger de la chaleur entre elles et avec l'extérieur les zones vont aussi échanger avec les appareils de chauffage/climatisation et recevoir de la chaleur à cause des activités de l'habitation. Tous ces paramètres vont fortement varier d'une habitation à l'autre selon : son utilisation, le nombre d'habitants, le planning des habitants, leurs habitudes de vie. Le but ici est de représenter un cas typique, représentant une nouvelle habitation au Québec et pas un cas spécifique. Le choix des paramètres est effectué dans cette optique.

Pour le chauffage, un système électrique est supposé, car c'est ce qui est le plus présent dans les maisons unifamiliales au Canada, 42,9 % en 2017 (Ressource naturelles Canada, 2017). Un kWh thermique correspondra donc pour le chauffage à 1 kWh électrique. Les zones rez-de-chaussée, étage et grenier sont chauffées de la même manière : une consigne de 20 °C de début septembre à fin mars et de 15 °C de début avril à fin août est imposée. Le sous-sol est quant à lui toujours chauffé avec une consigne à 15 °C.

Pour la climatisation, un coefficient de performance (COP) d'environ 3,5 pour les nouvelles unités et de 3,4 pour le parc actuel est indiqué (Ressource naturelles Canada, 2017). Dans l'optique d'un nouveau bâtiment un COP de 3,5 est utilisé. Comme pour le chauffage les zones rez-de-chaussée, étage et grenier sont climatisées de la même manière : une consigne à 25 °C

de début septembre à fin mars et de 22 °C de début avril à fin août. Le sous-sol ne sera pas climatisé.

Pour les gains dus à l'activité de la maison, le catalogue de données TRNSYS est utilisé. Pour les habitants, 4 personnes assises ou faiblement en activité sont considérées (120 W chacun), 2 ordinateurs avec moniteur (140 W chacun) et 10 ampoules 13 W. Tous ces gains sont présents uniquement lors des périodes d'utilisation de l'habitation : matin et soirée en semaine et toute la journée le week-end. Pour les lumières, leur utilisation dépend également de la luminosité extérieure.

Une gestion de l'humidité de l'air est également simulée, elle maintient en tout temps l'humidité relative de l'air dans la maison entre 30 et 50 %.

2.3 Données météo

Les données météo utilisées dans la simulation sont issues d'un fichier Canadian Weather Year for Energy Calculation (CWEC). Ces fichiers sont produits par Environnement Canada et le Conseil de la Recherche du Canada. Ils consistent en 12 mois sélectionnés parmi plusieurs années de données météorologiques. Les mois choisis sont ceux considérés comme moyen par rapport à ceux des autres années. La sélection s'effectue en comparant les caractéristiques suivantes : le rayonnement total, la température sèche, la température de rosée et la vitesse du vent (Environnement Canada, 2016).

Le fichier utilisé dans la simulation correspond à une station située sur l'île de Montréal (Montréal Intl'A), à Dorval. Pour cette station, les données furent récoltées entre les années 1998 et 2014. Les valeurs pour la température et le rayonnement sont résumées sous la forme de moyenne mensuelle sur la Figure 2.2. Les données horaires de la température ambiante, l'humidité, l'irradiation, la vitesse du vent, la température du ciel et l'angle solaire sont extraites du fichier.

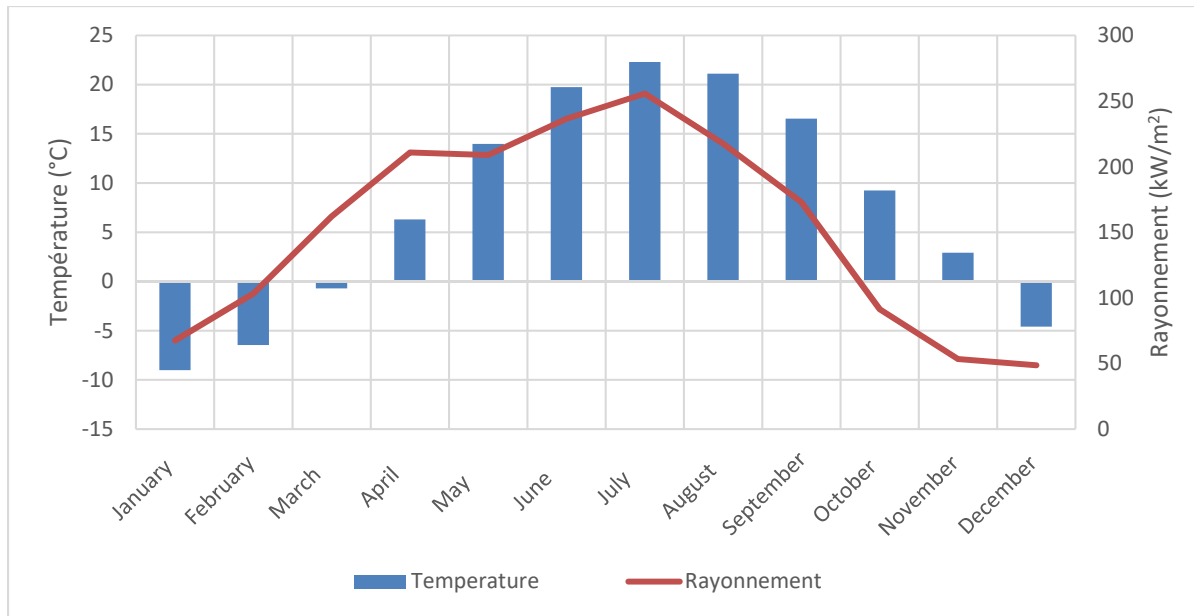


Figure 2.2 Moyennes mensuelles des données météo utilisées pour la simulation.

2.4 Ventilateur récupérateur de chaleur (VRC)

Un VRC est un appareil permettant un échange de chaleur entre l'air entrant et sortant d'un bâtiment. Une partie de la chaleur évacuée est ainsi récupérée ce qui réduit la charge de chauffage dû au conditionnement de l'air. Toute nouvelle habitation au Canada doit être équipée d'un système de ce type (CNRC, 2015). C'est donc le cas ici.

L'échangeur air-sol présenté dans cette étude cherche également à réduire la charge de conditionnement de l'air. Les deux appareils vont donc travailler en série : l'air va d'abord circuler dans l'échangeur air-sol puis dans le VRC. Ce couplage va influencer sur les performances de l'échangeur et du VRC il est donc important de bien simuler leurs interactions.

2.4.1 Caractéristiques

Le VRC est simulé en utilisant le type 760 de TRNSYS. Ce type utilise la valeur de l'efficacité de l'échangeur pour approximer la quantité de chaleur échangée entre les deux flux (Thermal Energy Systems Specialists (TESS), 2012).

L'appareil utilisé est basé sur les données du modèle 65H de la marque VänEE®, (échangeur courants croisés). D'après les données du constructeur, l'appareil présente une efficacité de récupération de l'énergie sensible de 82 % à 0 °C et de 63 % à -25 °C (VänEE, 2011). Une variation linéaire entre ces deux points est considérée, cette supposition est basée sur les mesures effectuées sur un appareil de la même marque simulé dans (Junlong Zhang & Fung, 2015). L'efficacité est supposée comme ne variant plus au-delà de 0 °C et en deçà de -25 °C.

Le VRC est considéré à l'arrêt pendant l'été et les périodes où la température de l'air est supérieure à 20 °C (Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec (APCHQ), 2015).

2.4.2 Dégivrage

Dans un climat froid comme celui du Québec, l'air peut faire geler l'intérieur du VRC. Pour éviter cela, les VRC fonctionnent en mode de dégivrage en dessous d'une certaine température. Plusieurs techniques de dégivrage existent : parmi elles, les plus efficaces sont le dégivrage par recirculation et le dégivrage par extinction du ventilateur d'entrée (Phillips, Bradley, Chant, & Fisher, 1989).

Le modèle utilisé fonctionne suivant la technique de dégivrage par extinction du ventilateur d'entrée. Elle consiste à arrêter le ventilateur permettant l'entrée d'air frais dans le bâtiment tout en continuant de faire passer l'air chaud sortant du bâtiment par le VRC. L'appareil évolue ainsi pendant un temps donné puis retourne en fonctionnement normal. Dans cette simulation, une fois le ventilateur d'entrée rallumé il a été choisi de le faire fonctionner en accéléré pour compenser le manque de ventilation dû au cycle de dégivrage pour toujours fournir la ventilation requise ainsi qu'éviter les problèmes liés à la sous pression de l'habitation. La Figure 2.3 illustre le fonctionnement normal et en dégivrage du VRC. Les valeurs régissant le dégivrage pour le modèle simulé sont réunies dans le Tableau 2.3.

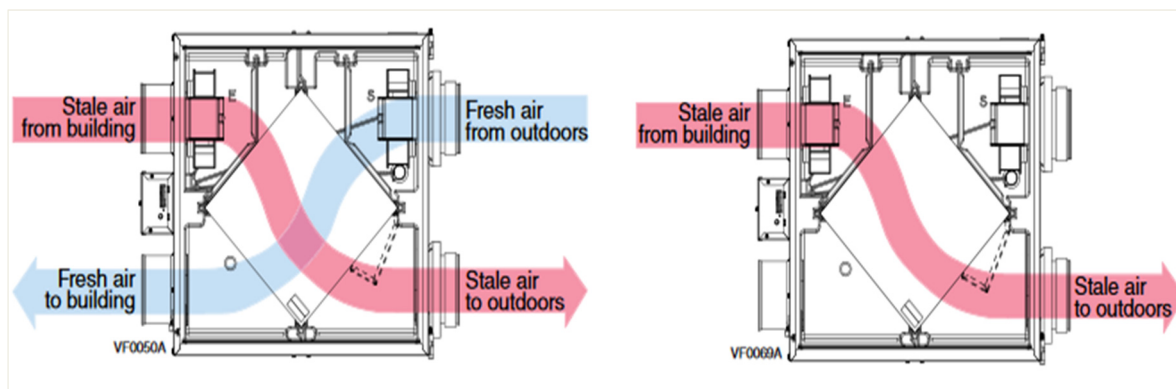


Figure 2.3 Schéma du fonctionnement normal et en dégivrage du VRC, tiré de (VänEE, 2018)

Tableau 2.3 Valeurs régissant le dégivrage du modèle 65H adapté de (VänEE, 2011)

Température extérieure (°C)	Temps éteint (minute)	Temps accéléré (minute)	Vitesse accélérée (m ³ /h)
-5 à -15	10	50	228
-15 à -27	14	46	252
Inférieur à -27	20	40	285

Pour simuler le cycle de dégivrage, un assemblage de type est utilisé. La température moyenne sur une période de 60 minutes est fournie par le type 939 (Calculator for Running Totals and Averages). Cette température est analysée à la première minute d'un cycle de 60 minutes pour connaître le nombre de minute où éteindre le ventilateur d'entrée. Pour cela 4 types 1233 (On/Off Controller with Specified Runtime) sont utilisés : un pour créer un battement toutes les 60 minutes et les 3 autres pour les 3 temps d'extinction possible (10, 14 ou 20 minutes). Leurs signaux sont rassemblés pour créer un signal de commande pour le ventilateur. La variation de ce signal est étudiée par une version légèrement modifiée du type 980 (Run-Time Calculator) qui fournit le nombre de minutes d'arrêt pendant les 60 minutes permettant ainsi de calculer le débit que doit fournir le ventilateur d'entrée pour compenser son arrêt. L'impact sur l'efficacité du VRC est négligé. Sur la Figure 2.4, il est possible de voir comment ce dispositif est implanté dans TRNSYS.

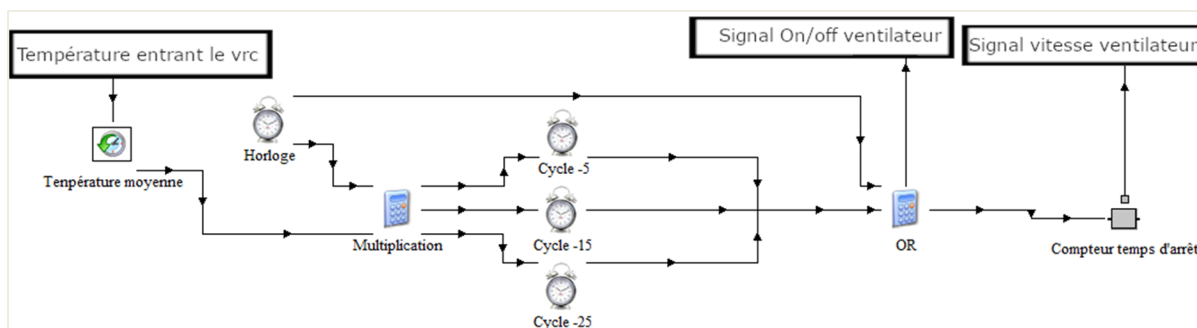


Figure 2.4 Commande des cycles de dégivrage

2.5 Échangeur air-sol

Comme évoqué précédemment la simulation de l'échangeur air-sol s'effectue à l'aide du type 460 de TRNSYS. Il permet de simuler les échanges entre l'échangeur et le sol environnant ainsi qu'avec d'autres types de TRNSYS et notamment dans le cas présent avec le bâtiment (type-56).

2.5.1 Simulation du sous-sol

Le type 460 repose sur un maillage du sol entourant l'échangeur défini en trois dimensions. Dans ce maillage, l'axe x correspond à la direction du tube, l'axe y à la direction orthogonale à celle du tube et l'axe z à la profondeur. Ce repère rend difficile la simulation d'une géométrie possédant des coudes. Comme 3 coudes sont nécessaires pour simuler le tube autour des fondations la géométrie doit être dépliée. Les mailles autour des coudes sont donc déformées.

De plus, le domaine défini pour le type 460 doit être rectangulaire ce qui empêche de l'utiliser pour simuler la partie du sol directement sous les fondations de la maison. Pour compléter le type, « multizone basement model » (1244) est utilisé. Il permet de simuler le comportement du sous-sol d'une maison avec une grande flexibilité dans la forme du domaine étudié. Le sol est donc réparti entre deux types TRNSYS le type 460 pour le sol autour des fondations de la maison et le type 1244 pour le sol sous les fondations. La répartition du sol entre les deux types est illustrée sur la Figure 2.5.

Le type 460 échange ainsi des données avec 3 autres types : le fichier météo (460), le bâtiment (56) et le modèle de sous-sol multizone (1244). Le modèle de l'échangeur reçoit un flux de chaleur d'entrant ou sortant du type 56 (bâtiment) et une température de contact des types 15 et 1244. Quand une température de contact est spécifiée, le modèle calcule de lui-même le flux correspondant.

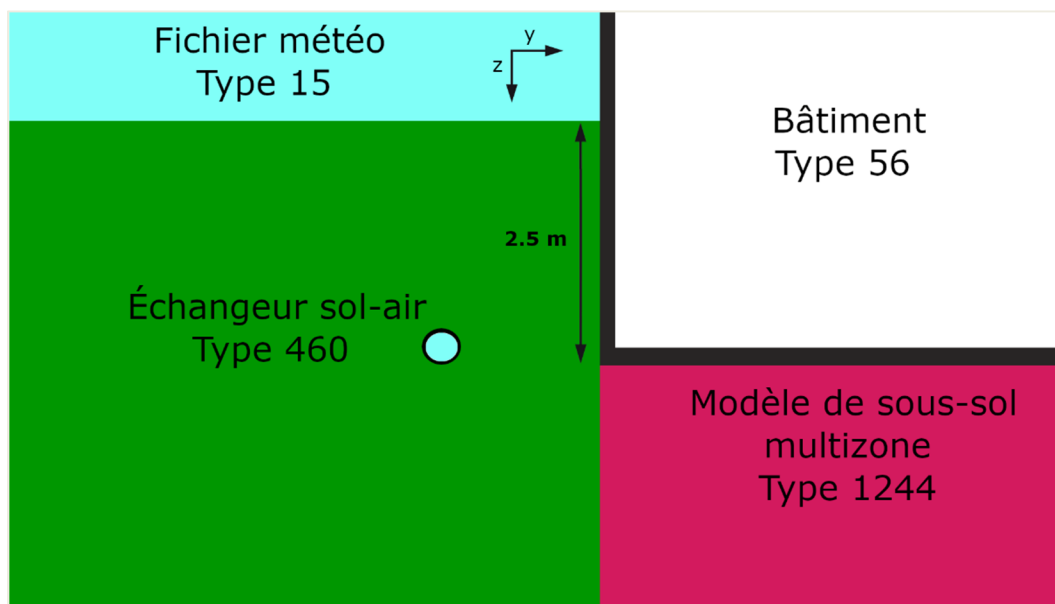


Figure 2.5 Coupe y-z de la simulation du sol

Pour déterminer la finesse nécessaire pour les maillages du type 460 et 1244, une étude de sensibilité fut menée. La charge de chauffage et de climatisation annuelle est simulée avec différents maillages, les résultats sont résumés sur la Figure 2.6 : la charge converge sur les deux courbes. Un maillage de 21 840 cellules pour le type 460 semble permettre une bonne précision tout en gardant des temps de calcul raisonnables. Pour le type 1244, 11 200 cellules suffisent.

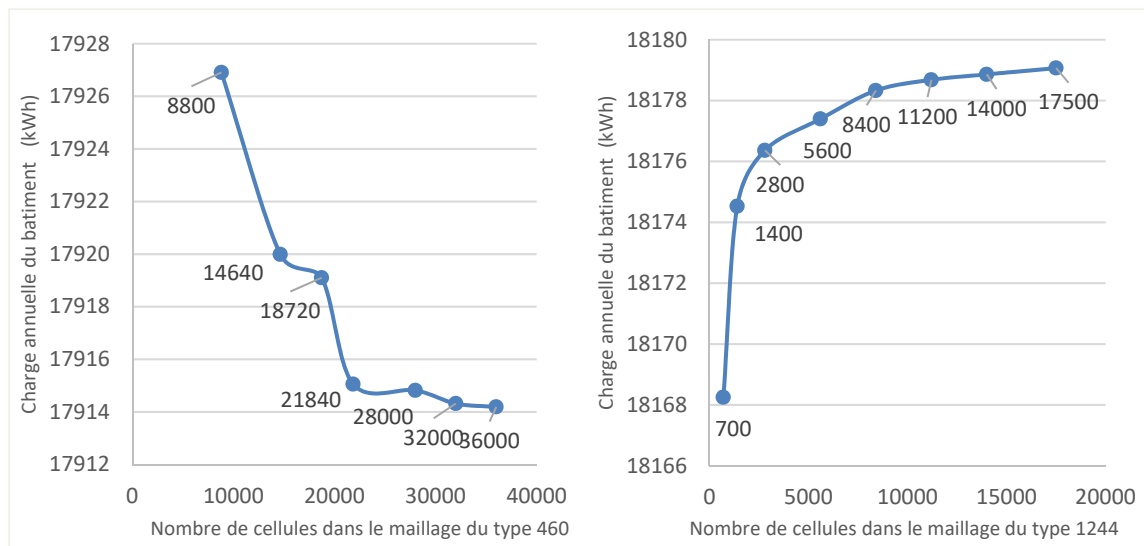


Figure 2.6 Évolution de la charge du bâtiment en fonction du maillage du type : a) 460
b) 1244

Trois matériaux sont considérés pour la simulation thermique du sol : le sol non perturbé, le sable et le gravier. Le sable et le gravier sont utilisés pour remblayer le sol déplacé lors de la construction de l'habitation. Le volume remblayé correspond à tout le sol à moins de 0,9 m des parois sur une profondeur de 2,5 mètres. C'est au fond de cette tranchée de 2,5 mètres qu'est positionné le tube de l'échangeur. Ce volume est rempli au fond par 1,5 mètre de gravier puis 1 mètre de sable jusqu'à la surface. Les propriétés thermiques utilisées pour simuler ces matériaux sont résumées dans le Tableau 1.1. Ces valeurs sont utilisées par le programme pour déterminer les transferts par conduction entre chaque maille de sol.

La conductivité du sol ainsi que les résistances de surface sont fixes dans le temps. Leurs valeurs sont définies au début de la simulation et restent constantes ensuite. Cette rigidité empêche de simuler certains effets impactant le sol. Notamment l'effet du gel qui va impacter la conductivité et l'impact de la couverture de neige qui va modifier la résistance de surface air-sol ambiant. Ces effets sont donc négligés dans cette étude.

Tableau 2.4 Propriétés thermiques des matériaux utilisés pour la simulation du sol

Type de sol	Conductivité (W/(m.K))	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique massique (J/kg.K)
Sol ¹	1,3	2096	963
Gravier ²	0,872	18382	917,053
Sable ³	0,976	1787,4	957,09

1 : Valeurs pour un sol dense et humide tirées de (Giardina, 1995).

2 : Valeurs pour un gravier humide (23 % des pores remplis d'eau) tirées de (Dalla Santa et al., 2017).

3 : Valeurs extrapolées de (Hamdhan & Clarke, 2010)

2.5.2 Simulation du tube

Le tube de l'échangeur air-sol est représenté par un ensemble de cellules particulières dans le maillage. Dans ces cellules, les bilans thermiques sont effectués différemment que dans le sol. Un bilan de masse pour le mouvement de l'air et pour l'eau issue de la condensation vient également s'ajouter. Les infiltrations du sol vers l'intérieur du tube sont négligées.

Pour l'échange convectif entre l'air et le tube le modèle utilise un coefficient d'échange variant linéairement avec la vitesse de l'air. Les paramètres décrivant sa variation sont obtenus à l'aide d'une régression linéaire sur le modèle de Gnielinski (Hollmuller, 2002). L'équation (2.2) est donc utilisée avec h le coefficient de convection en W/(K.m²) ; K_{air0} le premier paramètre issu de la linéarisation en W/(K.m²) ; K_{air1} le second paramètre issu de linéarisation en J/(K.m³) et v la vitesse de l'air en m/s.

$$h = K_{air1} * v + K_{air0} \quad (2.2)$$

Les valeurs obtenues par (Hollmuller, 2002) sont résumées dans le Tableau 2.5. Dans un premier temps, un diamètre de 0,25 m est choisi pour le tube et donc une valeur de 2,7 J/(K.m³) pour K_{air1} et de 2,4 W/(K.m²) pour K_{air0} sont utilisées.

Tableau 2.5 Paramètres pour le calcul de l'échange convectif dans le tube en fonction de son rayon tiré de (Hollmuller, 2002)

rayon [cm]	5	10	15	20	25	30
diamètre [cm]	10	20	30	40	50	60
section [m ²]	0.008	0.031	0.071	0.126	0.196	0.283
échange convectif [W/K.m ²] ¹⁾						
à 0°C	3.4v + 2.7	2.9v + 2.5	2.7v + 2.4	2.6v + 2.3	2.4v + 2.2	2.4v + 2.1
à 10°C	3.2v + 2.5	2.8v + 2.4	2.6v + 2.3	2.4v + 2.2	2.3v + 2.1	2.2v + 2.0
à 20°C	3.0v + 2.4	2.6v + 2.3	2.4v + 2.1	2.3v + 2.0	2.2v + 2.0	2.1v + 1.9
à 30°C	2.9v + 2.3	2.5v + 2.1	2.3v + 2.0	2.2v + 1.9	2.1v + 1.9	2.0v + 1.8

1) v en m/s

Les échanges par conduction entre le tube et le sol environnant sont gouvernés par la conductivité et la chaleur spécifique du tube. Dans un premier temps, un tube en polyéthylène haute densité (PEHD) est utilisé : ses caractéristiques sont résumées dans le Tableau 3.4.

2.5.3 Commande de l'échangeur

L'échangeur air-sol a pour but de réduire la charge d'un bâtiment en rapprochant la température de l'air introduit par la ventilation de celle maintenue dans le bâtiment. Cependant, il peut arriver que l'échangeur travaille dans le sens opposé. Par exemple, en fin d'hiver la température augmente parfois en l'espace de quelques jours alors que le sol restera froid plus longtemps. L'air introduit dans l'échangeur serait alors refroidi alors qu'il devrait être réchauffé pour réduire la charge du bâtiment. Comme évoqué dans la partie 1.2.1.2 (Flaga-Maryanczyk et al., 2014) observe un refroidissement de l'air par l'échangeur pendant certain jours en hiver.

Pour éviter cela, une commande est introduite dans la simulation pour contourner l'échangeur lorsque ces situations se présentent. Elle se base sur la température de l'air extérieur, du sol à la sortie de l'échangeur et de l'intérieur de la maison. Lorsque la température extérieure est inférieure à celle de la maison un réchauffement de l'air est nécessaire dans ce cas on « by-pass » l'échangeur si la température mesurée pour le sol est inférieure à celle de l'air extérieur. À l'inverse, lorsque l'air doit être refroidi, on le « by-pass » si la température du sol est supérieure à celle de l'air.

Cette commande permet de fortement réduire les pertes dues au déphasage entre les besoins du bâtiment et l'effet de l'échangeur. Cependant, certains problèmes persistent à la marge notamment lorsque la température extérieure est proche de celle du bâtiment. Un air de 1 à 2 degrés au-dessus de la température du bâtiment se retrouve parfois de 3 à 4 degrés en dessous à la sortie de l'échangeur. Augmentant ainsi légèrement la charge du bâtiment. Dans les cas où il n'est pas possible d'installer une commande, pour des raisons budgétaires par exemple, l'échangeur devrait être complètement éteint durant les mois de transition notamment en Septembre.

La simulation finale sous TRNSYS, , synthèse des discussions précédentes, est illustrée sur la Figure 2.7.

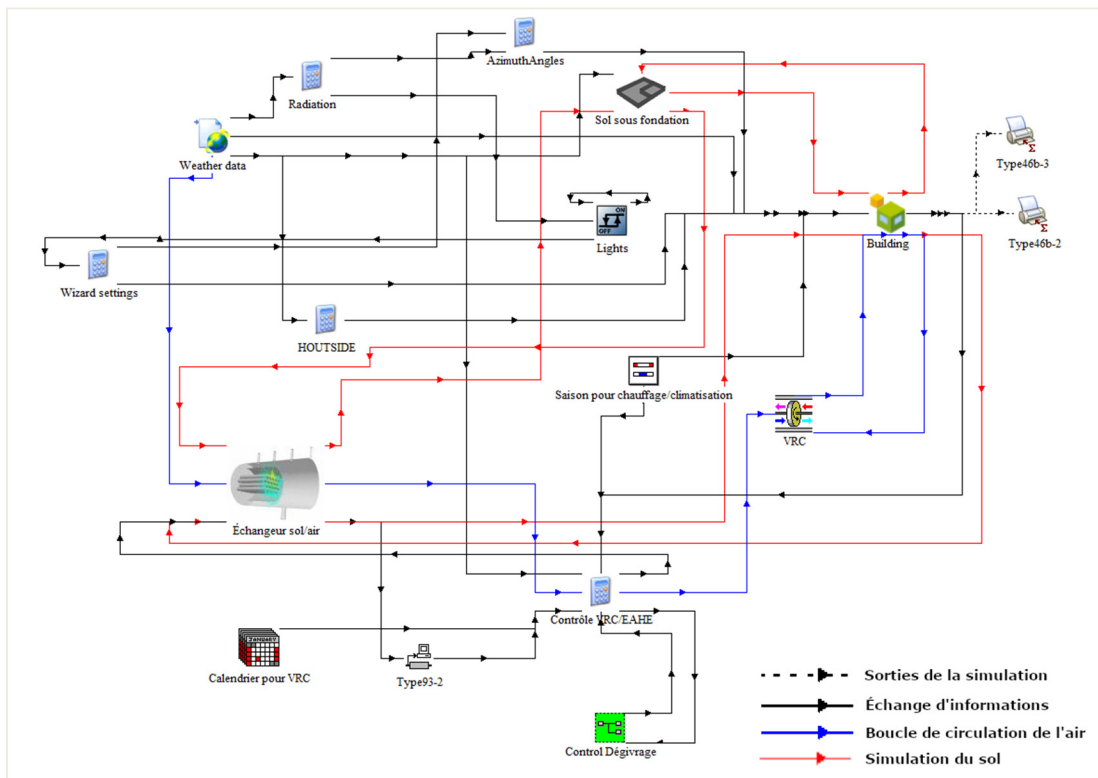


Figure 2.7 Schéma de la simulation sous TRNSYS

CHAPITRE 3

DIMENSIONNEMENT DE L'ÉCHANGEUR

3.1 Étude préliminaire

Dans un premier temps, une étude avec des paramètres fixes est effectuée. Elle a pour objectif de mieux comprendre le comportement de l'échangeur avant de commencer le dimensionnement.

3.1.1 Étude du bâtiment sans échangeur

Une première simulation du bâtiment est effectuée sans la simulation de l'échangeur. Le but étant d'obtenir une référence pour la charge du bâtiment. Elle est ensuite comparée à la charge avec l'échangeur pour obtenir le gain apporté par le puits canadien. Les valeurs pour les charges mensuelles obtenues sont développées dans la Figure 3.1. Sur l'année une charge annuelle de 17 091 kWh est simulée.

La charge se décompose en 793 kWh de climatisation et 16 298 kWh de chauffage. Ces deux valeurs sont très éloignées. Premièrement en raison du COP utilisé pour la climatisation, refroidir demande 3,5 fois moins d'énergie que chauffer. De plus, pour les données météo utilisées, la différence entre les températures extérieure et intérieure est bien plus importante en hiver qu'en été, environ 10 à 15 °C en août contre parfois plus 40 °C en janvier.

L'intensité de charge de chauffage pour une maison individuelle construite au Québec entre 2016 et 2017 est estimée à 83,3 kWh/m² (Ressource naturelles Canada, 2017). Soit pour une habitation de 201 m² une charge annuelle de 16 743 kWh. Pour la charge de climatisation, les données ne sont pas disponibles en fonction de l'année de construction. Mais pour l'ensemble des maisons individuelles, elle est estimée au Québec à 3,5 kWh/m² (Ressource naturelles Canada, 2017). Soit pour une habitation de 201 m² une charge annuelle de 704 kWh.

Les valeurs simulées sont très proches des moyennes québécoises. Une différence plus importante était attendue notamment en raison de la simulation des infiltrations où la valeur utilisée est celle imposée par le code de l'énergie qui diffère souvent de la valeur réelle des bâtiments québécois. Ce qui impliquerait une valeur de charge supérieure à la moyenne. Il semble que ce facteur soit compensé par les autres paramètres choisis.

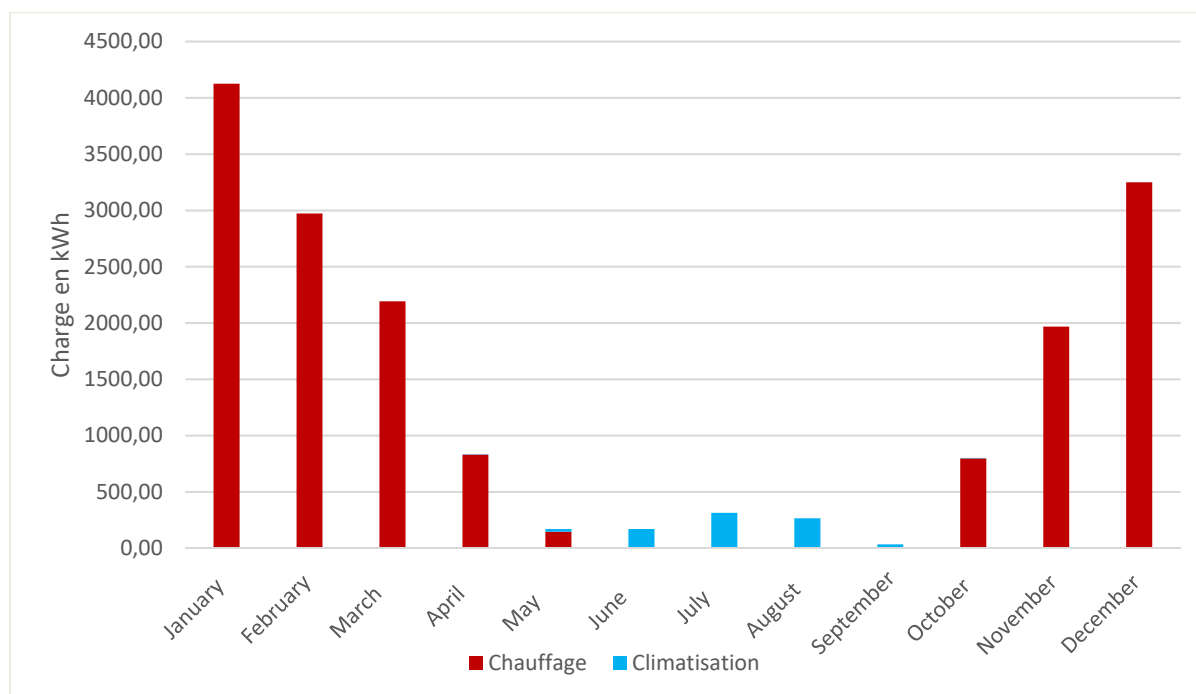


Figure 3.1 Charges mensuelles de chauffage/climatisation du bâtiment sans échangeur

3.1.2 Étude du bâtiment avec échangeur

Pour cette étude préliminaire, un échangeur composé d'un tube en PEHD d'un diamètre de 25 cm est considéré. Il est positionné à 2,5 m de profondeur et avec une distance entre la paroi du tube et le mur des fondations de 40 cm. Dans ce cas-ci l'échangeur aura une longueur horizontale de 35,8 m ainsi que de 5 m en verticale pour rentrer et sortir du sol. Pour la simulation les échanges thermiques dans la partie verticale du tube sont négligés. Ces valeurs sont choisies pour illustrer le comportement de l'échangeur et seront ensuite modifiées dans l'étude de dimensionnement pour trouver les valeurs optimales.

La charge du bâtiment et de nouveau simulée, mais cette fois-ci avec la simulation de l'échangeur. Une charge annuelle de 16 403 kWh est obtenue. Avec ces deux valeurs, un gain net de l'échangeur de 688 kWh est calculé. Ce gain net est très faible par rapport à la charge totale, environ 3,8 % de la charge du bâtiment sans l'échangeur. Par comparaison, pour le même bâtiment la VRC apporterait à elle seule un gain de 4 558 kWh.

Comparer directement la charge des deux simulations permet d'obtenir le gain net, celui réellement apporté par l'échangeur au bâtiment. Cette valeur ne correspond en aucun cas au gain brut, c'est-à-dire la chaleur fournie/déchargée par le sol. Le calcul des échanges sensibles entre l'air et le sol s'effectue lui en mesurant tout au long de la simulation la différence entre la température de l'air à l'entrée et à la sortie de l'échangeur. Cette différence de température est utilisée pour calculer l'énergie sensible équivalente en considérant une chaleur spécifique de 1004 J/(kg.K) pour l'air. Cette énergie est divisée par 3,5 dans le cas où l'air est refroidi par le sol, en cohérence avec la COP utilisée par la climatisation du bâtiment.

Le calcul de cette valeur, les gains bruts, pour l'étude préliminaire donne un gain de 1 379 kWh. Ce gain est différent du gain réel, car il ne considère que ce qui est apporté à l'échangeur et pas les pertes que sa présence engendre. Deux pertes furent identifiées dans cette étude.

3.1.2.1 Effet du couplage échangeur géothermique-VRC

La première perte vient du couplage entre l'échangeur et le VRC. L'échangeur géothermique aura pour effet de réduire la différence de température entre l'air entrant dans le VRC et l'air sortant du bâtiment. Une part plus faible de la chaleur du bâtiment pourra ainsi être récupérée, faisant baisser le gain du VRC. Cet effet, ainsi que sa variation en fonction de l'efficacité du VRC, est aussi discuté dans l'article (Hollmuller & Lachal, 2014).

Pour illustrer cet effet pour un instant précis, on observe l'évolution de la température de l'air le premier janvier à 1h00. Pour le bâtiment sans échangeur géothermique l'air entre dans le

VRC à $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour en ressortir à $7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pour celui avec échangeur, l'air circule d'abord dans le sol passant de $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ puis dans le VRC pour arriver dans le bâtiment à $13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dans le premier cas, le VRC a fourni une énergie sensible équivalente à une augmentation de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et dans le second de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ soit $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ de différence. La perte due au couplage provient de cette différence. L'échangeur extrait du sol assez de chaleur pour faire monter la température de l'air de $11\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais seul l'augmentation de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondant au changement dans la température de l'air entrant ultimement dans le bâtiment, servira réellement à faire baisser la charge.

Cette perte ne peut pas être identifiée seulement en comparant les différences dans la température d'entrée et de sortie du VRC, car le comportement même du VRC est impacté par la présence de l'échangeur. En effet, l'air entrant le VRC étant plus chaud, le nombre et la durée des cycles de dégivrage vont changer (272 h d'arrêt annuel dans le cas sans échangeur contre 30 h avec). De plus, dans le cas présent l'efficacité du VRC n'est pas fixe et dépend de la température de l'air, sa valeur augmentera donc également grâce à l'échangeur. Trois effets vont apparaître : un gain dû à la réduction des cycles de dégivrage, un gain dû à l'augmentation de l'efficacité, et finalement une perte due à la diminution de la différence entre la température de l'air frais et de l'air sortant du bâtiment.

Pour calculer l'impact global du couplage, deux simulations supplémentaires sont nécessaires : une simulation du bâtiment sans échangeur géothermique et sans VRC et une avec l'échangeur également sans VRC. Ces deux simulations permettent de calculer le gain qu'apporte la VRC au bâtiment avec et sans l'échangeur. Sans la présence de l'échangeur géothermique, le VRC apporte un gain de 4558 kWh au bâtiment contre seulement 4103 kWh avec l'échangeur. La différence entre ces deux gains donne les effets combinés du couplage. Soit pour cette étude préliminaire, une perte de 456 kWh. Ce qui signifie que globalement la perte de couplage est plus importante que les gains dus à la réduction du dégivrage et à l'augmentation de l'efficacité du VRC.

Tenter de différencier les effets séparés ou individuel sur le VRC peut être complexe en raison de leurs interactions. En effet, arrêter un appareil pendant une heure n'entraînera pas la même perte selon sa puissance. Et donc une modification de la fréquence des cycles de dégivrage n'apportera pas le même gain suivant que le VRC apporte 4558 kWh ou 4103 kWh annuellement. (Un développement plus poussé est tenté dans l'ANNEXE I).

3.1.2.2 Pertes par court-circuitage thermique

La présence de l'échangeur a également pour effet d'augmenter la charge de chauffage du sous-sol auquel il est adjacent. Pour les puits canadiens cet effet de court-circuitage thermique a été signalé par (Hollmuller & Lachal, 2014). Cette chaleur est récupérée par l'échangeur, mais une partie est ensuite perdue dans le couplage avec le VRC ce qui induit une perte nette pour le bâtiment. (Spitler et al., 2010) approximent l'augmentation de charge en simulant la charge de chauffage d'un sous-sol avec et sans un échangeur sol-eau placé autour. Leur conclusion est que cet effet semble plus important dans les climats froids et peut atteindre jusqu'à 1000 kWh/année. Il semble donc impératif de le prendre en compte dans la conception d'un tel système et de tenter de le limiter.

Une démarche similaire est adoptée ici pour identifier cet effet : le bâtiment est simulé avec l'échangeur autour des fondations, mais sans que l'air sortant de l'échangeur ne soit injecté dans l'habitation. En comparant cette simulation à celle sans l'échangeur, on obtient uniquement les effets de court-circuitage. Une charge de 17 369 kWh est simulée on peut donc estimer cette perte pour le bâtiment à 277 kWh.

L'addition des effets causés par le couplage et de la perte de court-circuitage avec le gain réel donne une somme de 1 421 kWh. L'énergie apportée par l'échangeur se décompose ainsi : 32,1 % sont perdus dans le couplage échangeur/VRC (456 kWh), 19,5 % servent à compenser l'augmentation de chauffage due à la présence de l'échangeur dans le sous-sol (277 kWh) donc finalement seuls les 48,4 % restant sont utilisés pour réduire la charge de

chauffage/climatisation du bâtiment (688 kWh). Ces deux pertes sont assez importantes par rapport au gain de l'échangeur et réduisent fortement son potentiel.

Cette valeur de 1 421 kWh est assez proche des 1 379 kWh calculés en comparant les températures d'entrée et de sortie de l'échangeur géothermique. La différence peut venir d'effets non pris en compte dans cette étude où de la marge d'erreur des simulations il semble cependant raisonnable d'assumer que les deux effets étudiés sont relativement bien calculés et correspondent à la majorité des pertes induites par la présence de l'échangeur dans le système.

L'étude détaillée des différents pertes et gains n'est pas effectuée pour l'ensemble des configurations étudiées, mais seulement lorsque cela devient pertinent. Dans la majorité des cas, seule la réduction de la charge de chauffage/climatisation est étudiée, c'est-à-dire le gain net, car ce dernier correspond à l'économie apporté par l'échangeur.

En plus des échanges sensibles, des échanges latents se produisent dans l'échangeur. Cependant, les résultats n'indiquent aucune différence significative apportée par l'échangeur à la charge d'humidification/déshumidification du bâtiment.

3.2 Paramètres de l'étude économique

3.2.1 Coût de l'échangeur géothermique air-sol

Les valeurs utilisées pour cette étude économique sont tirées de deux mémoires portant sur les échangeurs air-sol au Québec (Desmeules, 2017; Quevillon, 2017). Ces données ont l'avantage de provenir de la même région que l'étude présente. De plus, comme elles datent de 2017, le calcul de l'inflation est simplifié. Un facteur de 1,99 % est utilisé pour l'inflation au Canada en 2018 et de 2,25 % pour 2019 (Inflation.eu, 2020).

La littérature semble indiquer que les matériaux utilisés pour les tubes de l'échangeur n'impactent que peu son comportement, et ce notamment en raison de la faible épaisseur des tubes (Abbaspour-Fard, Gholami, & Khojastehpour, 2011; Ascione et al., 2011; Bansal et al.,

2010). Le matériau le moins cher semble donc à favoriser, dans cette optique des tubes en PEHD sont ici choisis. L'effet du matériau dans le cas spécifique de cette étude est développé dans la partie 3.3.1.

Les prix pour l'achat des tubes sont directement extraits d'une soumission reçue par (Quevillon, 2017) pour des tubes en PEHD. Les valeurs sont résumées dans le Tableau 3.1. Une extrapolation est effectuée pour les diamètres non spécifiés dans le devis. Le coût pour leur installation provient de la même source et est estimé à 10,43 \$ CA par mètre de longueur à installer. Pour l'entrée d'air, un coût de 521,15 \$ CA est utilisé, la valeur provient de (Desmeules, 2017). Le coût total dépend ainsi uniquement du diamètre des tubes et de la longueur utilisée.

Pour l'étude préliminaire, la longueur de tube pour l'échangeur est de 40,8 m ($10*2+6,7*2+0,4*6+2,5*2$) avec un diamètre de 250 mm. Le coût pour le réseau de tubes est donc de 1516 \$ CA pour l'achat et de 425,5 \$ CA pour l'installation. En ajoutant le coût de l'entrée d'air, on obtient un coût total hors taxe de 2462,7 \$ CA.

Tableau 3.1 Coût d'un mètre de tube en PEHD en fonction de son diamètre

Diamètre (mm)	200	250	400	500
Prix (\$ CA/m)	23,95	37,16	99,94	156,94

Les coûts associés à l'extraction et le remblaiement sont négligés dans cette étude, car l'échangeur est supposé comme étant installé lors de la construction de l'habitation. De plus, comme l'échangeur débouche directement dans l'habitation, il est facilement accessible. Installer un droit de regard n'est donc pas nécessaire (Desmeules, 2017).

Une configuration traditionnelle de puits canadien utilise un ventilateur auxiliaire pour faire circuler l'air dans les tubes. Cependant, comme la longueur du réseau est ici beaucoup plus

courte la question de son utilité peut se poser. Pour y répondre un calcul des pertes de charge dans le réseau souterrain est effectué.

Pour les pertes le long des tubes l'équation (3.1) est utilisée avec le facteur de friction de Darcy f obtenu à l'aide de l'équation de Colebrook-White (équation (3.2)) (Soulaïmani, 2018). Le coefficient de rugosité ε utilisé pour un tube en plastique est de 0,0015 mm (ToolBox, 2003). La longueur totale de tube est de 40,8 m et la densité de l'air considéré de 1,205 kg/m³. Le nombre de Reynold est calculé pour un débit de 171,5 m³/h et une viscosité cinématique μ de 15,6*10⁻⁶ kg.m⁻¹. s⁻¹.

$$\Delta P_{tubes} = f * \frac{L}{D} * \rho_{air} * \frac{v^2}{2} \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3.2)$$

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.3)$$

Pour les pertes dans les raccordements entre chaque tube l'équation (3.4) est utilisée avec la méthode des 3K pour obtenir K_f (équation (3.5)), tirés de (Darby, 2001). Trois raccordements sont nécessaires pour faire tourner l'échangeur autour du bâtiment, deux pour monter / descendre dans le sol et un pour rentrer dans le bâtiment. Soit un total de 6 raccordements. Les coefficients K_m K_i et K_d sont égaux respectivement à 800, 0,14 et 4 pour un coude à 90° (Darby, 2001).

$$\Delta P_{raccordements} = 6 * K_f * \rho * \frac{v^2}{2} \quad (3.4)$$

$$K_f = \frac{K_m}{Re} + K_i \left(1 + \frac{K_d}{D^{0.3}} \right) \quad (3.5)$$

Les pertes de pression obtenue sont converties en perte de débit en utilisant la courbe de performance du VRC (VänEE, 2011). Les résultats en fonction du diamètre des tubes sont résumés dans le Tableau 3.2. Ce tableau montre que le débit diminue fortement avec le diamètre et que la perte reste minime pour des diamètres supérieurs à 0,35 m pour fortement augmenter ensuite. Les pertes en débit restent inférieures à 2,5% du débit nominal pour un diamètre supérieur à 0,25 m. Cette limite est choisie pour délimiter les diamètres minimaux à utiliser pour ne pas considérer l'ajout d'un ventilateur auxiliaire.

Tableau 3.2 Pertes de charge dans le système en fonction du diamètre des tubes

Diamètre (m)	Pertes tubes (Pa)	Pertes fitting (Pa)	Pertes totales (Pa)	Débit perdu équivalent (m ³ /h)
0,10	200,406	70,727	246,574	378,99
0,15	28,981	13,124	38,554	45,78
0,20	7,371	4,012	11,383	13,00
0,25	2,553	1,612	3,852	4,35
0,30	1,074	0,770	1,712	1,93
0,35	0,517	0,414	0,868	0,98
0,40	0,265	0,243	0,484	0,54
0,45	0,157	0,152	0,290	0,33
0,50	0,096	0,100	0,184	0,21

L'étude économique ci-après présentée est très simplifiée, car elle a uniquement pour but de donner un premier aperçu de la viabilité économique du système. Ne sont pas pris en compte les coûts associés aux raccordements entre chaque tube, à la création d'un système de by-pass, à la mise en place d'une commande pour l'échangeur géothermique (capteur + traitement), à

l'entretien et au système d'évacuation des eaux de condensation. De plus, aucune actualisation des coûts et des gains n'est considérée.

3.2.2 Économies apportées par l'échangeur géothermique

Les appareils de chauffage/climatisation étant considérés comme électrique les économies apportées par l'échangeur sont simplement calculées en multipliant le gain apporté par le coût de l'énergie électrique. Les tarifs utilisés sont résumés dans le Tableau 3.3 tiré de (Urban, 2020).

Tableau 3.3 Tarif moyen de l'électricité au Canada tiré de (Urban, 2020)

Average Electricity Prices (¢/kWh)							
@energyhub.org							
Monthly Electricity Consumption	600 kWh	750 kWh	1000 kWh	1250 kWh	1500 kWh	2000 kWh	2500 kWh
Alberta	18.8	17.8	16.7	16.1	15.6	15.1	14.8
British Columbia	12.1	11.8	12.4	12.8	13.0	13.3	13.5
Manitoba	10.2	9.9	9.6	9.4	9.3	9.2	9.1
New Brunswick	14.0	13.4	12.7	12.3	12.0	11.7	11.5
Newfoundland & Labrador	14.9	14.3	13.8	13.5	13.3	13.0	12.8
Nova Scotia	15.7	15.3	15.0	14.8	14.6	14.4	14.3
Northwest Territories	38.2	37.6	38.7	39.7	40.4	41.3	41.8
Nunavut	29.3	29.3	37.5	46.9	53.1	60.9	65.6
Ontario	13.9	13.2	12.5	12.1	11.8	11.4	11.2
Prince Edward Island	18.5	17.6	16.8	16.3	16.0	15.6	14.8
Quebec	8.1	7.7	7.3	7.2	7.6	8.0	8.3
Saskatchewan	19.8	19.0	18.2	17.7	17.4	17.0	16.8
Yukon Territory	15.5	15.0	14.5	14.3	14.2	14.1	14.0
Canada Average	17.6	17.1	17.4	17.9	18.3	18.9	19.1

Pour l'étude préliminaire, la charge de chauffage/climatisation représente une charge annuelle de 17 091 kWh. Sur l'ensemble des maisons individuelles au Québec la répartition de la consommation d'énergie est la suivante : 68,7 % pour chauffer l'habitation, 12,9 % pour le chauffage de l'eau, 12,8 % pour les appareils électriques, 4,2 % pour la lumière et 1,4 % pour la climatisation (Ressource naturelles Canada, 2017). Soit 70,1 % pour la charge de chauffage/climatisation. Une approximation grossière de la consommation électrique annuelle peut être effectuée sur cette base. Ce qui donne une consommation annuelle totale de 24 438 kWh et mensuelle moyenne de 2 032 kWh.

Pour les calculs des économies d'électricité, la valeur de 8,0 ¢/kWh est utilisée. Elle correspond à une consommation mensuelle de 2000 kWh pour le Québec. Avec ce tarif, le gain de 688 kWh, apporté par l'échangeur dans l'étude préliminaire, correspond à une économie annuelle de 55 \$ CA sur une facture d'électricité pour le chauffage/climatisation de 1 367,2 \$ CA/an. Cette économie est faible comparée aux 2363 \$ CA que demande l'achat et l'installation de l'échangeur.

Pour cette première étude économique simplifiée, une PRI de 43 ans est obtenue (équation (3.6)). Cette valeur est trop importante pour que cette configuration soit viable. Elle n'est pas non plus de bon augure pour le dimensionnement. On peut cependant observer que si le tarif moyen canadien est utilisé (18,9 ¢/kWh) la PRI descend à 18,17 ans. Ce qui plus raisonnable même si cette moyenne est fortement influencée par le tarif du Nunavut et des Territoires du Nord-Ouest qui ont des climats bien différents de celui utilisé dans la simulation.

$$PRI = \frac{\text{Coûts}}{\text{Gains}} = \frac{\text{coûts}_{\text{fixe}} + L * (\text{coût}_{\text{tubes}} + \text{coût}_{\text{installation}})}{\text{Economie}_{\text{électricité}} * \text{tarif}_{\text{électricité}}} \quad (3.6)$$

3.3 Étude paramétrique

Plusieurs études existantes présentent des techniques pour le dimensionnement de l'échangeur air-sol notamment (Hollmuller & Lachal, 2014). Cependant, ces méthodes ne sont pas adaptées au cas présent en raison de l'interaction avec le bâtiment. De plus, parmi les différents paramètres couramment utilisés pour le dimensionnement, tous ne peuvent pas être modifiés librement ici. La longueur de l'échangeur par exemple est contrainte par la taille des fondations de la maison.

Le dimensionnement est effectué en respectant les contraintes liées à la géométrie des fondations et aux pertes de charge dans les tubes. Chaque paramètre de dimensionnement est étudié séparément à partir de la configuration de l'étude préliminaire.

3.3.1 Matériaux

Comme évoqué dans la partie 3.2.1, le matériau utilisé pour les tubes n'a en général que peu d'impact sur le comportement de l'échangeur. Pour vérifier cette hypothèse, le gain de l'échangeur est simulé avec 3 matériaux différents (PVC, PEHD et acier). Les propriétés thermiques utilisées sont résumées dans le Tableau 3.4. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.2.

Comme attendu, les variations entre les différents matériaux sont faibles. Seulement 3 kWh d'écart pour les deux plastiques. Malgré que la conductivité utilisée pour l'acier soit presque 130 fois supérieure à celle du PEHD, une différence de seulement 16 kWh est observée. Ces faibles écarts sont dus à l'épaisseur des tubes qui n'est que de 7,58 mm pour un tube en PEHD standard, 4 mm pour le PVC et 9,27 mm pour l'acier.

Une étude rapide des prix des tubes pour de l'acier montre des prix environ 7 fois supérieurs aux prix de ceux en PEHD. Les tubes en plastique semblent donc à favoriser. La différence entre le PVC et le PEHD étant négligeable le choix repose uniquement sur le prix. Pour cette étude des tubes en PEHD sont utilisés.

Tableau 3.4 Propriétés thermiques des matériaux utilisés pour la simulation du sol

Matériaux	Conductivité (W/K.m)	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique massique (J/kg.K)
PVC ¹	0,19	1089	880
PEHD ²	0,389	950	1900
Acier ³	50	7800	448

1 : Valeurs tirées de (Kök, Demirelli, & Aydogdu, 2008).

2 : Valeurs tirées de (Plastics Pipe Institute, 2008).

3 : Valeurs tirées de (MatWeb, 2020)

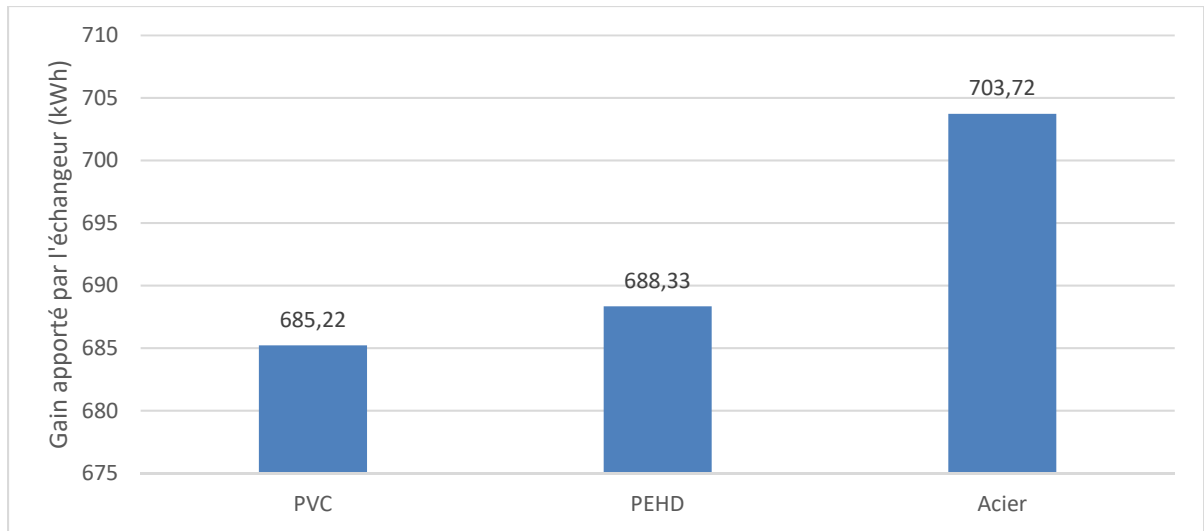


Figure 3.2 Variation du gain apporté par l'échangeur en fonction du matériau utilisé pour les tubes

3.3.2 Nombre de tubes

Une idée pour augmenter le gain apporté par l'échangeur consiste à augmenter le nombre de tubes. Le débit d'air se répartit ainsi dans les tubes diminuant la vitesse de l'air et augmentant la surface d'échange. Plusieurs configurations sont possibles pour répartir les différents tubes dans le sol. La seule étudiée ici consiste à les placer à la même profondeur côte à côte.

Deux répartitions sont testées une avec 2 tubes et une avec 3. Dans les cas avec 2 tubes, ils sont éloignés d'environ 26 cm et de 5,3 cm dans la disposition avec 3. En raison du peu d'espace disponible au fond de la tranchée, les tubes doivent être très rapprochés ce qui va impacter leurs comportements. Les gains obtenus sont résumés sur la Figure 3.3. Une augmentation conséquente du gain est observée. Environ 100 kWh de plus pour la configuration avec 3 tubes. Soit environ 14,5 % du gain initial.

Cependant, cela ne semble pas suffisant pour compenser l'augmentation du coût de l'échangeur associé. En effet, l'achat et l'installation des tubes représentent pour la configuration initiale plus de 78 % du coût total de l'échangeur. Tripler la longueur nécessaire

revient à multiplier par plus de 2,5 ce coût total. Les améliorations observées ne semblent donc pas suffire pour justifier l'utilisation de plusieurs tubes.

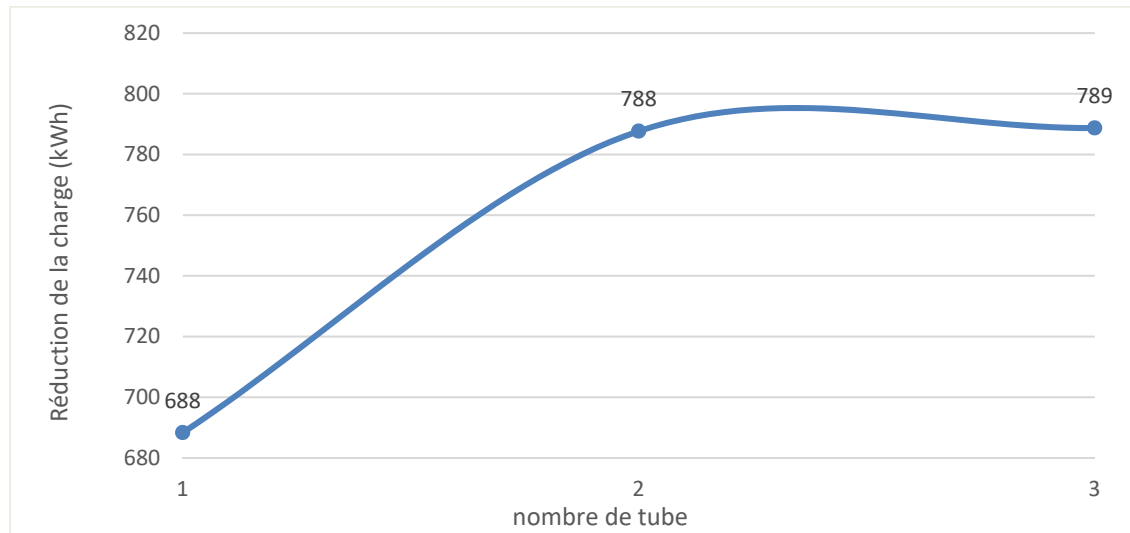


Figure 3.3 Variation du gain apporté par l'échangeur en fonction du nombre de tubes le composant

3.3.3 Diamètre

Le diamètre de l'échangeur est contraint par les pertes de pression comme évoqué dans la partie 3.2.1. Un diamètre supérieur à 0,25 m est donc nécessaire. Différents diamètres respectant cette condition sont simulés et les gains pour le bâtiment obtenus sont résumés sur la Figure 3.4 a).

Les résultats obtenus paraissent à première vue étranges. En effet, quand le diamètre augmente la surface d'échange avec le sol ainsi que le temps de séjour de l'air dans l'échangeur augmentent tous les deux. Une augmentation du gain serait attendue. Ici en revanche une diminution du gain entre 0,3 et 0,4 m est observée puis une augmentation de 0,4 à 0,5 m.

Pour expliquer ce phénomène il faut se pencher plus en détail sur le comportement de l'échangeur. Comme développé dans la partie 3.1, la diminution de la charge représente le gain apporté par l'échangeur au bâtiment pas les échanges entre l'échangeur et le sol. Ces échanges sont calculés en mesurant la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie de

l'échangeur et sont résumés sur la Figure 3.4 b). Une augmentation de l'énergie reçue par l'échangeur est ici bien observée. Si elle ne se retranscrit pas en une amélioration du gain pour le bâtiment c'est que les pertes créées par la présence de l'échangeur vont également augmenter, compensant son effet.

La Figure 3.4 c) illustre l'évolution de l'augmentation de la charge du sous-sol créée par la présence de l'échangeur. La perte créée par cet effet augmente bien avec le diamètre. Elle augmente fortement pour les premières valeurs puis semble se stabiliser pour des diamètres supérieurs à 0,4 m ce qui permet au gain pour le bâtiment d'augmenter. Ce comportement atypique de l'échangeur illustre l'importance de bien saisir l'interaction entre l'échangeur, le bâtiment et le VRC.

Un autre facteur impacté par le diamètre est le coefficient de convection. En effet, sa valeur dépend ici directement de la vitesse de l'air dans l'échangeur (voir l'équation (2.2)). Le débit étant constant, la vitesse de l'air dans l'échangeur va diminuer avec l'augmentation du diamètre. De plus, les coefficients K_{air0} et K_{air1} diminuent également quand le diamètre augmente (voir Tableau 2.5). Tout ceci entraîne une diminution du coefficient de convection à mesure que le diamètre augmente.

Au niveau du dimensionnement, on remarque que les variations sont faibles par rapport à l'augmentation des prix des tubes. Acheter un tube de diamètre 0,5 m est 4 fois plus cher qu'acheter un tube de diamètre 0,25 m. Les variations ne sont pas ici du même ordre de grandeur. Un tube ayant un diamètre de 0,25 m semble donc à favoriser.

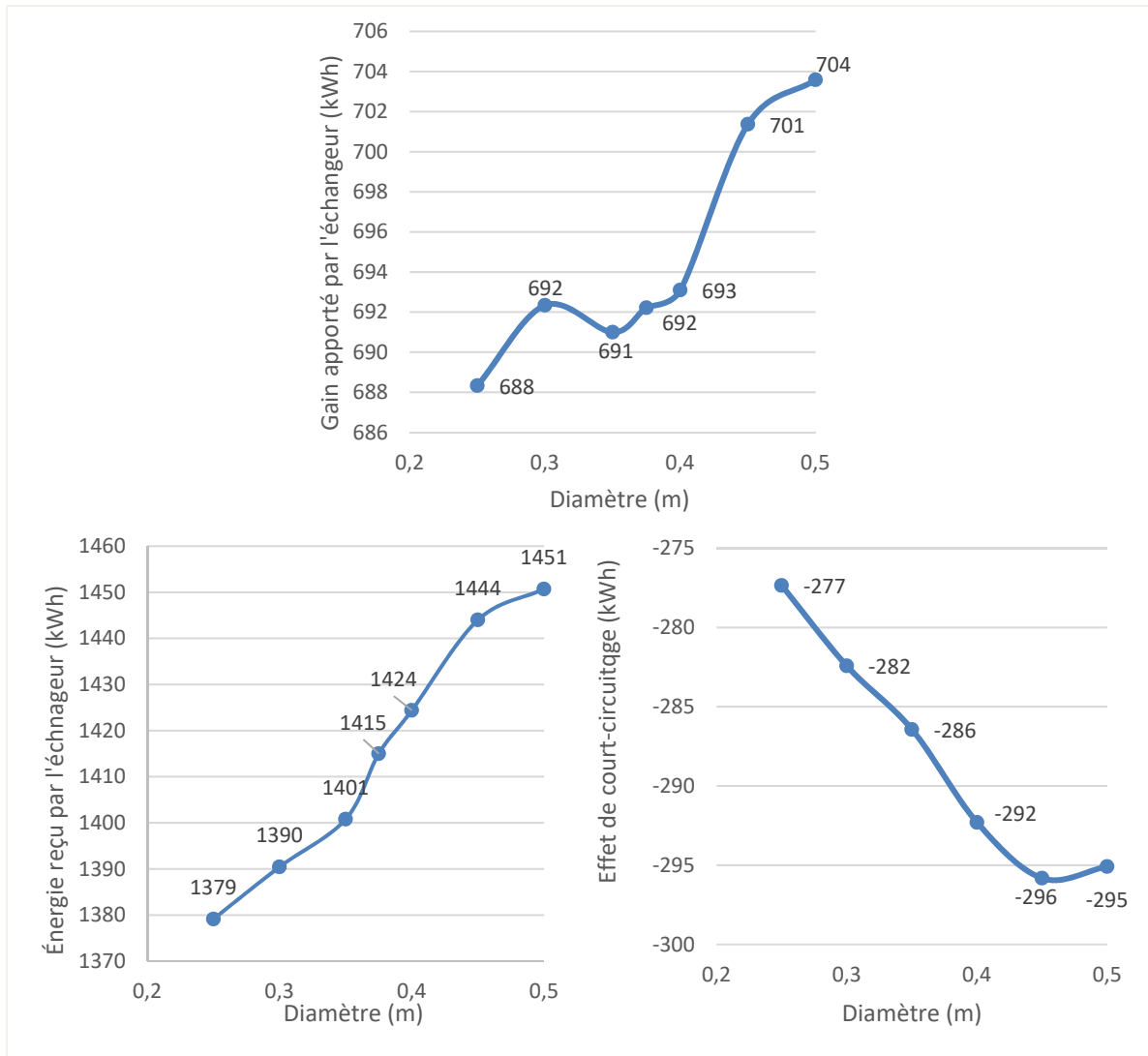


Figure 3.4 Variations en fonction du diamètre a) du gain apporté par l'échangeur, b) de l'énergie reçue par l'échangeur et c) des effets de court-circuitage

3.3.4 Profondeur

La profondeur à laquelle est placé de l'échangeur est ici limitée par la profondeur du sous-sol du bâtiment. En effet, lors de la construction du bâtiment, il n'est pas nécessaire de creuser à une profondeur supérieure. Placer l'échangeur plus profondément entrainerait donc des coûts d'excavation supplémentaires. La profondeur maximale pour cette étude est donc de 2,5 m pour éviter ces coûts supplémentaires.

En règle générale, plus la profondeur augmente plus l'échangeur est performant (Ascione et al., 2011; Bordoloi, Sharma, Nautiyal, & Goel, 2018; Mihalakakou et al., 1994b). Pour vérifier que cela reste vrai pour le cas présent, le bâtiment est simulé en faisant varier la profondeur de l'échangeur. Les résultats présents sur la Figure 3.5 illustrent bien que cet effet. Placer l'échangeur le plus profond possible comme effectué dans l'analyse préliminaire semble être la meilleure option.

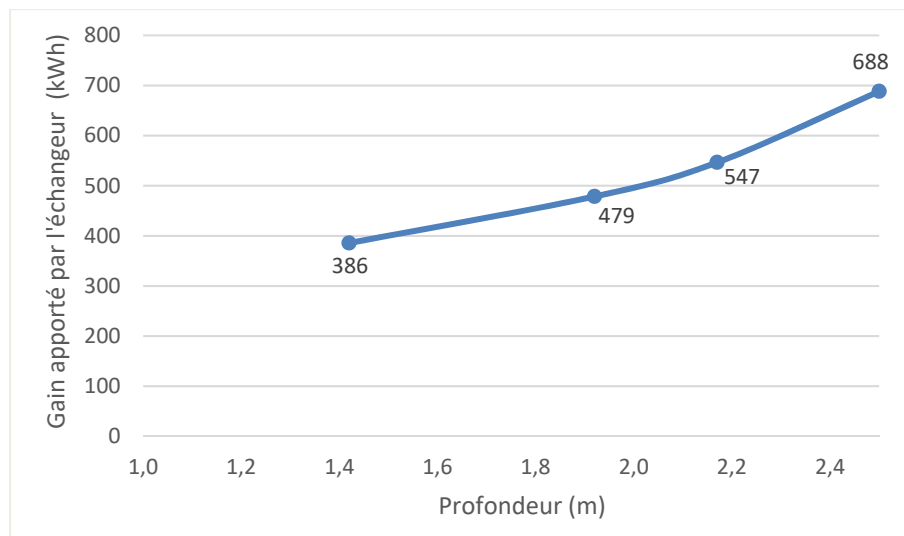


Figure 3.5 Variation du gain apporté par l'échangeur en fonction de sa profondeur d'enfouissement

3.3.5 Distance entre l'échangeur et le bâtiment

Toujours dans le but de ne pas avoir à considérer des coûts d'excavation supplémentaires, une distance maximale entre le bâtiment et l'échangeur est à prendre en compte. Dans l'étude présente, il a été supposé qu'une distance de 0,9 m autour de l'habitation était excavée lors de sa construction (voir 2.5.1). Pour un échangeur de 0,25 m de diamètre, un écart avec le mur des fondations supérieure à 0,65 m (0,9 m de tranché moins 0,25 m de tube) demande donc une excavation supplémentaire, ces cas ne sont pas étudiés ici.

On simule le bâtiment en modifiant la distance entre l'échangeur et la fondation et on obtient les résultats présentés à la Figure 3.6. Le gain apporté par l'échangeur augmente fortement

avec la distance. Ce qui est facilement expliqué par le fait que l'interaction entre l'échangeur et le bâtiment diminue avec la distance. Une diminution de l'interaction entraîne une diminution des effets de court-circuitage thermique (Figure 3.6. b)) et donc une augmentation de l'énergie nette fournie au bâtiment .

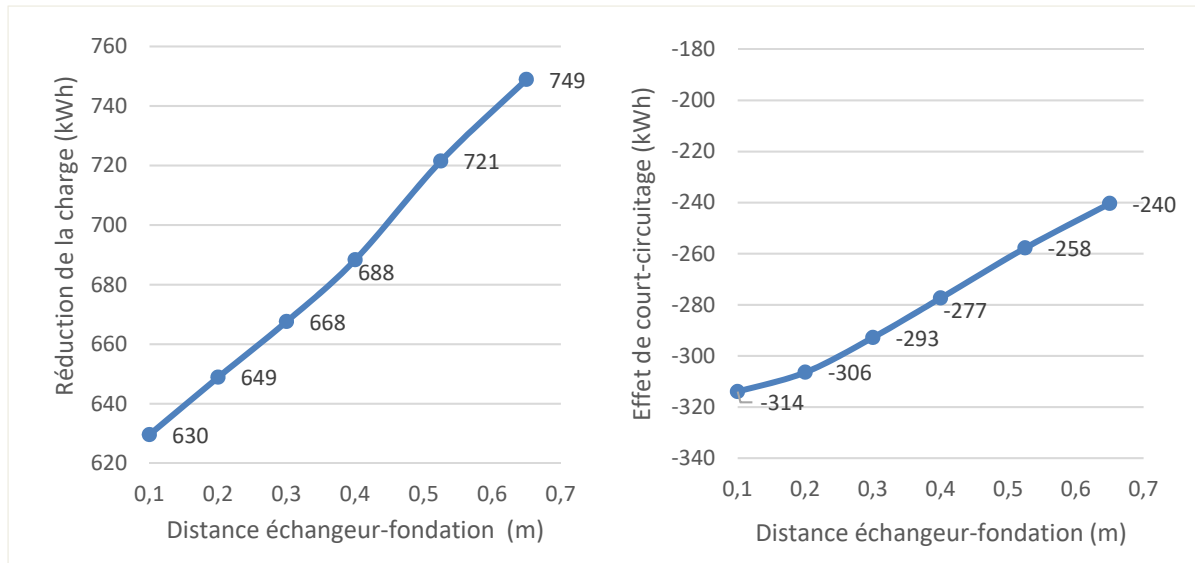


Figure 3.6 Variations en fonction de la distance échangeur-fondation a) de la réduction de la charge, b) des effets de court-circuitage

Placer l'échangeur à 0,65 m de la fondation semble être le choix à adopter ici. Bien sûr cette valeur est liée à la distance choisie pour l'excavation lors de la construction. Une conclusion plus générale est que l'échangeur doit être éloigné le plus possible du bâtiment pour éviter les effets de court-circuitage.

3.3.6 Longueur de l'échangeur

Les valeurs possibles pour la longueur de l'échangeur vont être limitées par la place autour des fondations de la maison. Comme vu dans la partie 3.3.4, la distance maximale possible entre l'échangeur et l'habitation est de 0,65 m. À cette distance une longueur de tube 37,3 m est nécessaire pour faire le tour de l'habitation. C'est donc la longueur maximale dans cette configuration. Le bâtiment est simulé plusieurs fois en réduisant petit à petit la longueur de l'échangeur et la Figure 3.7 est obtenue.

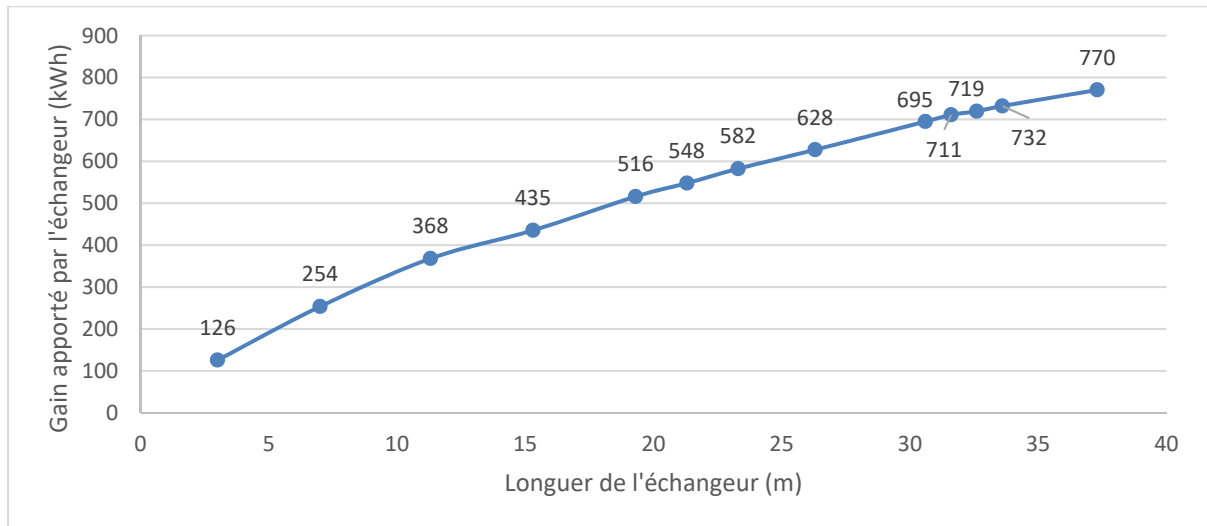


Figure 3.7 Variation du gain apporté par l'échangeur géothermique en fonction de sa longueur

Le gain augmente avec la longueur, car le temps de séjour et la surface totale d'échange augmentent. C'est donc la longueur maximale qui apporte le meilleur gain, mais également la longueur pour laquelle l'échangeur est le plus coûteux. La valeur optimale est un compromis entre ces deux facteurs.

Pour identifier cet optimum, un calcul de la PRI est effectué pour chaque longueur (Figure 3.8). Sur la Figure 3.8, la présence d'un minimum est en effet observable, il représente la longueur optimale. Un plus grand nombre de simulations est effectué pour mieux déterminer sa valeur. Il semble se trouver pour cette configuration aux alentours de 31,6 m.

Un fait à noter est que, comme le tarif de l'électricité est un facteur dans la formule du PRI (3.6), sa valeur ne changera donc pas la longueur optimale, mais seulement la PRI lui correspondant. Cependant, l'écart entre les différentes longueurs est lui proportionnel au tarif. Avec un tarif de 8 ¢/kWh, la PRI change d'environ 1,34 années entre la longueur maximale et optimale, alors que pour un tarif de 80 ¢/kWh l'écart n'est plus que de 0,134 année. Bien fixer la longueur est d'autant plus important que le tarif utilisé est faible.

Les autres paramètres économiques vont en revanche modifier l'optimum. Ainsi, une augmentation ou une diminution des coûts d'achat et d'installation des tubes viendra respectivement diminuer ou augmenter la valeur de la longueur optimale.

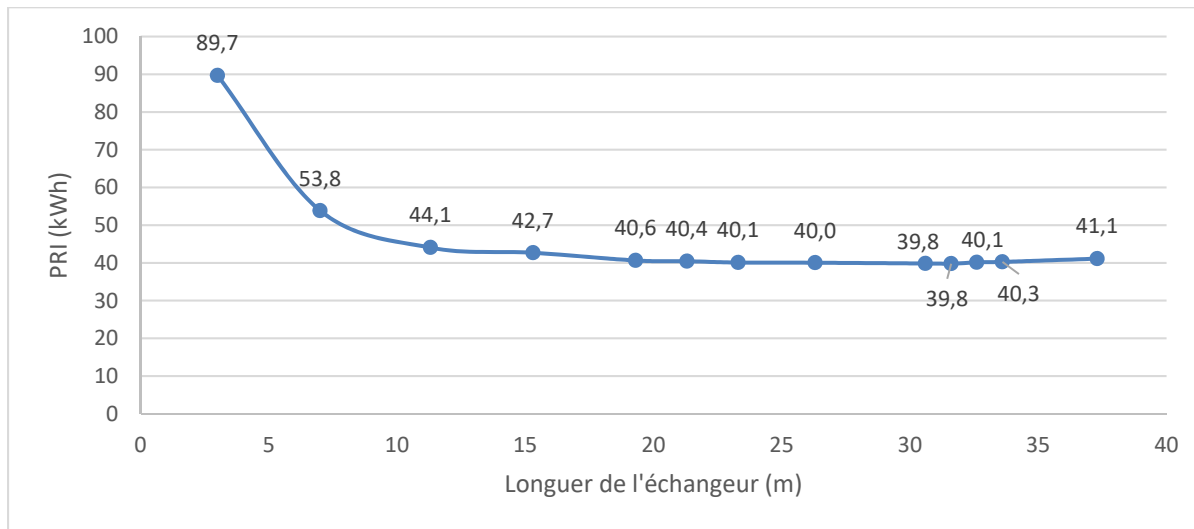


Figure 3.8 PRI de l'échangeur en fonction de sa longueur

3.4 Bilan du dimensionnement

La configuration optimale semble être dans les faits assez proche de celle de l'étude préliminaire. Seule la modification de la distance échangeur/bâtiment et de la longueur de l'échangeur ont permis de faire diminuer la PRI du système. Dans la configuration optimale, l'échangeur est positionné à 2,5 m de profondeur et à une distance de 0,65 m des fondations. Il est composé d'un échangeur en PEHD de 31 m de longueur et de 0,25 m de diamètre.

Dans ce cas, un gain net de 711 kWh est apporté au bâtiment lorsque connecté en série au VRC, ce qui correspond à une économie annuelle de 56,9 \$ CA. L'approximation des coûts donne pour un échangeur de cette longueur et de ce diamètre un total de 2263 \$ CA. Soit pour le système une PRI de 40 années. Cette PRI est trop importante pour permettre au système

d'être viable dans ces conditions. D'autant plus que l'étude des coûts est approximative et néglige certains paramètres.

Un fait à noter est que les valeurs du diamètre, de la profondeur et de la distance échangeur-bâtiment dépendent plus des contraintes imposées que de la PRI. Le diamètre optimal dépend des pertes de charge acceptables sans avoir à rajouter un ventilateur. Alors que la profondeur et la distance optimales dépendent de l'espace excavé lors de la construction du bâtiment. Les valeurs choisies pour ces facteurs ne sont donc pas dépendantes des paramètres économiques. De plus, comme évoqué dans la partie précédente, la longueur optimale est indépendante du tarif de l'électricité. Il est donc possible de conserver cette configuration tout en modifiant le tarif de l'électricité.

Si on considère que le tarif de l'électricité comme le seul paramètre modifié. Il devrait être à une valeur de 0,16 ¢/kWh pour permettre une PRI inférieure à 20 ans. Cette valeur n'est atteinte que dans 3 provinces au Canada : Nunavut, Territoires du Nord-Ouest et Saskatchewan. Elle est cependant atteinte dans la plupart des pays européens (Eurostat, 2020). La moyenne pour la zone euro est de 36 ¢/kWh ce qui donnerait une PRI d'environ 9 années. PRI plus raisonnable, bien qu'approximative.

Cependant l'ensemble des paramètres utilisés dans la simulation (climatique, réglementaire, économique...) sont issus de données québécoises. Modifier uniquement le tarif ne permet en aucun de tirer de conclusion pour d'autres zones géographiques. Un changement de pays entraînerait sans aucun doute des modifications sur le coût de l'échangeur, les données climatiques, les résistances thermiques du bâtiment, la réglementation sur la ventilation, la consommation annuelle...

CHAPITRE 4

ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

Dans le cadre du dimensionnement plusieurs paramètres impactant le comportement du système ont été étudiés. Seuls ceux concernant directement l'échangeur furent considérés. Bien d'autres influencent ses performances mais restent fixes pour un bâtiment/emplacement donné. Une étude de sensibilité est menée pour essayer d'appréhender leurs impacts.

Une grande différence avec le dimensionnement est qu'ici la charge initiale du bâtiment va également être modifiée par les paramètres étudiés. Elle devra donc être resimulée pour chaque configuration.

4.1 Sensibilité aux paramètres du sous-sol du bâtiment

La simulation des étages sous le sol est particulièrement importante en raison de son interaction avec celle de l'échangeur. Comme vu dans la partie 3.1.2.2, cette interaction a un effet négatif sur les gains apportés par l'échangeur. Cette partie est consacrée à observer comment va évoluer cet effet selon différents paramètres.

4.1.1 Consigne de chauffage du sous-sol

Dans l'étude de dimensionnement, le sous-sol de l'habitation était chauffé avec une température de consigne constante à 15 °C. Comme le sous-sol interagit fortement avec le sol l'entourant et l'échangeur, modifier cette valeur change le comportement de l'échangeur. Dans cette section, la valeur varie en partant de 10 °C et augmente jusqu'à ce que le sous-sol soit chauffé de la même manière que le reste de la maison (voir 2.2.3).

Les gains associés sont résumés sur la Figure 4.1. Tout d'abord, une diminution du gain est perceptible. Ce qui est logique, plus la température du sous-sol augmente plus la chaleur

prélevée par l'échangeur au bâtiment est importante, cette augmentation des effets de court-circuitage est visible sur la Figure 4.2. La dernière valeur en revanche se comporte différemment, en effet quand le sous-sol est considéré comme une pièce habitée, le gain augmente et le court-circuitage diminue.

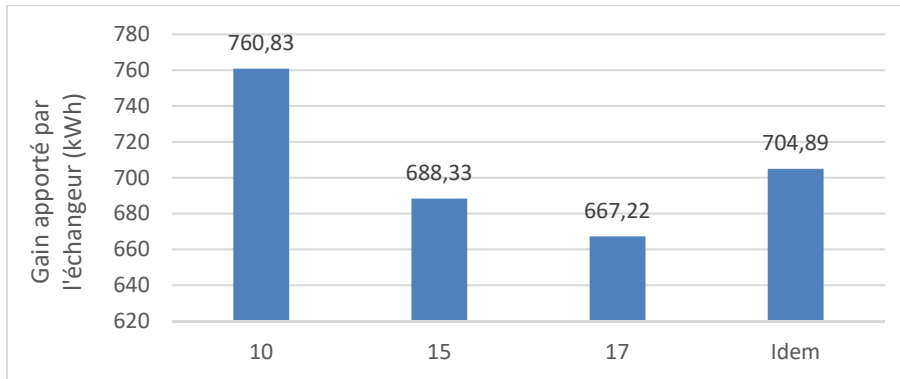


Figure 4.1 Gain en fonction de la température du sous-sol

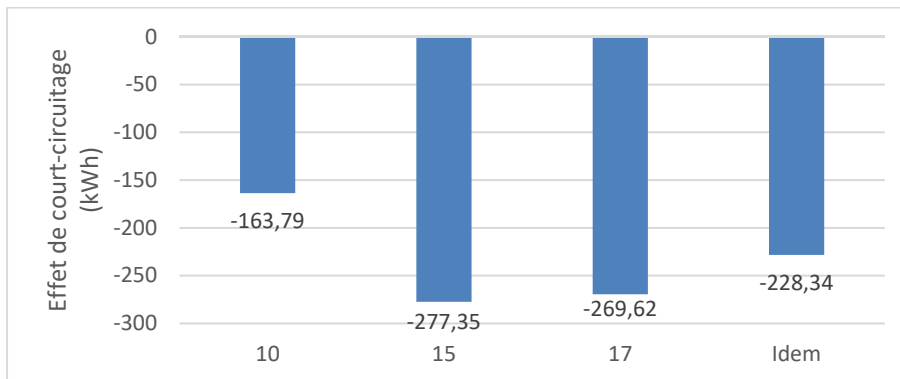


Figure 4.2 Effets de court-circuitage dus à la présence de l'échangeur en fonction de la température du sous-sol

Pour comprendre la raison de cette diminution, il faut regarder mois par mois la charge de chauffage du sous-sol. En plus de l'augmentation de la charge avec l'augmentation de la température de consigne, il est possible de remarquer l'apparition d'une charge de 145 kWh en septembre quand le sous-sol est chauffé comme le reste de bâtiment, aucune charge n'était observée pour ce mois dans les autres cas. Pendant ce mois injecter l'air dans le sol va permettre de réduire cette nouvelle charge. Si on observe en détail les effets de court-circuitage, on peut

voir que la seule la présence de l'échangeur autour des fondations réduit la charge de chauffage du sous-sol de 35 kWh en septembre (Figure 4.3). Ce qui explique la diminution des effets de court-circuitage et l'augmentation du gain observé pour le dernier cas.

Les résultats indiquent que moins le sous-sol est chauffé plus l'échangeur est efficace. L'échangeur semble mieux fonctionner quand le sous-sol du bâtiment est utilisé pour du stockage que comme un espace habité. Une variation du gain de moins de 10 % est observé pour une variation de $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (33 % de la valeur d'origine). Modifier ce paramètre ne change pas les conclusions quant à la viabilité économique du système.

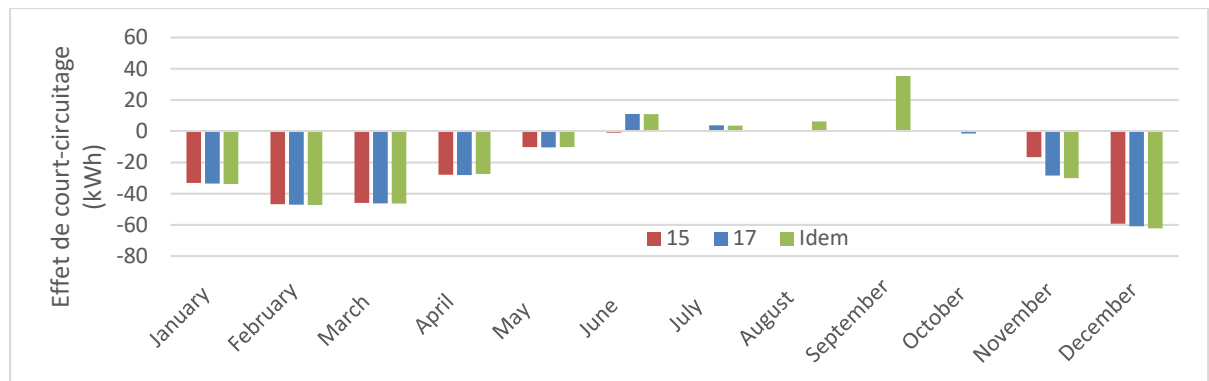


Figure 4.3 Effets de court-circuitage mensuel dus à la présence de l'échangeur en fonction de la température du sous-sol

4.1.2 Isolation du sous-sol

La résistance thermique utilisée ici pour les murs du sous-sol dépend du code la construction canadienne. Cette valeur est donc similaire pour tout bâtiment nouvellement construit au Canada mais peut être différente dans d'autre région du monde.

De la même manière que pour la consigne de chauffage, modifier l'isolation du sous-sol va impacter les échanges de chaleur entre les fondations et l'échangeur. Plus la résistance thermique des parois est importante et moins ils interagissent. Ce qui se retranscrit en une

diminution des pertes de court-circuitage et donc une augmentation du gain apporté par l'échangeur (Figure 4.4).

Un bâtiment avec une bonne isolation du sous-sol semble permettre à l'échangeur de mieux performer. Pour une variation de $\pm 1 \text{ m}^2\text{K/W}$ (33 % de la valeur d'origine) une modification du gain entre 10 et 25 % est observé, ce paramètre semble donc important à bien fixer dans la simulation.

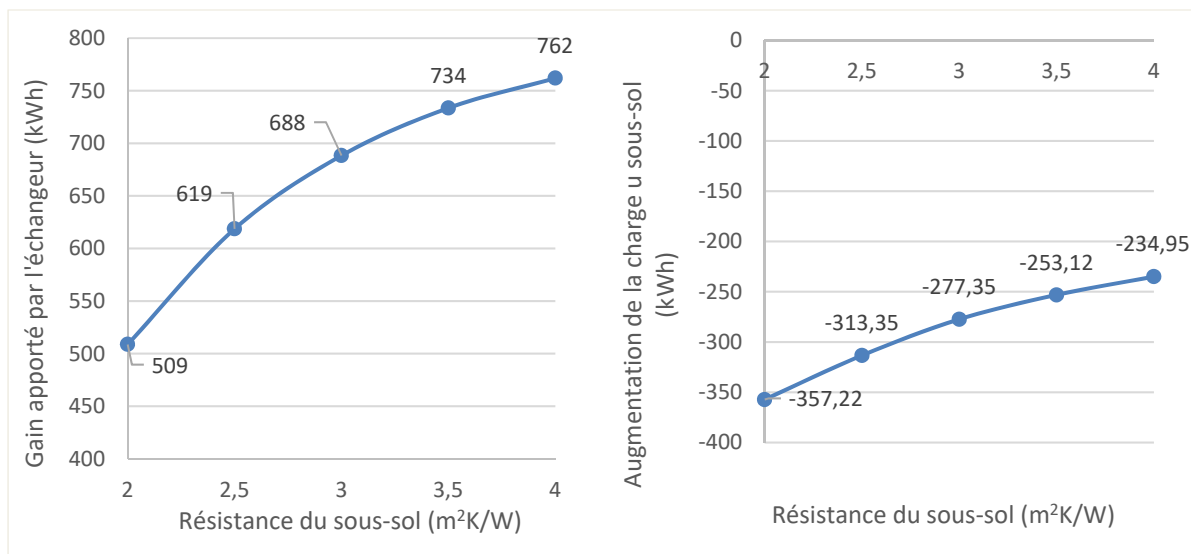


Figure 4.4 Variation en fonction de l'isolation du sous-sol a) du gain apporté par l'échangeur
b) de l'effet de court-circuitage

Les résultats concernant ces deux paramètres ainsi que ceux concernant l'impact de la distance entre l'échangeur et le bâtiment (3.3.5) vont dans la même direction. Ils indiquent tous qu'en dehors de quelque cas particuliers limiter les échanges entre l'échangeur et le bâtiment permet d'améliorer les gains apportés. Il faut cependant considérer que l'ajout d'isolant augmente le coût de l'installation et qu'il faudra le faire davantage pour améliorer le confort du sous-sol que pour mieux rentabiliser l'échangeur.

4.2 Sensibilité aux paramètres de la ventilation

L'échangeur air-sol étant directement connecté à la ventilation du bâtiment, modifier les paramètres utilisés pour la définir impacte nécessairement les performances de l'échangeur. Notamment au niveau des pertes de couplage évoquées dans la partie 3.1.2.1.

4.2.1 Débit de ventilation

Comme vu dans la partie 2.2.2, le débit de ventilation réglementaire dépend de la surface chauffée et du nombre de chambres. Il peut donc varier selon l'utilisation du bâtiment. Plus la quantité d'air entrant est importante, plus l'énergie requise pour maintenir la température du bâtiment l'est également. Augmenter le débit de ventilation augmente ainsi la charge de l'habitation. Par exemple, faire passer le débit de $171 \text{ m}^3/\text{h}$ à $240 \text{ m}^3/\text{h}$ augmente la charge de chauffage/climatisation de $2\,300 \text{ kWh}$.

Les résultats indiquent que plus le débit de ventilation est important plus l'échangeur apporte d'énergie au bâtiment (Figure 4.5 a)). Cette augmentation est en partie dû à la diminution des pertes de couplage (Figure 4.5 b)). En effet, une augmentation du débit diminue le temps de séjour dans le VRC et donc diminue la quantité de chaleur récupérée. Le VRC apportant moins, les pertes de couplage diminuent.

Installer un échangeur dans une habitation peu ventilée n'apportera presque aucun bénéfice. Pour une variation de $\pm 35 \text{ m}^3/\text{h}$ (20 % de la valeur d'origine) une modification du gain entre 30 et 60 % est observée. Bien connaître la demande en ventilation du bâtiment est donc primordial.

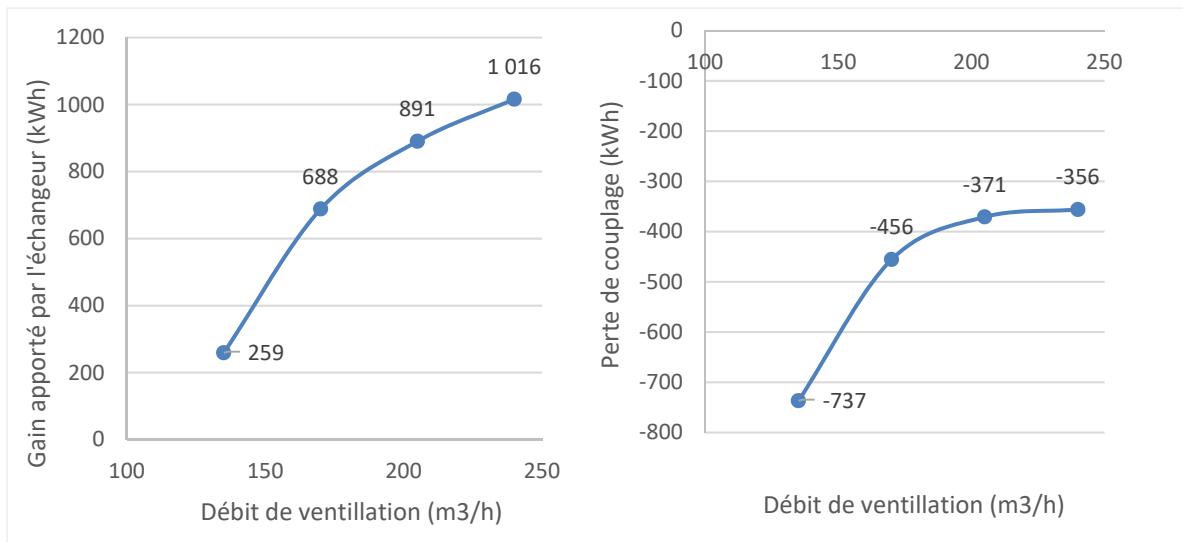


Figure 4.5 Variation en fonction du débit de ventilation a) du gain apporté par l'échangeur b) des pertes de couplage.

4.2.2 Efficacité du VRC

Le VRC utilisé au départ à une efficacité de 0,63 à -25 °C. Le code de la construction du Québec impose l'installation d'un VRC avec une efficacité minimale de 0,54 à cette température (Conseil national de recherche du Canada, 2015). Le bâtiment pourrait donc avoir un VRC différent de celui employé pour l'étude préliminaire. Pour l'étude de sensibilité, l'efficacité du VRC est modifiée en conservant un écart fixe entre l'efficacité 0 °C et celle à -25 °C.

Le gain apporté par l'échangeur diminue linéairement avec l'efficacité du VRC (Figure 4.6 a)). Ce qui est logique car seules les pertes de couplage sont impactées par ce changement et ces pertes varient linéairement avec l'efficacité du VRC (Figure 4.6 b)). Ces résultats sont en accord avec la littérature (Hollmuller & Lachal, 2014). Comme dans la littérature, il est également observable que plus la VRC est efficace moins installation d'un échangeur air-sol est intéressant.

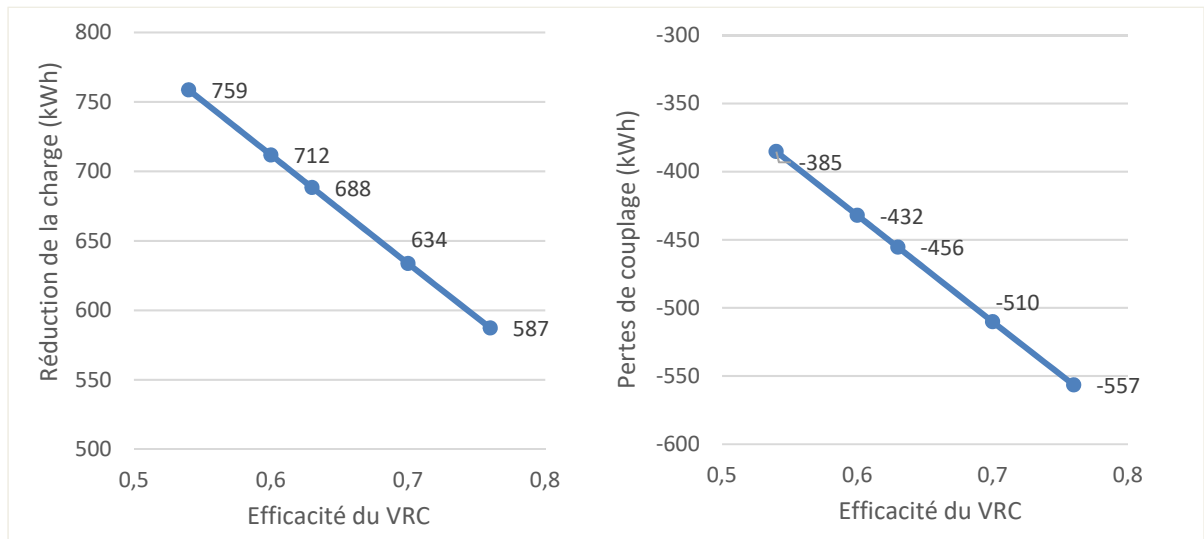


Figure 4.6 Variation en fonction de l'efficacité du VRC a) du gain apporté par l'échangeur b) de la perte de couplage.

Le gain varie avec une pente d'environ 780, une variation de $\pm 10\%$ de l'efficacité entraînera une variation du gain de 78 kWh. Ce paramètre n'a donc pas un impact majeur sur les performances du système. Cependant, comme la variation est linéaire, il est plus facile d'anticiper les variations du système pour ce paramètre que pour les autres.

4.3 Sensibilité à l'emplacement du bâtiment

Les simulations ont été effectuées en modifiant les caractéristiques entourant le bâtiment afin de connaître leur importance relative.

4.3.1 Conduction du sol

Les caractéristiques du sol utilisées sont issues de données extraites de la littérature (1.1.2). Selon l'emplacement du bâtiment, les caractéristiques du sol entourant changent, notamment la conductivité thermique. La conductivité réelle du sol autour du bâtiment n'est presque jamais connue à cause du coût important associé à la mesure.

Pour étudier la sensibilité à ce paramètre plusieurs simulations sont effectuées. La conductivité du sol varie de $0,865$ à $2,42 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour représenter les différentes valeurs tirées de

(Giardina, 1995) ; 2,42 correspondant à un sol dense saturé en eau et 0,865 un sol léger ou un sol dense sec (Tableau 1.1) La conductivité des matériaux utilisés pour le remblayage (sable et gravier) reste fixe.

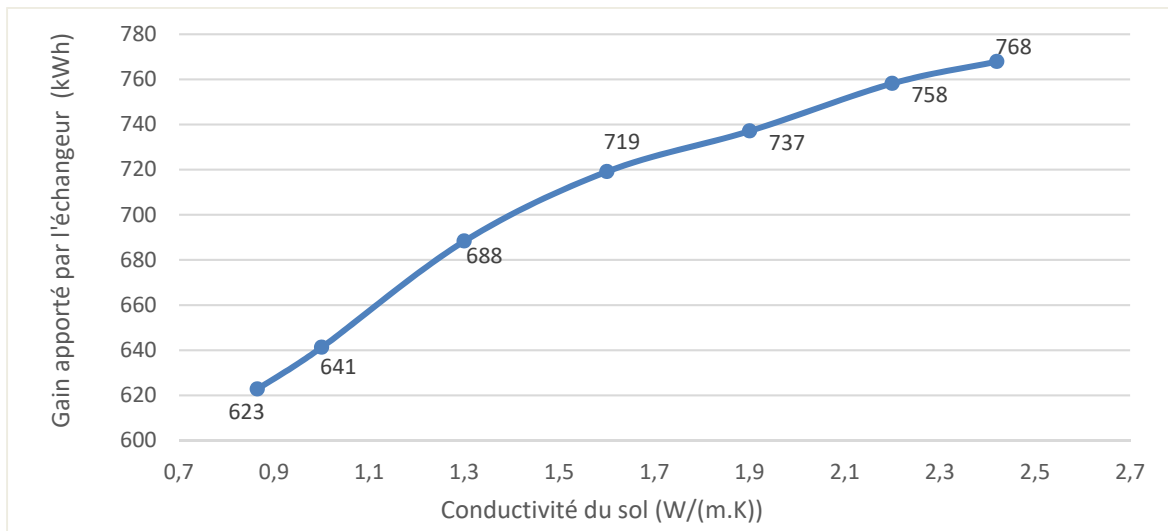


Figure 4.7 Variation du gain apporté par l'échangeur en fonction de la conductivité du sol entourant le bâtiment

Le gain augmente avec la conductivité du sol car plus la conductivité est grande plus les échanges de chaleur avec le sol sont importants (Figure 4.7). Une variation de $\pm 0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ de la conductivité (23 % de la valeur d'origine) entraîne une modification du gain de 4 à 6 %. Ce facteur ne semble donc pas impacter fortement les performances de l'échangeur.

4.3.2 Météo

Comme développé dans la partie 2.3, les données météo utilisées dans la simulation sont issues d'une station située sur l'île de Montréal. Plusieurs des paramètres météo ont un impact sur le comportement de l'échangeur, notamment la température ambiante.

Six villes ont été choisies pour représenter les différents climats en Amérique du Nord : Kuujuaq, Saguenay, Montréal, Seattle, Charlotte et Miami. Ces choix correspondent respectivement aux climats : toundra, subarctique, continental humide, côte ouest marine,

subtropical humide et tropical. Les températures moyennes mensuelles pour chaque ville sont résumées sur la Figure 4.8.

La charge du bâtiment change drastiquement selon la ville considérée (Figure 4.9), plus la ville est située au nord plus la charge de chauffage augmente en accord avec la diminution de température. La charge de climatisation prend-elle une part de plus en plus importante à mesure que la latitude diminue jusqu'à devenir la seule dépense à Miami. Bien sûr, ces charges ne correspondent pas à la charge d'un bâtiment moyen dans ces régions car les résistances thermiques des murs restent celles imposées par le code Canadien. Elles seront bien supérieures à celle des bâtiments à Miami, par exemple. Il est également rare (voire impossible) de voir des bâtiments avec un sous-sol aussi au Nord que Kuujuaq.

Les gains sont calculés pour chaque fichier météo et sont résumés sur la Figure 4.10. Les gains apportés en chauffage et en climatisation diminuent proportionnellement à leurs charges respectives. L'installation de l'échangeur est donc plus avantageuse dans les régions où la météo induit un fort besoin en conditionnement de l'air. L'échangeur permet une réduction de la charge de chauffage d'entre 3 et 5 % et de la charge de climatisation d'entre 7 et 25 %. Ce qui semble indiquer que l'échangeur fonctionne mieux en refroidissement.

Le résultat indique que la valeur des gains apportés par l'échangeur ainsi que son comportement vont être fortement influencés par la météo. De plus, certains effets négligés dans la simulation de base impacteront fortement l'échangeur dans certaines régions. En particulier l'effet de la couverture de neige et du gel du sol pour les climats extrêmement froids. Les résultats d'une simulation sont donc liés au climat considéré et ne doivent pas être utilisées en dehors de la région étudiée.

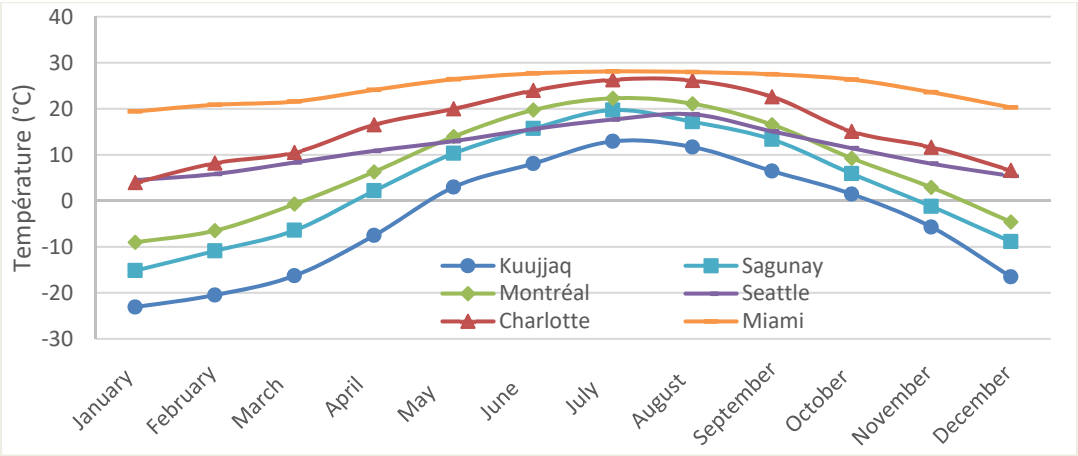


Figure 4.8 Températures mensuelles dans les 6 villes étudiées

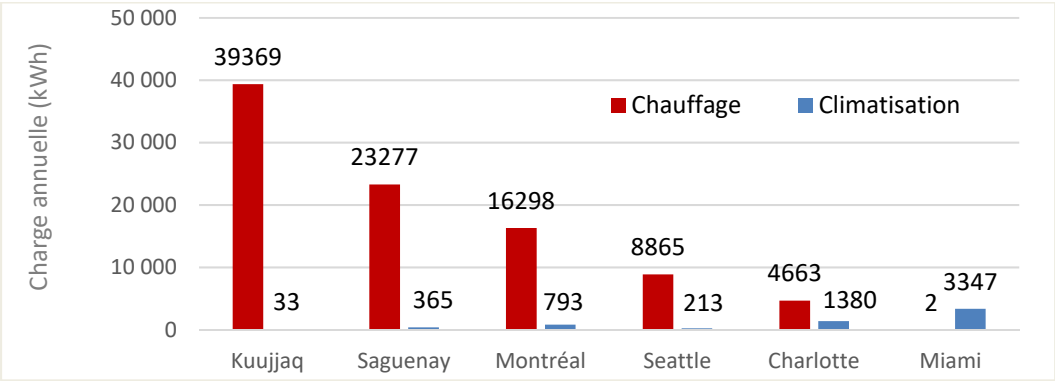


Figure 4.9 Charge annuelle de chauffage et de climatisation dans différentes villes

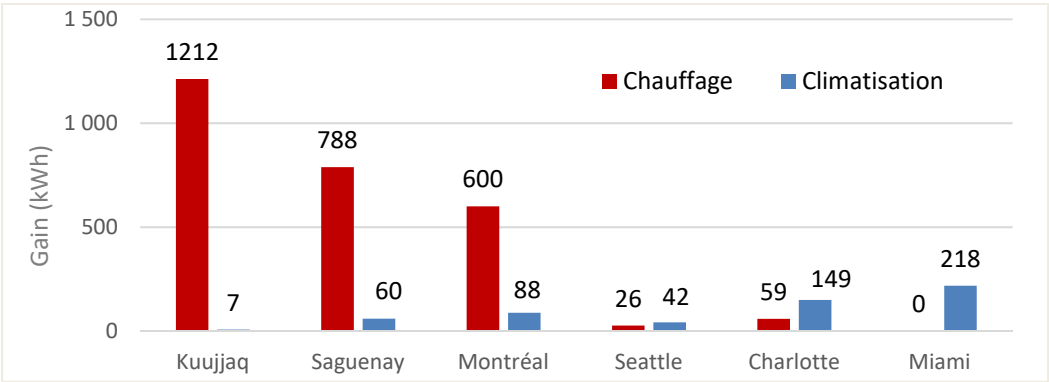


Figure 4.10 Gains de chauffage et climatisation apportés par l'échangeur

CONCLUSION

Un puits canadien ou échangeur air-sol est un système qui permet de diminuer la charge de chauffage/climatisation due à la ventilation bâtiment. Pour cela, l'air prélevé est injecté sous terre où il échange de la chaleur avec le sol, pour ensuite être envoyé dans le bâtiment. Ces systèmes bien que connus depuis de nombreuses années sont rarement utilisés. Notamment en raison de la difficulté à bien approximer les performances pendant le design ainsi qu'en raison du coût de l'ensemble souvent trop élevé pour permettre une rentabilité rapide. Une possibilité pour réduire le coût est d'installer l'échangeur autour des fondations lors de la construction du bâtiment, annulant ainsi les besoins en excavation.

L'objectif de ce travail consistait à étudier le potentiel économique d'une configuration de ce type pour un bâtiment résidentiel individuel.

L'étude se base sur des simulations numériques de l'échangeur air-sol ainsi que du bâtiment et du VRC. Pour bien saisir les interactions entre ces composants tout en gardant un temps de calcul faible, le logiciel TRNSYS fut choisi pour les simulations.

Les résultats de l'étude mettent en avant l'importance des pertes de court-circuitage (entre les murs de fondation et l'échangeur) et de couplage (entre l'échangeur et le VRC) pour ce type de configuration. Une attention particulière aux comportements de ces pertes est donc primordiale pour le dimensionnement. Elles représentaient, pour le cas type, plus de la moitié de la chaleur brute reçue/déchargée par l'échangeur.

Au niveau du dimensionnement plusieurs conclusions furent tirées :

- Le matériau le moins cher pour les tubes apporte le meilleur rendement car la conductivité impacte peu les performances.
- Une configuration avec plusieurs tubes n'est pas à favoriser si la place autour des fondations ne permet pas de les espacer suffisamment les uns des autres.

- Un tube de petit diamètre donne de meilleurs résultats mais une attention particulière aux pertes de charge dans les tubes doit être portée pour ne pas ajouter un ventilateur supplémentaire à l'installation.
- L'échangeur doit être placé le plus profond et le plus loin possible des fondations tant qu'une excavation supplémentaire n'est pas nécessaire.
- La longueur optimale doit être estimée pour chaque configuration et peut varier en fonction des paramètres économiques.

Une étude de sensibilité de la simulation fut également effectuée pour observer l'intervalle de validité des résultats. Elle illustre l'importance de bien fixer les paramètres du bâtiment notamment concernant le système de ventilation et les étages du sous-sol. De grandes variations en fonction des données météo montrent la dépendance des résultats à la zone géographique étudiée, soit ici le Sud du Québec.

Les résultats de l'étude économique simplifiée donnent peu d'espoir quant à la viabilité économique du système. En effet, une période de retour sur investissement de 40 ans est calculée, alors que le coût de certains composants et l'actualisation des coûts sont ignorés. Le système présenté ici bien que moins coûteux qu'un échangeur air-sol traditionnel n'apporte pas d'économies assez importantes pour compenser les coûts d'achat et d'installation. Cette conclusion est fortement impactée par le prix de l'électricité québécoise qui est faible (7 à 8 ¢/kWh). Une étude basée sur une zone géographique avec une électricité plus chère pourrait permettre de statuer définitivement sur la viabilité du système.

RECOMMANDATIONS

Les points suivants peuvent permettre d'étendre ou d'approfondir les résultats obtenus :

- L'étude présente se base uniquement sur des simulations numériques. Compléter ces résultats avec un montage expérimental ou des mesures in-situ pourrait permettre de les valider.
- Effectuer l'étude avec des bâtiments respectant d'autres normes de construction que celles du Canada.
- Baser l'étude sur un climat, sol, code de construction coût d'achat et coût d'installation différents.
- Étudier cette installation dans un pays où le coût de l'électricité est plus élevé.
- Ajouter à la simulation une gestion du gel et de la neige.
- Simuler différentes techniques de dégivrage du VRC et approfondir leurs impacts sur le bâtiment pour mieux saisir les gains qu'apporte l'échangeur en réduisant la fréquence des cycles.
- Effectuer une excavation supplémentaire en même temps que la construction des fondations serait moins cher qu'une excavation classique car les machines nécessaires seraient déjà sur place. Étudier une configuration utilisant ce fait pour augmenter la distance fondation-échangeur ou augmenter la longueur de l'échangeur pourrait être intéressant.

ANNEXE I

ANALYSE DES EFFETS DE COUPLAGE ECHANGEUR/VRC

Dans la partie 3.1.2.1 une étude des effets de couplage VRC/échangeur géothermique est effectuée. Le couplage entraîne pour cette étude préliminaire une perte de 456 kWh pour le bâtiment. Cette perte a été identifiée comme la somme de trois effets : un gain dû à la réduction des cycles de dégivrage, un gain dû à l'augmentation de l'efficacité, et finalement une perte due à l'augmentation de la température de l'air entrant dans le VRC.

Tenter de différencier les différents effets sur le VRC peut être complexe de par leurs interactions. En effet, arrêter un appareil pendant une heure n'entraînera pas la même perte selon sa puissance. Et donc une modification de la fréquence des cycles de dégivrage n'apportera pas le même gain selon si le VRC apporte 4558 kWh ou 4103 kWh annuellement.

Ainsi diminuer le temps le temps passé en cycle de dégivrage de 243 h, apportera un gain de 247 kWh si l'efficacité et la température entrant le VRC sont également modifiées par l'échangeur contre 420 kWh si seul le dégivrage est impacté. De la même manière, la perte due à l'augmentation de la température varie elle entre 828 kWh et 1082 kWh selon les facteurs l'entourant. Le gain lié à l'augmentation d'efficacité restera lui fixe à 145 kWh. Les différents cas possibles sont résumés dans le Tableau-A I-1.

Tableau-A I-1 Effets de couplage en fonction des paramètres impactés par l'échangeur géothermique

Dégivrage	Efficacité VRC	Température entrante	Effets de couplages (kWh)
Impacté	Impacté	Impacté	-456
Non impacté	Impacté	Impacté	-702
Impacté	Non impacté	Impacté	-600
Non impacté	Non impacté	Impacté	-828
Impacté	Impacté	Non impacté	627
Non impacté	Impacté	Non impacté	145
Impacté	Non impacté	Non impacté	420
Non impacté	Non impacté	Non impacté	0

Pour estimer les interactions entre ces facteurs, on tente d'exprimer les effets de couplage sous la forme de l'Équation I-1. Avec a_{11} le coefficient associé au dégivrage, a_{22} le coefficient associé à l'efficacité du VRC, a_{33} le coefficient associé à la température entrante et les coefficients a_{12} , a_{13} , a_{23} et a_{123} pour les interactions entre les effets. Les facteurs e_1 , e_2 et e_3 prenant la valeur 1 si l'effet associé est impacté par l'échangeur ou 0 s'il n'est pas impacté. Pour l'étude préliminaire on trouve les facteurs de la Figure-A I-1 qui permet de retrouver les effets simulés avec l'Équation I-1.

$$E_{coup} = a_{11} * e_1 + a_{22} * e_2 + a_{33} * e_3 + a_{12} * e_1 * e_2 + a_{13} * e_1 * e_3 + a_{23} * e_2 * e_3 + a_{123} * e_1 * e_2 * e_3 \quad (I-1)$$

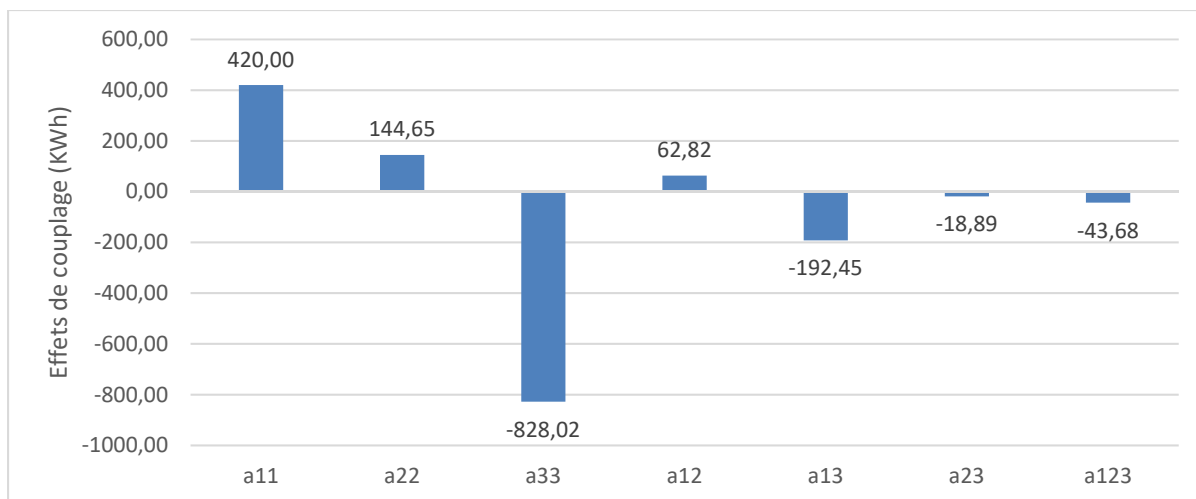


Figure-A I-1 Coefficients régissant les effets de couplage

Ces coefficients concernent uniquement l'étude préliminaire et sont spécifiques au VRC et au cycle de dégivrage simulé. Ils ne permettent pas d'approximer les pertes de couplage dans d'autres cas que celui-ci. Leur but est uniquement de visualiser les interactions dans ce cas précis.

Pour les coefficients a_{11} , a_{22} et a_{33} , on retrouve les gains/pertes calculés pour le cas sans échangeur. Ils représentent les gains/pertes associés à chaque facteur sans interaction de l'échangeur sur les autres. Diminuer de 243 h le temps de dégivrage apport un gain de 420 kWh, l'augmentation d'efficacité un gain de 145 kWh et l'augmentation de la température d'entrée une perte de 828 kWh. Ce qui donne pour l'ensemble des effets une perte de 263 kWh ce qui ne correspond pas à la perte de 456 kWh observés, les effets d'interaction sont donc importants.

Le coefficient a_{12} est positif ce qui implique que l'augmentation d'efficacité du VRC dû à l'échangeur a augmenté l'impact des cycles de dégivrage. C'est en accord avec ce qui est attendu en effet arrêter un appareil très efficace entraîne plus de perte qu'arrêter un appareil peu efficace. Plus l'efficacité est haute plus diminuer les cycles de dégivrage créera des économies importantes.

À l'inverse le facteur a_{13} est lui négatif, car augmenter la température d'entrée diminue les gains du VRC et arrêter un appareil qui apporte peu d'énergie crée une perte plus faible que l'arrêt d'un appareil en apportant beaucoup. Ce facteur travaillera à l'inverse du précédent rendant la réduction du temps passé en dégivrage moins impactant. La valeur absolue de ce facteur est supérieure au précédent ce qui explique que diminuer les cycles de dégivrage apporte moins dans la simulation avec échangeur que dans la simulation sans.

Enfin le facteur a_{23} est négatif ce qui implique que plus l'efficacité du VRC est grande plus augmenter la température de l'air entrant diminuera l'énergie récupérable. Cela est en accord avec les observations de (Hollmuller & Lachal, 2014).

Si on prend l'ensemble de ces facteurs, on retrouve l'effet global du couplage VRC/échangeur géothermique, soit une diminution de l'énergie apportée par le VRC au bâtiment de 456 kWh.

ANNEXE II

ARTICLE (VERSION PRELIMINAIRE)

II.1 Abstract

Although earth-to-air heat exchangers have been known for a while, they are not very common in residential application namely, among other reasons, because of the cost associated with excavation. However, when the heat exchanger is located around the foundations of the building during construction, this cost vanishes. This study provides an economic viability analysis for this particular configuration for a single-family typical house located in Montréal, Canada. Simulations were carried out using TRNSYS. A sizing study concludes that ducts with relatively small diameters (about 8 inches or 20 cm) made of a cheap material are the most suitable and that they should be placed as deep and as far off the foundation as possible. The results show significant losses by thermal short-circuiting and coupling. Only about 60% of the sensible heat exchanged with the soil is used to reduce the load. The optimal heat exchanger reduces the heating/cooling load of the building by 701 kWh/year. This result indicates a unviable return on investment for the selected location despite negligible excavation costs.

II.2 Introduction

Context – An earth-to-air heat exchanger (hereafter EAHE) is an underground pipe network in which air circulates. Because of the phase shift between the soil and air temperature, the air is cooled in summer and heated in winter. This system is used to precondition air before admission in a building and therefore reduces its the heating/cooling load. One of the problems of this technology is the high cost that the installation of the tubes involves. The excavation costs vary depending on the soil type, that is a soil expensive to move can make the system economically unviable (Ascione, Bellia, & Minichiello, 2011).

One way to avoid this problem is to install the EAHE during the building foundations construction. Because the soil is already displaced to build the foundations, the excavation cost is avoided. Nevertheless, the drawback is that the space in which the EAHE can be placed is limited.

Objectives – The purpose of this study is to obtain a first approximation of the economic potential of a configuration of this type. Particularly for the specific case of a single-family residential building located in southern Quebec (Montréal, Canada). For this, it is necessary to estimate the heating / air conditioning load of the home and then the savings that the EAHE brings by reducing this load. These savings are then compared to the material and installation costs. The paper does not dwell on discussing the precautions required to evacuate the condensation that occurs in air conditioning mode when the temperature of the circulating air reaches the dew point in the exchanger.

Content – The paper is divided into 4 sections. After this introduction, the second section presents a short review of the literature in order to show the relevance of using a foundation-based configuration. Next comes a section devoted to the methodology. It provides the reasons leading to the choice of TRNSYS for simulations and details the different parameters that determine the behavior of the simulation and their default assigned values. The results of the simulations are presented in the fourth section. The first part is devoted to the dimensioning of the exchanger which is also used to decide on the viability of the exchanger within the precise framework of Quebec. Then, the second part presents a short sensitivity investigation of the model. The latter aims to understand which parameters strongly impact the simulations and to estimate the limits of the results.

II. 3 Literature review

Thermal characteristics of the ground – The heat rate of a geothermal device depends directly on the temperature difference between the ground and the ambient air. For exchangers close to the ground surface, this difference is governed in particular by the capacity of the

ground to absorb solar radiation and by its thermal inertia. Indeed, although the ground responds to the outside temperature, its response is always out of phase and damped. This will make it cooler than air in summer and warmer in winter. The study and sizing of any geothermal exchanger therefore requires a good knowledge of the evolution of temperature gradients in the soil throughout the year. There are two types of methods commonly used to obtain soil temperature as a function of time and depth, analytical and numerical.

Analytical methods: A first approach consists in finding an equation which makes it possible to easily calculate the temperature. One possibility is to consider the ground as a semi-infinite solid in which only the heat transfer by conduction and according to the Fourier law is considered. These approximations make it possible to calculate a temperature gradient for the soil as a function of the depth. For a given depth, the variation is sinusoidal and depends only on annual variations in the temperature at the surface (Kusuda & Achenbach, 1965). We can represent these variations with equation (1.1) taken from (Carslaw & Jaeger, 1959).

$$T_{sol}(z, t) = T_{surf, moy} - A_{surf} \times e^{-z \left(\frac{\pi}{365\alpha} \right)^{0.5}} \times \cos \left(\frac{2\pi}{365} \times \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{\alpha\pi} \right)^{0.5} \right) \right) \quad (4.1)$$

Where $T_{surf, moy}$ is the annual mean surface temperature (°C); A_{surf} is the amplitude of temperature variations over the year (°C); z is the depth (m); α is the thermal diffusivity of the soil (m²/day); t is the time in number of days from the start of the year; t_0 is the time in day corresponding to the lowest temperature of the year (phase shift of the temperature curve).

Analytical models using a larger number of harmonics of the variation in surface temperature over the year exist. They allow a better understanding of the monthly and daily variations, the one-harmonic model keeping only the seasonal variations. The model with the full spectrum of harmonics can be expressed by equation (1.2) (Xing & Spitler, 2017), adapted for hourly variations.

$$T_{sol}(z, t) = T_{surf, moy} - \sum_{n=1}^{\infty} A_{surf, n} \times e^{-z \left(\frac{n\pi}{365\alpha} \right)^{0.5}} \times \cos \left(\frac{2\pi}{365} \times \left(t - t_{0, n} - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{n\alpha\pi} \right)^{0.5} \right) \right) \quad (4.2)$$

With $t_{0, n}$ the phase shift for the n th harmonic and $A_{surf, n}$ is the amplitude of the temperature variations over the year for the n harmonic.

The main limitation in using these two equations is that the surface temperature is rarely known. This is because weather stations generally only provide data on air temperature. An approximation regularly carried out in the literature consists in estimating it by considering the values of the ambient air (Peretti, Zarrella, De Carli, & Zecchin, 2013). However, this does not take into account the differences in land cover as well as the effects of water runoff. An additional study of the field data may thus be necessary to refine the results obtained. This method however remains widely used in the literature.

To illustrate equation (1.1) with the example of Montreal, we must study the weather data which gives an amplitude of 15.6 ° C and an average temperature of 7.6 ° C for the air (Climat, 2019) . A soil with a thermal diffusivity of 0.0557 m² / day corresponding to a dense and humid soil (see 1.1.2) is considered. The approximate results are visible in Figure 1.1

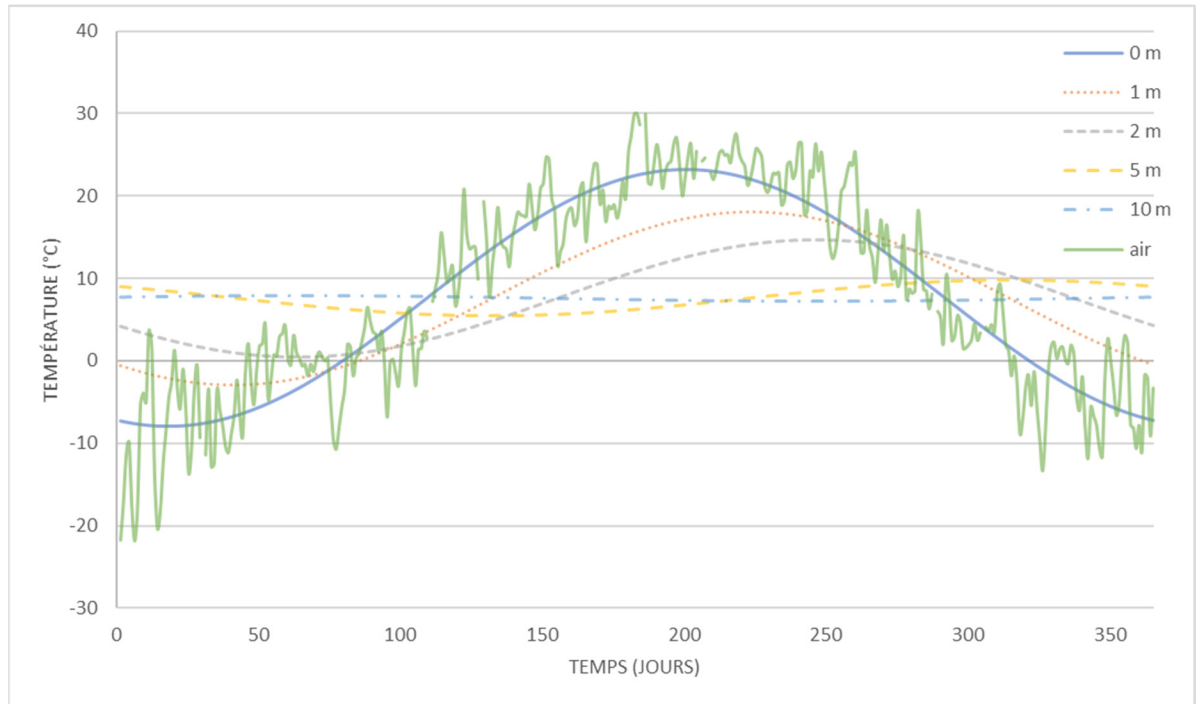


Figure 4.11 Change in soil temperature over the year at different depths
(calculated with equation 1.1)

(Khatry, Sodha, & Malik, 1978) proposed a model based on assumptions similar to the previous ones, but considering the inflow at the ground surface. However, the resulting governing equation depends on parameters from the surface temperature data and becomes de facto complex, which limits its application. (Xing & Spitler, 2017).

To achieve greater precision, it may be necessary to account for the type of surface coverage (vegetation, bare soil, concrete, etc.). (Mihalakakou, Santamouris, Lewis, & Asimakopoulos, 1997) apply energy balances to the soil surface to obtain the average temperature and the magnitude of the surface temperature variations. The values are thus adapted to the coverage.

Numerical methods: Another potentially more accurate method of calculating soil temperature is through a digital soil analysis. The physical domain is then transformed into a finite discrete mesh network for which the conservation equations are applied. Solar radiation and convection with air are generally considered as input energy in the calculation domain. Outputs of energy

are then radiation emitted from the soil and latent heat of evaporation. Depending on the required precision, other effects can be considered such as frost, snow cover, etc. Numerical methods are demanding in terms computing power therefore rarely used to calculate the temperature of undisturbed soil. Their use is justified when complex or unique problems for which detailed information is required.

For the case of the influence of a building, (Mihalakakou, Santamouris, Asimakopoulos, & Argiriou, 1995) present a numerical model making it possible to calculate the temperature of the ground in this configuration. The model applies the three-dimensional heat transfer equation to each control volume. The model, then developed in the TRNSYS software, is compared to experimental data measured in the soil under the building of the Faculty of Philosophy at Ioannina University. The model predicts the temperature under the building with an error that rarely exceeds 0.3 °C.

(Xing, Li, Nan, & Hu, 2017) compared the use of a numerical model as well as that of an analytical two-harmonic model based on equation (1.2). Their conclusion is that given the computational complexity of the numerical model, the use of the analytical model better meets the requirements of design applications.

Thermal diffusivity, conductivity and specific heat: The thermal diffusivity, the conductivity and the specific heat of the soil strongly influence its thermal behavior. The complexity related to their evaluation is that they depend on several parameters. Measuring the temperature distribution and performing a thermal response test on site is the best way to obtain reliable values. However, as this is not possible here, the present study will rely on data from (Giardina, 1995) for soil. They are summarized in Table 1.1. For backfill materials the data are taken from (Dalla Santa et al., 2017; Hamdhan & Clarke, 2010).

Table 4 Density, conductivity, thermal diffusivity and specific heat of soil,
adapted from (Giardina, 1995)

Soil	Density (kg/m ³)	Conductivity (W/(m.K))	Diffusivity (m ² /day)	Specific heat (J/(kg.K))
Dense and saturated	3200	2,42	0,078	837
Dense and humid	2096	1,3	0,0557	963
Dense and dry	2000	0,865	0,0446	837
Light and humid	1600	0,865	0,0446	1047
Light and dry	1400	0,865	0,024	837

The value of the thermal diffusivity depends on the humidity percentage. This can be problematic, because it is then not uniform in the soil and its distribution can be influenced by a heat gradient. Particular attention to mass transfers in the soil is therefore necessary when these variations are accounted for.

Earth-air heat exchangers (EAHE) – This section presents a brief review of these devices as the The full range of geothermal air exchanger applications can be found in (Agrawal, Misra, Agrawal, Bhardwaj, & Jamuwa, 2019). The principle of this exchanger is quite simple. Air is admitted at outdoor ambient temperature to be sent underground in tubes. The air is gradually heated or cooled, depending on the season, by heat exchange with the ground. It is then exhausted in a building either directly or through a Heat Recovery Ventilator (HRV), a solar chimney, a heat pump or any other passive or active equipment (Agrawal et al., 2019). In addition to the underground pipes, a bypass system is needed to disconnect the system in the event that the effect of the ground is a constraint on the air conditioning. (Flaga-Maryanczyk, Schnotale, Radon, & Was, 2014) observed the case where an air exchanger cools the ambient air on certain winter days. This bypass system also allows the ground to recover from the influence of the exchanger. The soil can thus return to its unaffected temperature during periods of non-use. When the exchanger is used without interruption, therefore without the possibility of recovery, performance can be affected. (Bansal, Misra, Agarwal, & Mathur, 2013); (Niu, Yu, Yu, & Li, 2015b). In residential applications, horizontal EAHE can be configured along four classical lay-outs: straight duct; serpentine in series; serpentine in parallel; and foundation-based. The latter case is the subject matter of this paper.

Foundation-based earth-air heat exchangers – Several studies on EAHE installed close to foundations have been carried-out. (Pfafferoth, 2003) evaluated the performance of three EAHE installed in different buildings in Germany: one installed below the foundation slab and the other two around it. These systems provide an annual gain between 28 and 75 kWh per m² of ducts surface with the total surfaces of the ducts ranging from 1650 m² to 198 m². (Taurines, Girous-Julien, & Menezo, 2019) investigated the behavior of an EAHE placed within (inside) the foundation footing of a health center. The system is based on a French technology called Fondatherm®. Gains of 8.9 kWh per day in heating and of 3 kWh per day in cooling are observed for a surface total of 80 m². (Chien-Yeh et al.) studied an EAHE placed inside the foundation of a three-story building. The particularity of this system is that the ducts are immersed in water instead of being buried. A return on investment (ROI) period of 4 years is found.

These three studies demonstrate that a foundation-based EAHE can provide non-negligible energy gains, but they all relate to a fairly large facility and do not quite correspond to the present case where the building will be much smaller. (Spitler et al., 2010) considered a heat exchanger around the foundation of a one-family house but for a ground-source heat pump. In this case, the ducts have smaller diameter and are filled with water instead of air. (Quevillon, 2017) simulated four different configurations of EAHE in one of them the ducts are positioned around the house foundations. The present article is a more detailed study of that specific case.

II. 4 Methodology

TRNSYS – Using a commercial CFD software has been considered for the simulation of the heat exchanger. This option was rejected because calculation times were found too important to pursue a sizing study. Instead, the acknowledged numerical model developed by (Hollmuller & Lachal, 2005) was used. With this model, simulations are much faster with similar results for the purpose of this investigation. Moreover, because it is working in the TRNSYS environment, it is easier to connect the EAHE with the simulation of the building and the Heat Recovery ventilation (HRV) unit.

House heating and cooling loads – To assess the system's economic benefit, the house's annual heating and cooling loads have been simulated with and without the EAHE. The two loads were then compared to estimate how much energy the EAHE bring. The investigated building is a typical single-family house completely isolated from other buildings and the EAHE is installed during the building construction. It is simulated with type 56 of TRNSYS. The parameters used are extracted from the Canadian national building code (CNRC, 2015) and the national energy code of Canada for buildings (CNRC, 2017). For the dimension, the house has a floor area of 67 m², a heated area of 201 m². The thermal resistances used for the envelope are reported in Table Tableau 2.1 and an illustration of the house is shown in Fig Figure 2.1. Four zones are used in the simulation representing: the ground floor, the first floor, the attic and the basement, respectively. The house is 8 m high from the ground and goes 2.5 m underground.

The air exchanges between the house and the exterior are governed by infiltration and ventilation. For ventilation, equation (2.1) drawn from (ASHRAE, 2019) is used to determine the total flow rate needed. For 200 m² and 4 bedrooms, equation (2.1) gives a ventilation flow rate of 47.65 L/s or 171 m³/h. The incoming air temperature and humidity are determined by the EAHE and the HRV.

Electrical heaters were chosen to control the temperature inside the house because it is the most common type of heater in Canada (Ressource naturelles Canada, 2017). For the cooling part, a system with a COP of 3.5 was chosen in accordance the data collected by (Ressource naturelles Canada, 2017). The temperature inside the basement is maintained above 15 °C all year long. Whereas in the rest of the house, the temperature is maintained between 20 °C and 25 °C from September to March and between 15 °C and 22 °C from April to August. Heat gains from lights, computers and inhabitants are considered.

Heat Recovery Ventilator (HRV) – The Canadian building code imposes the installation of HRV in new houses (CNRC, 2015). Having an HRV is thus mandatory in the present case.

The HRV is connected in series with the EAHE: the air goes through the EAHE, then in the HRV, and finally is injected inside the house. For this simulation type 760 of TRNSYS is used.

The parameters are extracted from the specification sheet of the 65H model by VänEE® (VänEE, 2011). The sensible efficiency of the unit varies from 0.82 for an air temperature of 0 °C to 0.63 for when air temperature is -25 °C. Between these two values, the efficiency is considered to vary linearly and outside of this range to remain constant.

The HRV is stopped during summer and when the temperature outside the building is higher than 20 °C. The HRV operation is also changed when the temperature of the incoming air is too low and that a defrost cycle is required. For the 65H model during a defrost cycle, the supply fan is shut off while the exhaust fan still operates. This model performs three different cycles for temperatures below -5 °C, -15 °C and -27 °C. These temperatures correspond to a fan shutdown on the cold side of 10, 14 and 20 minutes, respectively. After the defrost cycle, the HRV works with higher flow rates to compensate for the shutdown.

The heating/cooling load of the house is simulated using these parameters in conjunction with a CWEC file from a weather station located in Montreal, Canada.

A annual heating and cooling loads of 16,298 kWh and 793 kWh are calculated. For a one-family house built after 2016 in Quebec, the statistics show an average heating load of 16,743 kWh for a 201 m² surface area (Ressource naturelles Canada, 2017). The cooling load data are not available for a specific vintage but for a single-family house in Quebec the average is 704 kWh for a 201 m² surface (Ressource naturelles Canada, 2017). These values were found closer to the predictions than expected given the range of possible values for some parameters.

Simulation of the EAHE: Soil, ducts and controls – Simulations of the EAHE are done using the model developed by (Hollmuller & Lachal, 2005) which is present in the TRNSYS environment as type 460. The model simulates the ducts, the air, the soil and the interactions between the soil and the environments around.

Most of the space around and beneath the house is filled with undisturbed soil only a 0.9 m wide trench around the basement is filled with backfill materials (1 m of sand and 1,5 m of gravel). The thermal values for the soil and backfill materials are reported in Table Tableau 2.4.

One thing to note is that in type 460, thermal conductivities and the surface's resistances are constant in time. This excludes the occurrence of several phenomena like frost inside the soil or snow covers. Because type 460 cannot simulate complex geometries the soil underneath the house is simulated using type 1244. This mean type 460 is interacting with 3 other TRNSYS type: 1244, 56 (building) and 15 (weather data).

The literature indicates that the duct material does not really impact the EAHE performance (Abbaspour-Fard, Gholami, & Khojastehpour, 2011; Ascione et al., 2011; Bansal et al., 2010). A sensibility study with three different materials (PVC, HDPE and steel) shows that this affirmation still holds here. For economic reasons ducts in HDPE are selected. The corresponding thermal proprieties are extracted from (Plastics Pipe Institute, 2008): a conductivity of 0.389 W/K.m and a specific heat of 1900 J/kg.K are used.

There is some time during the years where the EAHE works against the house's heating/cooling equipment: (Flaga-Maryanczyk et al., 2014) showed that an EAHE was cooling air during some winter days. To avoid those situations a simple by-pass control is added to the simulation. This control uses the soil temperature around the end of the ducts and the ambient air temperature to estimate if the EAHE will cool or heat the air. Then, by comparing the ambient temperature with the temperature inside the building, the simulation decides if air should be injected in the EAHE or not before entering the house. Nevertheless, this very simple command does not work perfectly: there are still a few hours during the yearly simulation where the EAHE works against the house equipment, particularly when the air temperature is close to the building temperature.

Economic parameters – For the proposed basic economic study, inflation updated values extracted from two theses are used (Desmeules, 2017; Quevillon, 2017). The duct unit prices depend on the diameter, they are summarised in Table Tableau 3.1. The installation cost is established at 10.43 Can\$/m (Quevillon, 2017) and the purchase of the air inlet at 521.15 Can\$. No excavation, fittings, by-pass system, controls and maintenance costs are considered. In a standard configuration, an auxiliary fan is necessary to compensate the pressure losses. Using the performance curve of the HRV (VänEE, 2011) the pressure losses correspond to flow rate losses of less than 5 m³/h when the ducts diameters are larger than 0.25 m, an auxiliary fan will therefore no be considered above this threshold.

To calculate the gains associated with the EAHE a rate for electricity of 8 ¢/kWh is used. It corresponds to the average rate in Quebec, Canada for a monthly electrical consumption of 2000 kWh (Urban, 2020).

II. 4 Results and discussion

Sizing – A sizing study was carried-out on the system for two reasons. First, to find the configuration that enables the best results for this specific building, this configuration is then used for the economic study. Second, to highlight some design rules that show up in the results, although this study is not complex enough to generalize them to different buildings.

As previously stated in the review, the duct material does not have a significant influence on the performance. With a thermal conductivity 300 times higher than that of PVC, steel improves the performance of the system by only 2.8%.

Simulations done with different diameters only show small variations. Between a 0.25 m diameter and a 0.5 m the gain changes by only 16 kWh over the year which correspond to a 2.3% improvement. Hence, the smaller seems to be the better. But but the smaller the diameter, the bigger the pressure losses. The choice for the appropriate diameter is then based on the

smallest diameter possible that prevent having to compensate the pressures losses with an auxiliary fan.

The literature indicates that the deeper the EAHE is buried the more performant it is (Ascione et al., 2011; Bordoloi, Sharma, Nautiyal, & Goel, 2018; Mihalakakou et al., 1994b). Results indicated the same tendency here. Between 1.5 m and 2.5 m, the gains increase by 300 kWh which corresponds to a 78% improvement. For a foundation-based EAHE, the size of the basement limits the depth at which the EAHE can be placed. In the present case, to install it deeper than 2.5 m would require an excavation, so it is the depth chosen.

As the ducts are closer to the basement wall, more heat will be exchanged between the two, decreasing the performance. For EAHE, this thermal short-circuiting effect has been highlighted in (Hollmuller & Lachal, 2014). Results indicate here that a distance increase of 0.5 m improves the gains by 14.4%. To find the optimal configuration, the distance between the two needs to be maximum. But because an excavation needs to be avoided, the space to place the ducts is limited. As for the depth the value to choose for the distance is the highest possible within the trench dug during the house construction.

The EAHE length is also limited by the space available. With the building studied here, the maximal length possible is 37.3 m. But it is not the optimal length, indeed the longer the EAHE is the more expensive it becomes. To find the optimum, the simple payback period is calculated for different lengths and an EAHE of 31 m provides the best result. Care must be taken here as this optimal length depends upon the investigated building and the economical parameters. The electricity costs will only scale the results thus not changing the optimal length, while the price of ducts and their installation will. One thing worth noticing is that because the electrical cost is a scaling factor of the payback period denominator, the higher the rate the less important the difference between lengths will be. With a rate of 8 ¢/kWh, the payback difference between the optimal length and the maximal length is 1.34 years and with a rate 80 ¢/kWh it would fall to 0.134 year.

To summarise the results of the sizing study: for this house, the optimal configuration is a 31 m long EAHE located 2.5 m deep, 0.65 m from the basement wall and composed of HPED ducts with a 0.25 m diameter.

System viability – A detailed study of the configuration found in the sizing study is done. The house cooling/heating load is simulated with the EAHE around the foundation and a value of 16,390 kWh is found. Comparing this load with the one simulated without EAHE a gain of 701 kWh is estimated. Which corresponds, with the economical parameters chosen, to a gain of 56.1 Can\$/years for purchase and installation cost of 2234 Can\$. The payback period is thus around 40 years which is too high for the system to be viable. This first approximation does not show a great potential for this system. The system provides a gain too low compared to the initial investment, even when a part of the initial cost was put aside.

One of the reasons for this low gain is the importance of two kinds of losses: coupling losses and short-circuiting losses. The coupling losses appeared when the EAHE and the HRV work in series. Indeed, the EAHE will reduce the among of heat recovered by the unit because it decreases the temperature different between the fresh air entering the house via the HRV and the exhaust air. The higher the HRV efficiency is the more important those coupling losses are (Hollmuller & Lachal, 2014). On the other hand, the EAHE also improve the HRV performances by decreasing the duration of defrost cycle (272 h of defrosting without EAHE versus 46 h with EAHE) and improving the unit efficiency. The results indicate that the diminution of the temperature different has a higher impact that those two phenomena, the coupling has an overall negative impact on the HRV performances.

The short-circuiting losses, as previously stated, occur when the EAHE and the building are too close. Heat is exchanged between the two improving the among heat received/discharged by the air inside the EAHE but because of the coupling issues presented above a part of it will be lost. Both those phenomena are detailed in (Hollmuller & Lachal, 2014).

In the optimal configuration, the heat received/discharged by the EAHE during a year is 1082 kWh. This does not correspond to the heating/cooling load reduction because, among others, of the coupling and short-circuiting losses. With additional simulation it was identified that the HRV provide a gain of 4558 kWh without the coupling and 4294 kWh when the HRV is coupled with the EAHE. These simulations approximate the coupling losses at 264 kWh. It was also calculated that the presence of the EAHE around the foundation increased the basement load by 173 kWh. Which means that out of the 1082 kWh received/discharged by the EAHE: 173 kWh are used to compensate the increased heating/cooling load of the basement, 264 kWh are lost in the coupling EAHE/HRV and 701 kWh are truly used to decrease the load of the house which represents only around 60% of the heat received/discharged by the EAHE. The 45-kWh difference between the sum of these three values and the total heat received/discharged by the EAHE could be caused by losses not taken into account or approximations in the calculations.

Another reason for this high payback period is that the Quebec electricity tariff is among the lowest in Canada. The EAHE would be more profitable in a region where electricity or other means of heating/cooling are more expensive. If everything else stay constant, a rate of 16 ¢/kWh is necessary for the payback period to be inferior to 20 years. But this study uses building, weather and economical values derived from the region of Quebec therefore its results cannot be applied at face value to other regions.

II. 5 Conclusions

Objective and scope – The objective of this work was to investigate the economic potential of a foundation-based earth-to-air heat exchanger (EAHE) configuration for an individual residential building located in Canada, thus eliminating the need to account for the excavation costs. The study is based on numerical simulations of the air-ground heat exchanger as well as the building and the HRV. To fully understand the interactions between these components while keeping a low computation time, the TRNSYS software was chosen for the simulations. TRNSYS was chosen for the simulations of the building, the heat recovery ventilator (HRV)

and EAHE to shed some light on the interactions between these components while keeping a low computation time.

Results – The results of the study highlight the magnitude of short-circuiting (between the foundation walls and the exchanger) and coupling losses (between the exchanger and the HRV) for this type of configuration. Particular attention to the behavior of these losses is therefore essential for sizing. These losses represented, for the typical case, more than half of the gross heat received / discharged by the exchanger.

More specifically, the following points can be mentioned:

- The duct material (conductivity) has a low impact on performances;
- The EAHE should be located as deep and as far away from the basement possible, as long as an extra excavation is not required;
- Smaller tube diameters seem to induce a better economic potential, but a attention should be put on the pressure losses created by the EAHE. The smallest diameter should be selected without the need for an extra ventilator due to increasing pressure drops;
- When the EAHE is close to the basement's walls short-circuiting losses will appear. When the EAHE is coupled with an HRV coupling losses will appear. In systems like the one study here both those losses are important, and their behaviours need to be taken into account for the sizing.
- Given that a 40-year payback period was calculated while some costs were neglected, the study does not show a great potential for the system in Southern Quebec, Canada.

Recommendations – The following points could be include in a further study on the subject.

- This study is solely based upon numerical simulations: experimental measurements in a lab or in a full scale facility could validate the results;
- The simulations could be performed for other weather, building and economic parameters valid far a geographical region with a higher costs for heating/cooling;
- The effects of frost and snow could be investigated;

- The HRV defrost cycles could be investigated more thoroughly. This would allow for a better understanding of how much energy the EAHE provides with lower defrost frequency.
- Investigating the extra excavation during the building construction should be investigated. As the excavation equipment is already on site during the foundation construction, extra work to increase the distance, depth and length of the exchanger could be cheaper than a standard excavation.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Abbaspour-Fard, M. H., Gholami, A., & Khojastehpour, M. (2011). Evaluation of an earth-to-air heat exchanger for the north-east of Iran with semi-arid climate. *International Journal of Green Energy*, 8(4), 499-510.
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. (2012). *Les Fiches Techniques de l'ADEME : Puits climatiques*. Repéré à <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/puits-climatiques-2012.pdf>.
- Agrawal, K. K., Misra, R., Agrawal, G. D., Bhardwaj, M., & Jamuwa, D. K. (2019). The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system. *Geothermics*, 82, 34-50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.05.011>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650519300045>
- Al-Ajmi, F., Loveday, D. L., & Hanby, V. I. (2006). The cooling potential of earth–air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate. *Building and Environment*, 41(3), 235-244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.027>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132305000405>
- Alkaff, S. A., Sim, S. C., & Ervina Efzan, M. N. (2016). A review of underground building towards thermal energy efficiency and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 692-713. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.085>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115014689>
- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2019). *Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings*. Atlanta.
- Ascione, F., Bellia, L., & Minichiello, F. (2011). Earth-to-air heat exchangers for Italian climates. *Renewable Energy*, 36(8), 2177-2188. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.013>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148111000358>
- Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec. (2015). *L'utilisation d'un VRC*. Anjou.
- Bahadori, M. N. (1978). Passive Cooling Systems in Iranian Architecture. *Scientific American*, 238(2), 144-155. Repéré à <http://www.jstor.org/stable/24955643>
- Bansal, V., Misra, R., Agarwal, G. D., & Mathur, J. (2013). 'Derating Factor' new concept for evaluating thermal performance of earth air tunnel heat exchanger: A transient CFD analysis. *Applied Energy*, 102, 418-426. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenerg>

y.2012.07.027. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912005491>

Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G. D., & Mathur, J. (2009). Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for winter heating. *Energy and Buildings*, 41(11), 1151-1154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.010>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809001200>

Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G. D., & Mathur, J. (2010). Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for summer cooling. *Energy and Buildings*, 42(5), 645-648. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.001>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809002850>

Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G. D., & Mathur, J. (2012). Performance evaluation and economic analysis of integrated earth–air–tunnel heat exchanger–evaporative cooling system. *Energy and Buildings*, 55, 102-108. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.047>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812004744>

Bisoniya, T. S., Kumar, A., & Baredar, P. (2014). Study on Calculation Models of Earth-Air Heat Exchanger Systems. *Journal of Energy*, 2014, 15. doi: 10.1155/2014/859286. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1155/2014/859286>

Bordoloi, N., Sharma, A., Nautiyal, H., & Goel, V. (2018). An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 261-280. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.056>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118301424>

Brum, R. d. S., Vaz, J., Rocha, L. A. O., dos Santos, E. D., & Isoldi, L. A. (2013). A new computational modeling to predict the behavior of Earth-Air Heat Exchangers. *Energy and Buildings*, 64, 395-402. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.032>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813003186>

Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétiques. (2014). *Exigences techniques volets «Maison» et Petit bâtiment multilogement*. Quebec: Gouvernement du Quebec. Repéré à https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/novo2/exigences_novoclimat2_maison-PBM.pdf

Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids*. Oxford: Clarendon Press, 1959, 2nd ed.

Climat. (2019). Climat Rapport de données mensuelles. Repéré à <http://climat.meteo.gc.ca>

Conseil national de recherche du Canada. (2015). *Code national du bâtiment*. Ottawa.

- Conseil national de recherche du Canada. (2017). *Code national de l'énergie pour les bâtiments – Canada*. Ottawa.
- Dalla Santa, G., Peron, F., Galgaro, A., Cultrera, M., Bertermann, D., Mueller, J., & Bernardi, A. (2017). Laboratory measurements of gravel thermal conductivity: An update methodological approach. *Energy Procedia*, 125, 671-677.
- Darby, R. (2001). Correlate Pressure Drops Through Fittings. *Chemical Engineering*, 108, 127-130.
- Desmeules, S. (2017). *Conception d'un système géothermique horizontal pour le traitement de l'air destiné aux bâtiments agricoles* (École de technologie supérieure).
- Environnement Canada. (2016). *Engineering Climate Datasets*. Repéré à https://climate.weather.gc.ca/prods_servs/engineering_e.html
- Estrada, E., Labat, M., Lorente, S., & Rocha, L. A. O. (2018). The impact of latent heat exchanges on the design of earth air heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 129, 306-317. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.007>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117320252>
- Eurostat. (2020). Electricity price statistics. Repéré à https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics#Electricity_prices_for_household_consumers
- Flaga-Maryanczyk, A., Schnotale, J., Radon, J., & Was, K. (2014). Experimental measurements and CFD simulation of a ground source heat exchanger operating at a cold climate for a passive house ventilation system. *Energy and Buildings*, 68, 562-570. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.008>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813005719>
- Gao, J., Li, A., Xu, X., Gang, W., & Yan, T. (2018). Ground heat exchangers: Applications, technology integration and potentials for zero energy buildings. *Renewable Energy*, 128, 337-349. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.089>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118306141>
- Giardina, J. J. (1995). Evaluation of ground coupled heat pumps for the state of wisconsin.
- Hamada, Y., Nakamura, M., Saitoh, H., Kubota, H., & Ochifuji, K. (2007). Improved underground heat exchanger by using no-dig method for space heating and cooling. *Renewable Energy*, 32(3), 480-495. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.01.020>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148106000577>
- Hamdhan, I. N., & Clarke, B. G. (2010). Determination of thermal conductivity of coarse and fine sand soils. Dans *Proceedings of World Geothermal Congress* (pp. 1-7).

- Hollmuller, P. (2002). *Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments: mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique* (University of Geneva).
- Hollmuller, P. (2003). Analytical characterisation of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(22), 4303-4317. doi: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00199-6](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00199-6). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931003001996>
- Hollmuller, P., & Lachal, B. (2001). Cooling and preheating with buried pipe systems: monitoring, simulation and economic aspects. *Energy and Buildings*, 33(5), 509-518. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00105-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00105-5). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778800001055>
- Hollmuller, P., & Lachal, B. (2014). Air–soil heat exchangers for heating and cooling of buildings: Design guidelines, potentials and constraints, system integration and global energy balance. *Applied Energy*, 119, 476-487. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.042>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914000610>
- Hollmuller, P., & Lachal, B. M. (1998). *TRNSYS compatible moist air hypocaust model*. Repéré à <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:22536>
- Hollmuller, P., & Lachal, B. M. (2005). Buried pipe systems with sensible and latent heat exchanges: validation of numerical simulation against analytical solution and long-term monitoring.
- Hsu, C.-Y., Chiang, Y.-C., Chien, Z.-J., & Chen, S.-L. (2018). Investigation on performance of building-integrated earth-air heat exchanger. *Energy and Buildings*, 169, 444-452. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.070>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817341865>
- Inflation.eu. (2020). Inflation historique Canada - Inflation IPC. Repéré à <https://fr.inflation.eu/taux-de-inflation/canada/inflation-historique/ipc-inflation-canada.aspx>
- INSPQ. (2006). *LA VENTILATION DES BÂTIMENTS D'HABITATION : IMPACTS SUR LA SANTÉ RESPIRATOIRE DES OCCUPANTS*. Repéré à <https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/490-VentilationBatimentsHabitation.pdf>.
- Kayaci, N., Demir, H., Kanbur, B. B., Atayilmaz, Ş. O., Agra, O., Acet, R. C., & Gemici, Z. (2019). Experimental and numerical investigation of ground heat exchangers in the building foundation. *Energy Conversion and Management*, 188, 162-176. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.032>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419303231>

- Khatry, A. K., Sodha, M. S., & Malik, M. A. S. (1978). Periodic variation of ground temperature with depth. *Solar Energy*, 20(5), 425-427. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90161-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90161-5). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X78901615>
- Kök, M., Demirelli, K., & Aydogdu, Y. (2008). Thermophysical Properties Of Blend Of Poly (Vinyl Chloride) With Poly (Isobornyl Acrylate). *Int. J. Sci. Technol.*, 3.
- Kumar, R., Kaushik, S. C., & Garg, S. N. (2006). Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network. *Renewable Energy*, 31(8), 1139-1155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.06.007>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148105001709>
- Kumar, R., Ramesh, S., & Kaushik, S. C. (2003). Performance evaluation and energy conservation potential of earth-air-tunnel system coupled with non-air-conditioned building. *Building and Environment*, 38(6), 807-813. doi:[https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00024-6). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132303000246>
- Kumar, R., Sinha, A. R., Singh, B. K., & Modhukalya, U. (2008). A design optimization tool of earth-to-air heat exchanger using a genetic algorithm. *Renewable Energy*, 33(10), 2282-2288. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.01.006>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148108000281>
- Kusuda, T., & Achenbach, P. R. (1965). *Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States*. National Bureau of Standards Gaithersburg MD.
- Law, B., & Williams, M. (2016). *Accounting for Infiltration in Savings by Design Energy Models*. Sustainable Building Canada. Repéré à <https://sbcanada.org/wp-content/uploads/2017/04/Air-tightness-Energy-Modelling-for-Part-3-Buildings.pdf>
- Lee, K. H., & Strand, R. (2006). *Implementation of an earth tube system into energy plus program* (Vol. 40).
- Lee, K. H., & Strand, R. K. (2008). The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. *Energy and Buildings*, 40(4), 486-494. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbui.2007.04.003>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807001314>
- Loyau, F. (2005). Puits canadien: Les précautions sanitaires. Repéré à <https://www.fiabitat.com/les-precautions-sanitaires/>

- MatWeb. (2020). AISI 1010 Steel, cold drawn. Repéré à <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=025d4a04c2c640c9b0eaaef28318d761&n=1>
- Mihalakakou, G. (2003). On the heating potential of a single buried pipe using deterministic and intelligent techniques. *Renewable Energy*, 28(6), 917-927. doi:[https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00183-0](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00183-0). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148102001830>
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1994a). Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers. *Solar Energy*, 53(3), 301-305. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)90,636-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90,636-X). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9490636X>
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1994b). On the cooling potential of earth to air heat exchangers. *Energy Conversion and Management*, 35(5), 395-402. doi:[https://doi.org/10.1016/0196-8904\(94\)90098-1](https://doi.org/10.1016/0196-8904(94)90098-1). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0196890494900981>
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., & Argiriou, A. (1995). On the ground temperature below buildings. *Solar Energy*, 55(5), 355-362. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00060-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(95)00060-5). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X95000605>
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., Lewis, J. O., & Asimakopoulos, D. N. (1997). On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. *Solar Energy*, 60(3), 181-190. doi: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00012-1). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X97000121>
- Niu, F., Yu, Y., Yu, D., & Li, H. (2015a). Heat and mass transfer performance analysis and cooling capacity prediction of earth to air heat exchanger. *Applied Energy*, 137, 211-221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.008>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914010484>
- Niu, F., Yu, Y., Yu, D., & Li, H. (2015b). Investigation on soil thermal saturation and recovery of an earth to air heat exchanger under different operation strategies. *Applied Thermal Engineering*, 77, 90-100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.069>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111401103X>
- Peretti, C., Zarrella, A., De Carli, M., & Zecchin, R. (2013). The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE). A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 107-116. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.057>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113005029>

- Pfafferott, J. (2003). Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency. *Energy and Buildings*, 35(10), 971-983. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00055-0). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778803000550>
- Phillips, E. G., Bradley, L. C., Chant, R. E., & Fisher, D. R. (1989). *Comparison of freezing control strategies for residential air-to-air heat recovery ventilators*. ; None.
- Plastics Pipe Institute. (2008). Chapter 3 Material Properties. Dans *Handbook of Polyethylene Pipe ---- 2nd Edition*. Repéré à <https://plasticpipe.org/pdf/chapter03.pdf>
- Quevillon, O. (2017). *Étude de l'efficacité de l'utilisation d'un puits canadien pour augmenter la performance d'une thermopompe à air* (École de technologie supérieure).
- Ramírez-Dávila, L., Xamán, J., Arce, J., Álvarez, G., & Hernández-Pérez, I. (2014). Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates. *Energy and Buildings*, 76, 238-248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.073>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814002096>
- Ressource naturelles Canada. (2017). *Statistiques de la consommation d'énergie*. Repéré à http://oee.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/menus/trends/comprehensive/trends_res_qc.cfm
- Soulaïmani, A. (2018). SYS807 : Mécanique des fluides avancée. École de technologie supérieure.
- Spitler, J., Xing, L., Cullin, J., Fisher, D., Shonder, J., & Im, P. (2010). *Residential Ground Source Heat Pump Systems Utilizing Foundation Heat Exchangers*.
- Taurines, K., Girous-Julien, S., & Menezo, C. (2019). Energy and thermal analysis of an innovative earth-to-air heat exchanger: Experimental investigations. *Energy and Buildings*, 187, 1-15.
- Thermal Energy Systems Specialists. (2012). HVAC Library Mathematical Reference (pp. 151). Madison.
- Thiers, S., & Peuportier, B. (2008). Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in France. *Solar Energy*, 82(9), 820-831. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.014>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X08000467>
- ToolBox, E. (2003). Roughness & Surface Coefficients. Repéré à https://www.engineeringtoolbox.com/surface-roughness-ventilation-ducts-d_209.html

- Tzaferis, A., Liparakis, D., Santamouris, M., & Argiriou, A. (1992). Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, 18(1), 35-43. doi: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90,049-M](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90,049-M). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037877889290049M>
- University of Wisconsin--Madison. Solar Energy, L. (1975). *TRNSYS, a transient simulation program*. Madison, Wis. : The Laboratory, 1975. Repéré à <https://search.library.wisc.edu/catalog/999,800,551,102,121>
- Urban, R. (2020). *Electricity Prices in Canada 2020*. energyhub.org. Repéré à <https://energyhub.org/wp-content/uploads/Electricity-Prices-in-Canada-2020.pdf>
- VänEE. (2011). *Specification Sheet*. Drummondville. Repéré à http://www.vanee.ca/DATA/DOCUMENT/180_en~v~technical-sheet-65h-hrv.pdf
- VänEE. (2018). *User and installer manual*. Drummondville. Repéré à http://www.vanee.ca/DATA/DOCUMENT/184_en~v~guide-d-utilisation-65h-hrv-65e-erv.pdf
- Vaz, J., Sattler, M. A., dos Santos, E. D., & Isoldi, L. A. (2011). Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger. *Energy and Buildings*, 43(9), 2476-2482. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.003>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811002519>
- Vidhi, R. (2014). *Organic Fluids and Passive Cooling in a Supercritical Rankine Cycle for Power Generation from Low Grade Heat Sources* (Ph.D., University of South Florida, Ann Arbor). Repéré à ProQuest Dissertations & Theses Global. (3631052). Repéré à <https://pdfs.semanticscholar.org/4f1d/8ba234233081690bd0342c8b3a9ef2f0bc73.pdf>
- Xing, L., Li, L., Nan, C., & Hu, P. (2017). The Effects of Different Land Covers on Foundation Heat Exchangers Design in Chinese Rural Areas. *Procedia Engineering*, 205, 2449-2456. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.972>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817345319>
- Xing, L., & Spitler, J. D. (2017). Prediction of undisturbed ground temperature using analytical and numerical modeling. Part I: Model development and experimental validation. *Science and Technology for the Built Environment*, 23(5), 787-808. doi: 10.1080/23744731.2016.1258371. Repéré à <https://doi.org/10.1080/23744731.2016.1258371>
- Zhang, J. (2009). *Investigation of Airflow and Heat Transfer in Earth-to-Air Heat Exchangers* (Concordia University).
- Zhang, J., & Fung, A. S. (2015). Experimental and numerical investigation of the thermal impact of defrost cycle of residential heat and energy recovery ventilators. *Energy and*

Buildings, 97, 129-136. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.034>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815002431>

Zhang, J., & Haghighat, F. (2005). *Simulation of earth-to-air heat exchangers in hybrid ventilation systems*.

Zhang, J., & Haghighat, F. (2009). Convective heat transfer prediction in large rectangular cross-sectional area Earth-to-Air Heat Exchangers. *Building and Environment*, 44(9), 1892-1898. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.011>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132309000122>

