

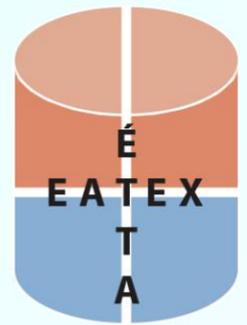


Échangeur Thermique Terre-Air (ÉTTA)

Principes et outil de conception

CanmetÉNERGIE

Leadership en écoInnovation



Résumé

Les échangeurs thermiques terre-air (ÉTTA) peuvent servir de moyen passif de préchauffage et de pré-refroidissement de la ventilation et de l'air de procédé, réduisant ainsi la dépendance à l'électricité et aux combustibles fossiles. Leur rendement est régi par une série de variables interconnectées telles que le matériau, la longueur, le diamètre et la configuration des tubes; la profondeur des tubes sous le niveau du sol; les conditions du sol en surface et en profondeur; la température de l'air ambiant et le rayonnement solaire en surface; le débit d'air, les vitesses, les caractéristiques des ventilateurs et les horaires de fonctionnement. Les relations entre le sol, la conception du tube, l'air ambiant et la vitesse de l'air sont assez complexes. Le présent document décrit les principes fondamentaux de conception, puis les applique à l'aide d'outils complexes de simulation énergétique. Les résultats de ces simulations subhoraires complexes sont ensuite chargés dans un outil que les concepteurs peuvent utiliser dès les premières étapes de la conception pour évaluer le rendement énergétique des options de conception pour une série de climats canadiens.

Avertissement

Ressources naturelles Canada et aucun de ses employés ne font aucune garantie, formelle ou tacite, et n'assument aucune responsabilité légale ou autre à l'égard de l'exactitude, de l'exhaustivité ou de l'utilité du contenu du rapport. Toute référence dans le rapport à quelque produit, processus, service ou organisation que ce soit ne constitue pas nécessairement une approbation, une recommandation ou une préférence de la part de Ressources naturelles Canada. Les points de vue et les opinions exprimés par les auteurs dans ce rapport ne sont pas et ne reflètent pas nécessairement ceux de Ressources naturelles Canada.

Also available in English under the title: Earth to Air Thermal Exchanger (EATEX) – Design Principles and Concept Design Tool.

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada, 2021

N° de cat. M154-146/2021F-PDF

ISBN 978-0-660-40350-2

Remerciements

Ressources naturelles Canada remercie Trevor Butler (P.Eng) pour son assistance à la révision de ce guide.



Table des matières

| | |
|--|----|
| 1.0 Introduction | 4 |
| 2.0 Considérations relatives à la conception..... | 5 |
| 2.1 Application | 5 |
| 2.2 Conditions du site et propriétés du sol..... | 6 |
| 2.3 Profondeur, diamètre et longueur de tubes souterrains..... | 9 |
| 2.3.1 Profondeur du tube souterrain | 9 |
| 2.3.2 Diamètre du tube souterrain | 11 |
| 2.3.3 Longueur du tube souterrain | 12 |
| 2.4 Matériaux du tube souterrain | 13 |
| 2.5 Débit d'air et dimensionnement des ventilateurs..... | 16 |
| 2.6 Fonctionnements et contrôles | 18 |
| 2.7 Géométrie du champ de tube souterrain | 18 |
| 2.8 Coûts de construction | 22 |
| 2.8.1 Excavation | 22 |
| 2.8.2 Matériaux du tube souterrain | 22 |
| 2.8.3 Entrée d'air..... | 22 |
| 2.8.4 Drainage..... | 23 |
| 2.8.5 Contrôles..... | 23 |
| 2.9 Étapes de la conception | 23 |
| 3.0 Outils de conception..... | 26 |
| 3.1 Approche relative à l'outil de conception | 26 |
| 3.2 Données d'intrants de l'outil de conception | 27 |
| 3.3 Rapport de sortie de l'outil de conception | 33 |
| 3.4 Incidence des conditions météorologiques sur les résultats de l'outil de conception..... | 36 |
| 3.5 Comparaison des prévisions de l'outil de conception avec les données mesurées | 38 |
| 4.0 Surveillance in situ du rendement énergétique de l'échangeur thermique terre-air | 40 |
| Références..... | 42 |

1.0 Introduction

Les échangeurs thermiques terre-air offrent une approche passive de préchauffage (en hiver) et de pré-refroidissement (en été) de l'air ambiant (ventilation ou air de procédé) en échangeant de l'énergie thermique vers et en provenance du sol environnant.

Plusieurs paramètres ont une incidence sur cet échange, notamment le type, l'humidité et le compactage du sol; la couverture de surface; la taille du tube souterrain (diamètre, épaisseur et longueur), le matériau et la configuration; la vitesse de l'air et la profondeur du tube souterrain sous la surface. De plus, les variables horaires et saisonnières telles que la température, le rayonnement solaire, la pluie, la neige et la vitesse du vent à la surface auront une incidence sur la température du sol, ce qui aura des répercussions sur le rendement d'un échangeur thermique terre-air.

La conception du système d'échange thermique terre-air doit tenir compte de ces paramètres afin de produire la différence de température et le taux de transfert de chaleur requis du système de manière rentable. Ces paramètres seront décrits dans le présent guide.

Un premier outil de conception d'accompagnement est élaboré dans ce guide; et une description de la manière dont les paramètres de conception sont appliqués dans cet outil de conception est également fournie.

Avant de définir les paramètres et les principes de conception nécessaires pour un système d'échangeur thermique terre-air à haut rendement, il est essentiel de fournir une brève explication des raisons pour lesquelles un tel système devrait être envisagé dans les projets de conception, ainsi que les raisons pour lesquelles un outil de conception préliminaire est nécessaire.

Un échangeur thermique terre-air est un moyen relativement passif de préchauffage et de pré-refroidissement de la ventilation et l'air de procédé. L'intégration d'un système de chauffage/refroidissement passif peut être source d'incertitude dans le processus de conception; c'est pourquoi la communauté des concepteurs hésite quelque peu à envisager les échangeurs thermiques terre-air dans des projets standard. Ils semblent n'être envisagés que pour des projets de conception spécialisés dits de niche. Dans un contexte d'évolution vers des bâtiments à consommation énergétique nette zéro, il sera nécessaire de se pencher sérieusement sur les mesures passives visant à compléter et, dans certains cas, à répondre aux charges de chauffage et de refroidissement des locaux. La tâche 40 (Solution Sets for Net Zero Energy buildings) de l'annexe 52 de l'AIÉ indique que la prévalence de climatisation/chauffage par le sol se produisait dans moins de 20 % des bâtiments commerciaux (Garde, Ayoub, Aelenei, Aelenei, & Scognamiglio, 2017). Dans ce même ouvrage, la rétroaction répertoriée de 30 bâtiments identifiés à consommation nette zéro a permis de constater que l'incertitude quant au rendement et un manque général de compréhension de la technologie étaient les principaux facteurs contributifs à la faible adoption des échangeurs thermiques terre air dans les bâtiments à consommation énergétique nette zéro (Garde, Ayoub, Aelenei, Aelenei, & Scognamiglio, 2017).

Ce guide fournit des principes de conception, des études de cas avec des résultats et un outil de conception préliminaire pour dissiper certaines des incertitudes liées à la prise en compte des échangeurs thermiques terre-air dans les projets de conception.

2.0 Considérations relatives à la conception

Voici les facteurs de base à prendre en compte lors de la conception de systèmes d'échangeur thermique terre-air :

- Application (utilisation prévue)
- Conditions du site (emplacement, sols)
- Diamètre, profondeur et longueur des échangeurs terre-air
- Matériaux des échangeurs terre-air
- Débit d'air et dimensionnement des ventilateurs
- Fonctionnement et contrôles
- Configuration des échangeurs terre-air [un ou plusieurs tubes, espacement, conception en spirale]
- Coûts d'investissement

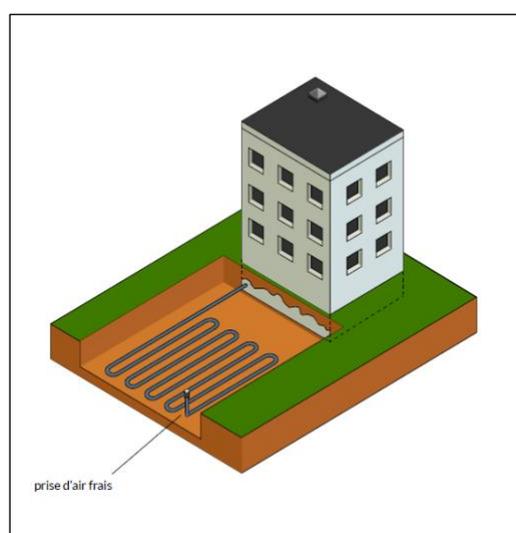
Chacun de ces éléments fera l'objet d'une discussion plus détaillée et d'une démonstration au moyen de l'outil de conception.

2.1 Application

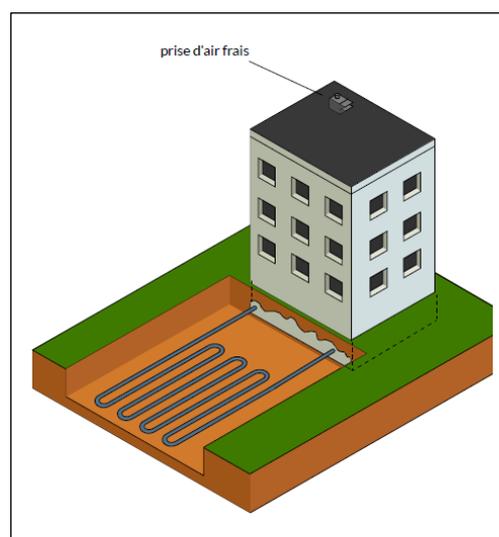
Il est important de noter que dans la majorité des applications, un système d'échange thermique terre-air est essentiellement un système de préchauffage ou de pré-refroidissement. Dans le cas de régions climatiques ou de bâtiments ayant de très faibles charges de chauffage et de refroidissement, un système d'échange thermique terre-air peut supporter une partie importante des charges de chauffage et de refroidissement.

Le premier bâtiment certifié Passivhaus en Amérique du Nord, le Biohaus Environmental Learning Center de Bemidji, au Minnesota, utilise un système d'échange thermique terre-air pour répondre à sa charge de refroidissement en été et, en hiver, préchauffe l'air de -29°C à -4°C (George, 2010).

Il existe deux types de échangeurs thermiques terre-air: système à boucle ouverte et système à boucle fermée.



Boucle ouverte



Boucle fermée

Figure 1 : Types d'échangeurs thermiques terre-air

Dans un système à boucle ouverte, l'air extérieur (ventilation ou air de procédé) est aspiré dans des tubes souterrains et est distribué aux espaces conditionnés. Dans ces tubes souterrains, l'air admis absorbe (ou rejette) de la chaleur du (ou vers) le sol environnant, assurant ainsi un certain degré de préchauffage ou de pré-refroidissement de l'air neuf. Le tube souterrain fait partie du système d'alimentation d'air. L'air de retour ou l'air évacué du bâtiment n'interagit pas avec le système d'échange thermique terre-air.

Dans un système fermé, l'air du bâtiment est remis en circulation à travers le système de conduits souterrain pour transférer la chaleur du bâtiment à la terre, ce qui refroidit le bâtiment.

Dans les deux cas, la terre agit comme une source de chaleur ou un dissipateur de chaleur, c'est-à-dire comme un moyen de transfert thermique. L'efficacité de ce transfert est régie par les principes de transfert de chaleur de l'air, du sol, du tube souterrain et par l'application prévue de ce dernier.

Ce guide met l'accent sur les échangeurs thermiques terre-air à boucle ouverte pour préchauffer et pré-refroidir la ventilation.

2.2 Conditions du site et propriétés du sol

Dans les systèmes d'échangeurs thermiques terre-air, le sol est la source et le dissipateur de chaleur. La température du sol autour du tube souterrain dépend de sa composition, de son compactage, de sa profondeur, de son humidité, de ses interactions avec les autres tubes souterrains et des conditions de surface, en plus des conditions ambiantes.

Les températures du sol à différentes profondeurs et éloignées des tubes souterrains ont été mesurées et suivent une variation sinusoïdale avec une amplitude annuelle quelque peu liée à la température moyenne de l'air (Kusuda & Achenbach, 1965). À une profondeur supérieure à 2 mètres, les températures du sol sont relativement constantes et similaires à la température annuelle moyenne de l'air (Peretti, Zarella, De Carli, & Zecchin, 2013). La figure 2 présente les températures du sol mesurées à différentes profondeurs (de 0,025 m à 5 m sous la surface) par rapport à la température ambiante bulbe sec.

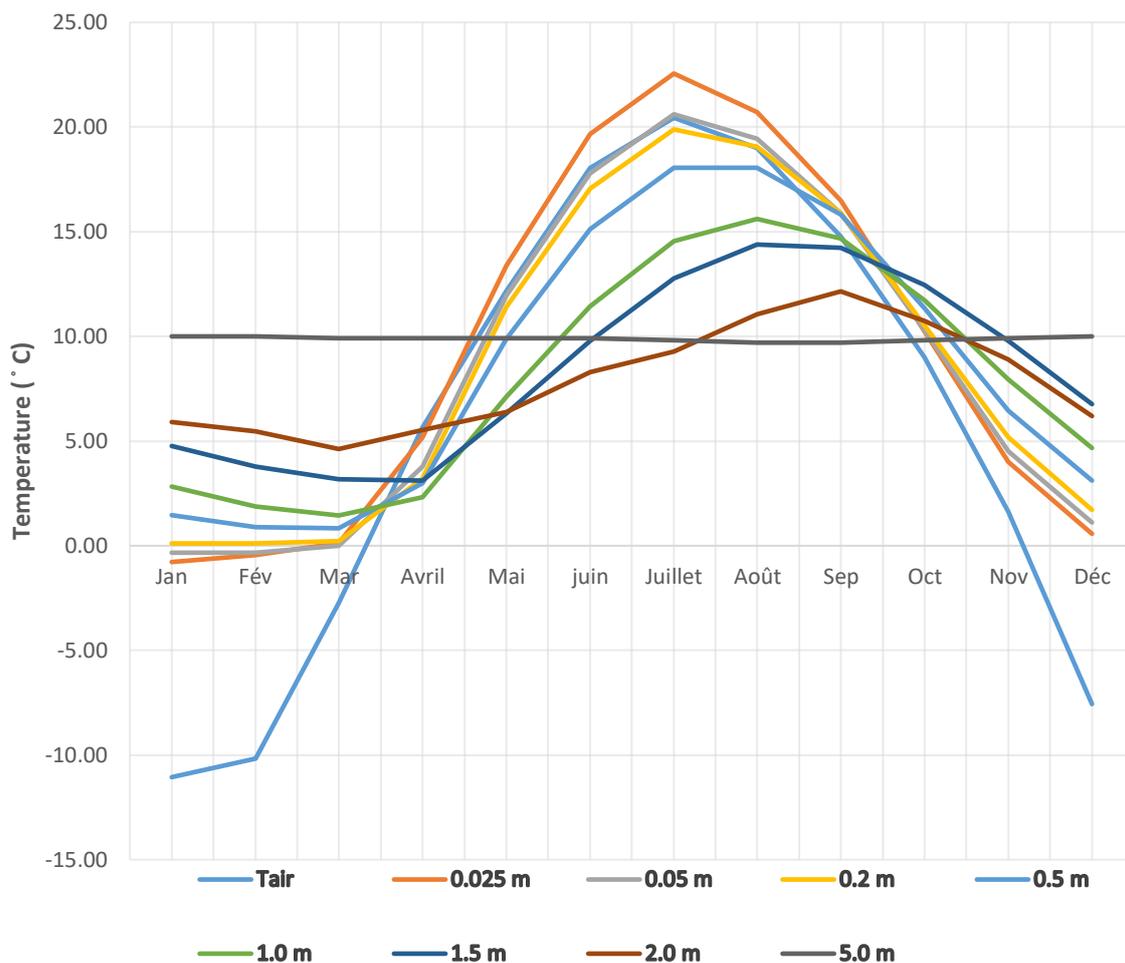


Figure 2 : Températures moyennes mensuelles du sol mesurées à Ottawa selon la profondeur

Source : (Ouellet, 1975) (G.P. Williams and L, 1976)

La température du sol à une certaine profondeur n'est qu'un paramètre ayant une incidence sur le transfert de chaleur avec un tube souterrain. Les types de sols (argiles, limons, sables), les propriétés (taille des grains, matière organique), l'humidité, le compactage et la porosité déterminent eux-mêmes la résistivité thermique, la conductivité, la diffusivité et l'effusivité qui ont une incidence sur le transfert de chaleur (Birch, 1995; Farouki, 1986).

La résistance thermique est une mesure de la résistance ou de l'impédance du flux de chaleur à travers une unité de surface dans une unité de temps sous l'effet d'un gradient de température; elle est mesurée en $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$. La conductance thermique est le contraire de la résistance. Elle est une mesure du flux de chaleur à travers une unité de surface dans une unité de temps sous un gradient de température; elle est mesurée en $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$. La diffusivité thermique est le rapport de la conductivité thermique d'une substance au produit de sa masse volumique par sa chaleur spécifique; en d'autres termes, c'est la mesure de l'inertie thermique. Elle permet de mesurer la vitesse de transfert de la chaleur. L'effusivité thermique est la capacité de stockage et de dissipation de la chaleur des particules du sol, qui affecte la conductivité et la diffusivité.

Les 5 principaux matériaux constituant le sol ont tous des conductivités différentes et, en fonction de leur pondération, ils déterminent la résistivité et la diffusivité du sol. Le tableau 1 présente ces matériaux.

Tableau 1

Principaux constituants du sol

| Composant du sol | Conductivité thermique W/(m-K) | Diffusivité thermique cm ² /sec |
|-------------------------------|-----------------------------------|---|
| quartz | 3,0 | 0,043 |
| autres minéraux du sol | 2,5 | 0,015 |
| eau à 25 °C | 0,6 | 0,001 |
| matière organique | 0,25 | 0,00142 |
| air à 20 °C dans l'atmosphère | 0,026 | 0,00021 |

Source : (Farouki, 1986)

La pondération de ces principaux constituants déterminera si le sol est de type limoneux, argileux, sableux ou tourbeux. Plus la conductivité est élevée, plus la capacité de transfert de chaleur est grande; soit du sol vers le tube souterrain, soit du tube souterrain vers le sol.

La teneur en humidité du sol a une incidence sur sa conductivité et sa diffusivité. Plus l'humidité du sol augmente, plus la conductivité thermique augmente (de Jong van Lier & Durigon, 2012), jusqu'au point de saturation où une augmentation de la teneur en humidité a peu d'effet sur la conductivité globale du sol. Bien que l'humidité du sol puisse augmenter le transfert de chaleur, d'autres décisions liées à la profondeur, au potentiel de congélation et au compactage jouent un rôle tout aussi important dans le transfert de chaleur du sol. Les sols compactés contenant des matériaux à forte densité (p. ex., des sables) amélioreront la conductivité thermique (Peretti, Zarella, De Carli, & Zecchin, 2013). Des études de refroidissement de sables compactés autour d'un tube souterrain révèlent que le transfert de chaleur a augmenté de 12 % et 28 %, respectivement, du sable peu compacté au sable moyennement compacté et au sable densément compacté. (Elminshawy, Siddiqui, Qazi, & Addas, 2017)

Le *ASHRAE Applications Handbook* [Guide des applications de l'ASHRAE] (2015) présente les conductivités thermiques, les diffusivités, les teneurs en humidité et les densités types pour divers sols (présentés dans le tableau 2).

Les types de sols, la densité et la teneur en humidité sont probablement inconnus à la phase de démarrage de la conception, c'est pourquoi ils ont été combinés en une sélection liée à quatre types de sols généraux : les sols lourds saturés, les sols lourds humides, les sols lourds secs et les sols légers secs; qui sont utilisés dans un certain nombre d'outils de simulation (Moncef & Kreider, 1996; Lee & Strand, 2008). Le choix du type de sol pour l'outil conceptuel est décrit à la section 3.

Tableau 2

Incidence de l'humidité sur la conductivité et la diffusivité du sol.

| Sol | Humidité | Densité | Conductivité thermique | Diffusivité thermique |
|---------------|------------|----------------------|------------------------|--------------------------|
| | Teneur | (kg/m ³) | W/(m-K) | m ² /sec |
| Argile lourde | 15 % d'eau | 1 922 | 1,558 | 5,914 x 10 ⁻⁷ |
| | 5 % | 1 922 | 1,212 | 6,452 x 10 ⁻⁷ |
| Argile légère | 15 % d'eau | 1 281 | 0,865 | 4,624 x 10 ⁻⁷ |
| | 5 % | 1 281 | 0,692 | 4,839 x 10 ⁻⁷ |
| Sable lourd | 15 % d'eau | 1 922 | 3,115 | 1,129 x 10 ⁻⁷ |
| | 5 % | 1 922 | 2,596 | 1,344 x 10 ⁻⁶ |
| Sable léger | 15 % d'eau | 1 281 | 1,558 | 8,065 x 10 ⁻⁷ |
| | 5 % | 1 281 | 1,385 | 9,677 x 10 ⁻⁷ |

Le matériau de remblayage aura une incidence sur la conductivité thermique des sols, surtout s'il diffère du matériau qui a été enlevé à l'origine. Si le remblayage est différent, il est suggéré de continuer à utiliser le matériau de remblayage pour l'utilisation de l'outil, car ce matériau sera le principal contact avec le tube souterrain. D'après les données sur la conductivité du sol, le sable lourd compacté offre une conductivité thermique plus élevée. Pour une modélisation détaillée sachant les conditions du site, il est suggéré d'utiliser de multiples couches de conditions et températures de sol et procéder à une analyse couche par couche (Kaushal, 2017).

Sachant les conditions du sol à différentes profondeurs, les conditions de surface auront également une incidence sur les températures du sol à différentes profondeurs, mais dans une moindre mesure au-delà de 3 m de profondeur. Les conditions de surface, telles que la végétation, la couverture neigeuse, la teneur en eau, le vent, l'humidité et la température de surface, ont toutes une incidence sur la température, la conductivité et la diffusivité du sol de surface. Les sols nus retiennent plus de chaleur que les sols avec couvert végétal; par conséquent, les surfaces de sol couvertes de végétation sont mieux adaptées aux applications de refroidissement (Baten, Akter, Miah, Hassan, & Mobin, 2015). La végétation agit comme des ailettes thermiques, permettant au rayonnement solaire de se dissiper plus rapidement et libérant une certaine humidité de la surface (refroidissement latent). Ces effets ont été intégrés dans certains modèles (Moncef & Kreider, 1996).

2.3 Profondeur, diamètre et longueur de tubes souterrains

2.3.1 Profondeur du tube souterrain

Comme il est indiqué ci-dessus, la température du sol est assez constante à des profondeurs de plus de 3 m. Le type de sol, la teneur en humidité et la couverture de surface ont une incidence sur la variation de la température à différentes profondeurs; toutefois, d'autres facteurs ont une incidence sur la profondeur à laquelle le tube souterrain doit être placé. Ces facteurs comprennent notamment le substrat rocheux sous-

jaçant, le drainage et, surtout, les coûts liés au creusement et au remblayage de tranchées. La profondeur idéale devrait être d'au moins 1,5 m (de la surface jusqu'au sommet du tube), et toute profondeur sous les 3,5 m entraînera des améliorations progressives minimales. (Kaushal, 2017).

Plus le tube est proche de la surface, plus la variation des températures mensuelles du sol est grande (voir figure 2). Les températures à la surface du sol suivront de plus près les conditions ambiantes, réduisant ainsi au minimum le potentiel de préchauffage en hiver et de pré-refroidissement en été. Pour réduire la variation mensuelle de la température du sol, il est possible d'ajouter de l'isolant au-dessus du tube à de faibles profondeurs. Un isolant rigide placé à 0,5 m au-dessus du tube pour servir de séparateur thermique de l'influence des températures de surface au niveau du tube souterrain a été modélisé. Cette approche peut améliorer de façon marginale le rendement global du système d'échangeur thermique terre-air et éviter le coût de creusement d'une tranchée plus profonde. La figure 3 montre les résultats modélisés des tubes avec un isolant rigide placé à 1,4m au-dessus d'un tube et installé à 5 cm sous la surface, par rapport à un tube sans isolant installé à une profondeur de 3 m.

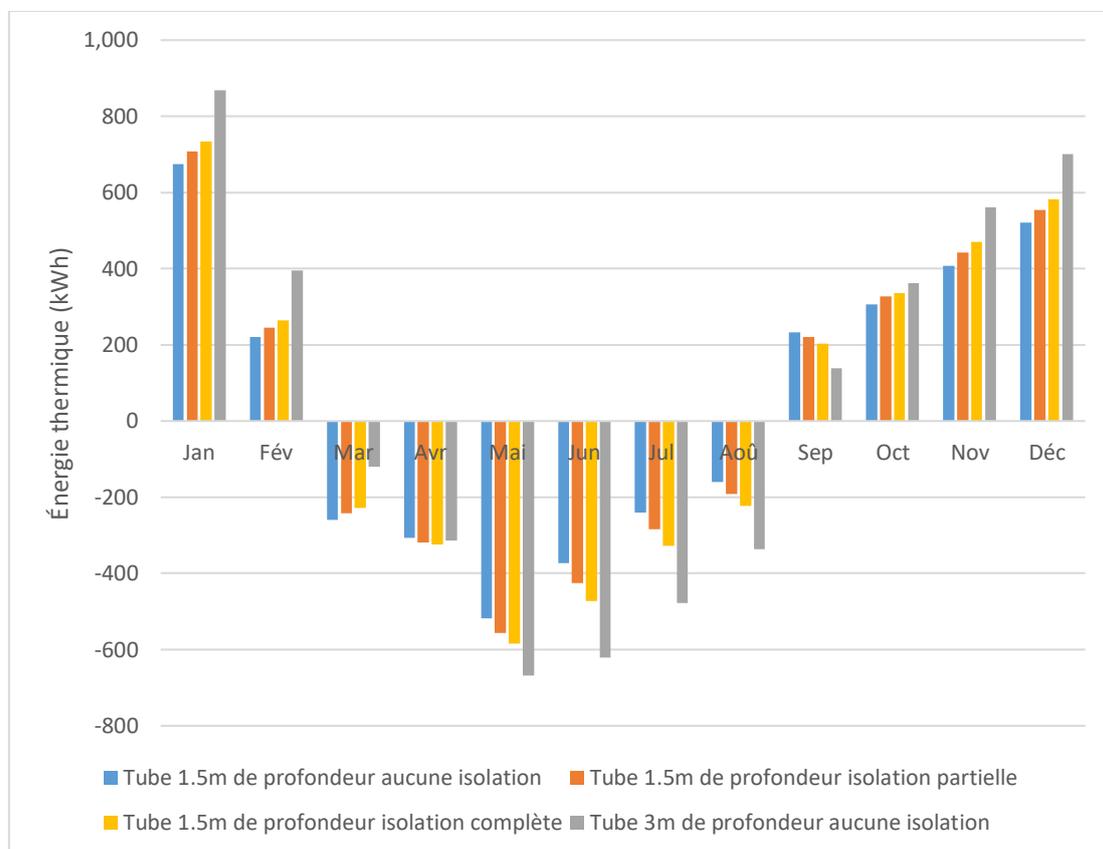


Figure 3 : Effet de l'installation d'un isolant au-dessus du tube souterrain

Ce tube unique de 27 cm de diamètre et de 70 m de long, avec une vitesse d'air de 3 m/sec, était situé à Ottawa. L'isolation partielle consistait en 5 cm de polystyrène extrudé ($1.76 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ RSI) pour une largeur de 1,2 m, alors que l'installation complète de l'isolant faisait de 2 m de largeur. L'isolant couvrait toute la longueur du tube. Comme le montre la figure 3, le tube installé à une profondeur de 3 m a eu un meilleur rendement que celui installé à une profondeur de 1,5 m, même avec l'ajout de l'isolant pour réduire la transmission de la chaleur à la surface plus froide en hiver et pour éviter le chauffage du sol en été. L'isolant a apporté une légère amélioration (de l'ordre de 5 % à 6 % par année) comparativement à l'absence d'isolant à une profondeur de 1,5 m. Toutefois, on ne peut pas en déduire que des réductions supplémentaires de la profondeur avec ajout d'isolant sont possibles en raison de la profondeur de la pénétration du gel à Ottawa.

Les résultats de la simulation sont fondés sur la modélisation sous TRNSYS à l'aide du modèle de Hollmuller/Lachal (Hollmuller & Lachal, TRNSYS compatible moist air hypocaust model, 1998), qui a été adapté pour la création de l'outil simplifié de conception (Brideau, Lubun, & Tardif, 2018).

2.3.2 Diamètre du tube souterrain

Le diamètre du tube souterrain aura également une incidence sur le taux de transfert de chaleur. Pour préchauffer ou pré-refroidir un débit d'air donné, le concepteur peut choisir entre un tube de grand diamètre (supérieur à 1,0 m de diamètre) ou plusieurs tubes de plus petit diamètre (généralement inférieur à 0,6 m de diamètre). Étant donné que les tubes de petit diamètre ont un rapport surface/volume d'air plus élevé que les tubes de grand diamètre, le transfert de chaleur potentiel de la terre vers le flux d'air devrait être plus important dans les petits tubes pour une même section transversale de tubes. Les tubes de plus grand diamètre subiront un mauvais contact de surface de la partie centrale du flux d'air frais, d'où la nécessité de prendre des mesures supplémentaires pour créer une turbulence de l'air afin d'augmenter le contact de l'air frais avec la paroi du tube. Cette stratégie augmente la pression statique dans le système et peut exiger la prise de décisions différentes quant à la taille des ventilateurs. Un tube de plus grand diamètre pourra transférer une plus grande quantité de chaleur si la longueur et le volume du débit sont les mêmes que ceux du tube de petit diamètre. Toutefois, si vous convertissez un tuyau de 1 m de diamètre en trois tuyaux de 0,33 m de diamètre et que vous fournissez le même débit d'air volumétrique, la configuration du tube muni de trois tuyaux de 0,33 m de diamètre permettra un transfert de chaleur plus important, car la surface de transfert de chaleur est presque deux fois plus grande que celle d'un tube de 1 m de diamètre. Cependant, cela exige de creuser trois tranchées ou une tranchée très large, ce qui a des répercussions sur les coûts, et nécessite probablement une puissance supérieure de ventilation en raison de la pression statique supplémentaire.

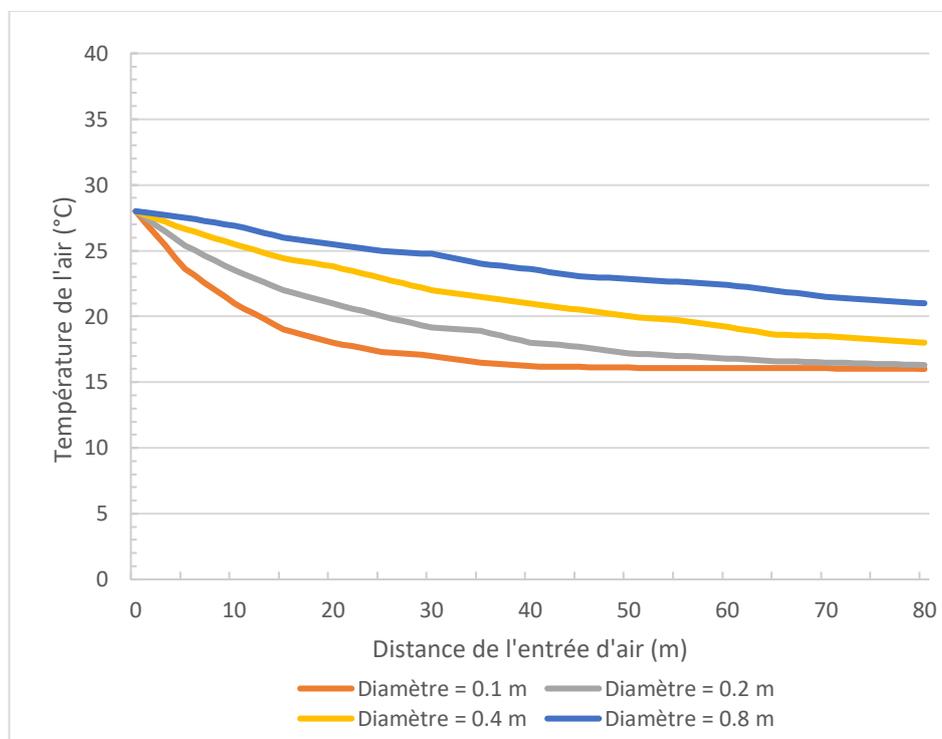


Figure 4 : Effet du diamètre du tube sur la température en fonction de sa longueur

Source : (Kelker, et al., 2016)

Dans la figure 4, le diamètre du tube souterrain varie de 0,1 m à 0,8 m et la température de l'air du tube est modélisée à partir de l'entrée d'air jusqu'à 80 mètres de l'entrée en maintenant tous les autres paramètres (profondeur, vitesse de l'air) constants. Il a été démontré que les plus petits tubes fournissent une plus grande chute de température à partir de la température ambiante d'entrée d'air de 28 °C comparativement aux plus grands tubes. Dans le présent cas, jusqu'à 10 °C dans les 30 premiers mètres de longueur ont été modélisés pour le tube de 0,1 m de diamètre. Toutefois, en raison de l'augmentation du débit volumétrique dans les plus grands tubes, leur taux de transfert de chaleur total était plus élevé. Le tube de 0,8 m de diamètre (débit d'air de 1 m³/s) a fourni 3,66 kW de refroidissement dans les 30 premiers mètres, contre 0,195 kW pour le tube de 0,1 m de diamètre (débit d'air de 0,016 m³/s). La quantité de refroidissement par unité de débit est beaucoup plus élevée dans le tube de 0,1 m de diamètre à 12 kW/(m³/s) comparativement à 3,66 kW/(m³/s) pour le tube de 0,8 m de diamètre.

Le choix du diamètre exact du tube doit être corrélé au débit d'air requis en plus de l'espace requis. Un tube de diamètre trop petit pour un débit d'air augmentera la pression et les besoins en ventilation, et pourrait faire du bruit. Un tube trop grand pour un débit d'air entraînera une réduction du transfert de chaleur en raison de l'absence de contact de la surface du matériau du tube.

Il faudrait ajouter d'autres solutions pour induire un contact de l'air avec la surface du tube, telles que des aubes de turbulence et des déflecteurs d'air. Ces mesures augmenteraient les coûts, la complexité et la pression statique globale du système. La conception de nouvelles solutions pour créer de la turbulence doit être évalué par rapport à l'ajout de tubes supplémentaires de plus petit diamètre ne nécessitant pas l'ajout d'éléments générant de la turbulence afin d'augmenter le contact d'alimentation d'air avec le tube souterrain.

L'épaisseur du tube souterrain aura une incidence mineure sur le taux de transfert de chaleur, ce qui est abordé dans la partie consacrée aux matériaux des tubes souterrains.

2.3.3 Longueur du tube souterrain

La longueur du tube souterrain aura une incidence sur le transfert de chaleur et sur le rendement pour différents diamètres de tubes. Diverses études ont démontré une diminution de l'incidence de la température lorsque la longueur du tube est supérieure à 70 m (Vlad, Ionescu, Necula, & Badea, 2013) (Peretti, Zarella, De Carli, & Zecchin, 2013). La figure 4 indique que la réduction de la température de 28 °C s'est stabilisée après 40 m de longueur pour les tubes de 0,1 m et 0,2 m de diamètre. La figure 5 montre le rendement en matière de refroidissement modélisé pour différents diamètres de tubes en fonction de la longueur du tube.

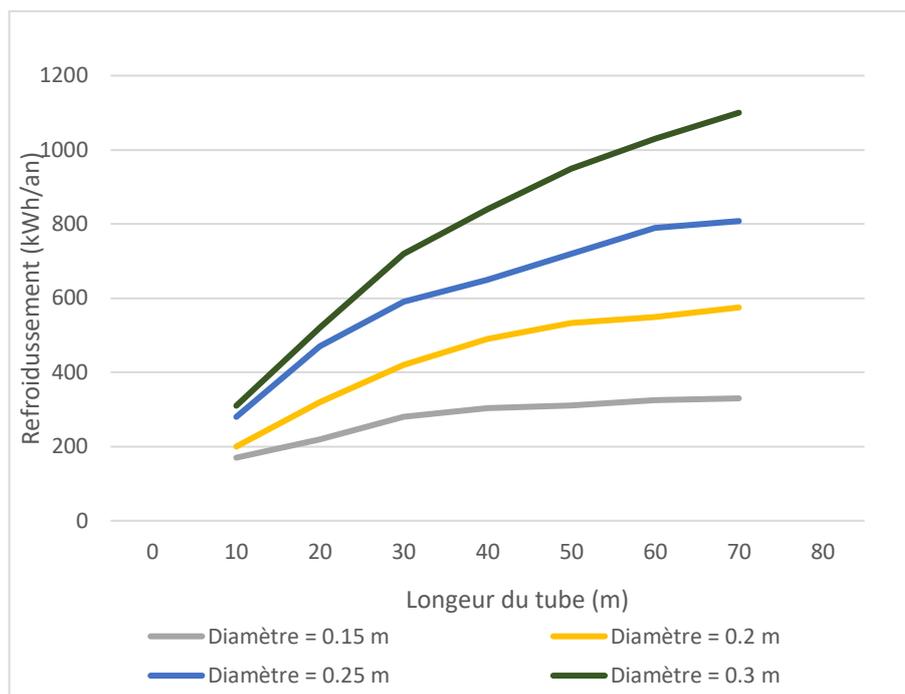


Figure 5 : Effet de la longueur et du diamètre du tube sur le rendement en matière de refroidissement

Source : (Barnard & Jaunzens, 2001)

Les tubes de longueur inférieure à 10 m ne sont généralement pas recommandés, car la surface de transfert de chaleur est insuffisante pour préchauffer ou pré-refroidir efficacement la ventilation, même à faible vitesse. Des études et des mesures ont indiqué que 82 % à 85 % de l'augmentation (préchauffage) ou de la diminution (pré-refroidissement) totale de la température de l'air le long du tube sont obtenues à une longueur de 34 m de l'entrée d'air pour les tubes d'un diamètre de 1 m ou moins (Darius, Misaran, Rahman, Ismail, & Amaludin, 2017).

2.4 Matériaux du tube souterrain

La conductance thermique du tube souterrain lui-même a une incidence sur le transfert de chaleur, mais le rendement est minime en fonction des différents matériaux (Darius, Misaran, Rahman, Ismail, & Amaludin, 2017). Les matériaux usuels des tubes comprennent le PVC, le polyéthylène, le béton, l'acier galvanisé et l'argile. Le tableau 3 présente la conductivité thermique des matériaux des tubes souterrains ainsi que la conductance des matériaux fabriqués.

Tableau 3

Conductivité et conductance thermiques des matériaux du tube souterrain

| Type de matériau des tuyaux | Conductivité thermique W/(m-K) |
|--|---|
| Tuyau en chlorure de polyvinyle | 0,19 |
| Tuyau en polyéthylène (basse densité) | 0,33 |
| Tuyau en polyéthylène (haute densité) | 0,5 |
| Tuyau en polypropylène | 0,24 |
| Béton (sable et gravier ou agrégats pierreux 150 lb/pi ³) | 1,44 à 2,9 |
| Béton (agrégats légers, 120 lb/pi ³) | 1 à 1,3 |
| Acier au carbone | 54 |
| Aluminium | 237 |
| Type de matériau des tuyaux | Conductance thermique (W/m ² -K) |
| PVC : Série 40 (254 mm de diamètre et 12 mm d'épaisseur) | 16 |
| Tuyau en polyéthylène (haute densité, 160 mm de diamètre 8 mm d'épaisseur) | 62,5 |
| Acier galvanisé : Série 40 (3,5 mm d'épaisseur, calibre 10) | 15 428 |
| Béton (armé, 63 mm d'épaisseur et une densité de 150 lb/pi ³) | 23 à 50 |
| Argile (vitrifiée, 254 mm de diamètre et paroi d'une épaisseur de 19 mm) | 1,75 à 2,55 |
| Aluminium (série 40, 10 mm d'épaisseur) | 23 700 |

Source : « Handbook of Fundamentals 2009 » de l'ASHRAE (pour les données sur la conductivité). Les conductances sont calculées.

Le choix des matériaux des tubes devrait être soigneusement fondé sur le rendement thermique, la résistance à la croissance des bactéries, la teneur en humidité, la quantité de gaz dégagés par les matériaux (PVC), ainsi que les coûts de manutention et d'installation.

Si l'on utilise du polyéthylène ou de l'acier galvanisé, les matériaux nervurés peuvent accumuler de la condensation, et ce, même si l'installation comprend une légère pente pour évacuer la condensation superficielle. Les nervures des matériaux retiennent l'humidité, et ce, même si l'ouvrage est installé sur une pente; par conséquent, la conception doit tenir compte du potentiel de croissance de bactéries et de formation de moisissure si les conditions de température y sont propices ou envisager la mise en œuvre de moyens d'atténuation (par exemple, des lampes UV) ou de séchage. Dans les climats secs ou lorsque les installations comprennent la production de chaleur/climatisation industrielle, les matériaux nervurés ne posent pas de problème de moisissures/bactéries. De plus, la tuyauterie nervurée en polyéthylène en gros rouleaux n'exige pas de scellement de joints ni de raccords supplémentaires pour les coudes, ce qui peut faciliter le processus d'installation.

La tuyauterie à double paroi en polyéthylène haute densité est très sollicitée pour les ponceaux. Elle comprend un tuyau extérieur ondulé collé à un petit tuyau intérieur lisse. Ces tuyaux sont solides et

permettent à l'eau et à l'air de circuler librement, réduisant ainsi le risque de formation de moisissure. Toutefois, un système d'échangeur thermique terre-air efficace fonctionne mieux lorsque le matériau du tube souterrain est en contact direct avec la terre et que l'espace d'air entre le tuyau extérieur ondulé et le tuyau intérieur lisse agit comme un isolant pour un transfert de chaleur optimal.

Il faut éviter d'utiliser les tuyaux en polyéthylène avec des fentes/trous de drainage, surtout dans les endroits où le radon peut être présent. Le radon est un cancérigène qui provient de la dégradation naturelle de l'uranium présent dans le sol. Il s'infiltré dans les sols et dans les fissures des fondations ou autres ouvertures. Les ouvertures de drainage des tuyaux et les raccords permettront au radon de pénétrer dans l'air du tube souterrain.

Un matériau de tuyau à surface intérieure lisse et à pente douce (2 % minimum) peut constituer un moyen efficace d'éliminer le condensat, s'il est présent. La pente peut être située près du bâtiment pour l'élimination du condensat à l'intérieur du bâtiment ou loin du bâtiment pour l'élimination du condensat.

Un aménagement comportant une pente près du bâtiment nécessitera un drain ou une pompe pour traiter le condensat. On peut drainer le condensat dans le sous-sol du bâtiment, si possible, dans un drain de plancher ou directement dans un conduit d'évacuation, en s'assurant d'utiliser un siphon ou une coupure antiretour et en respectant toutes les normes de plomberie appropriées. Il est recommandé d'utiliser un siphon dont la hauteur du joint hydraulique est d'environ deux fois supérieure à la colonne d'eau du ventilateur, avec une hauteur du joint hydraulique minimale de 50mm. La hauteur totale du siphon doit être d'environ deux fois la hauteur du joint hydraulique. Un tube de 26 mm de diamètre intérieur est généralement suffisant pour le drain à condensat. Dans les cas où un sous-sol n'est pas accessible, l'élimination du condensat se fait généralement à l'extérieur du bâtiment par un raccordement à un conduit d'évacuation (p. ex., les eaux pluviales) ou à une fosse de drainage munie d'une pompe à condensat. L'accès à cette pompe doit être entretenu par le biais d'un trou d'homme. De plus, il faut veiller à maintenir un joint autour du tube souterrain pour éviter que le radon n'y pénètre, et s'assurer que le trou d'homme est complètement scellé. Il est recommandé de régler la pompe à condensat à la profondeur la plus basse possible sous le tube souterrain (moins de 10 cm).

Un aménagement comportant des tubes inclinés loin du bâtiment nécessiterait une fosse de drainage (avec ou sans pompe à condensat) ou un raccordement à un dispositif de drainage existant.

Certaines installations ont choisi de faire passer l'air préchauffé/pré-refroidi dans une chambre à lumière ultraviolette pour tuer toutes les moisissures ou bactéries qui pourraient être présentes dans l'air si la condensation se produit à la surface du tube. Les fabricants commerciaux d'échangeurs thermique terre-air ont également mis au point des tuyaux en polypropylène ayant un revêtement intérieur de particules d'argent comme revêtement antimicrobien (Moseley, n.d.) Dans la plupart des climats, il y a inévitablement de la condensation dans des conditions humides. Si le cycle naturel de mouillage/séchage ne permet pas une évaporation adéquate de l'humidité, la conception doit prévoir une stratégie active d'élimination de la condensation.

De plus, les matériaux des tubes subissent une dilatation thermique due aux changements de température. Une dilatation thermique de 0,2 mm/(m-K) est fréquente dans les tuyaux en polyéthylène haute densité, tandis que les tuyaux en PVC subissent une dilatation thermique de 0,08 mm/m-K. (Barnard & Jaunzens, 2001) Des joints en caoutchouc sont généralement installés au niveau des tuyaux collecteurs pour permettre ce mouvement axial, mais aussi pour protéger contre les infiltrations dans la nappe phréatique. On empêche les mouvements latéraux à long terme en scellant les tuyaux entre eux.

Des tuyaux non rigides peuvent être envisagés, à condition que l'installation empêche leur affaissement, lequel serait susceptible de permettre une accumulation d'eau. En plus du scellement des raccords des

tuyaux, la longueur du matériau des tuyaux elle-même aura une incidence sur le risque de fuite, d'infiltration d'eau/du radon et de turbulence de l'air.

2.5 Débit d'air et dimensionnement des ventilateurs

La conception du tube souterrain permet de préchauffer et de pré-refroidir les débits d'air nécessaires à l'espace ou au bâtiment. Une vitesse d'air élevée réduira le gradient de température, car la durée de contact de l'air avec la paroi du tube souterrain sera plus court qu'une vitesse d'air plus lente. Le transfert global d'énergie augmentera avec un débit d'air élevé, mais l'impact de la température sera moins important.

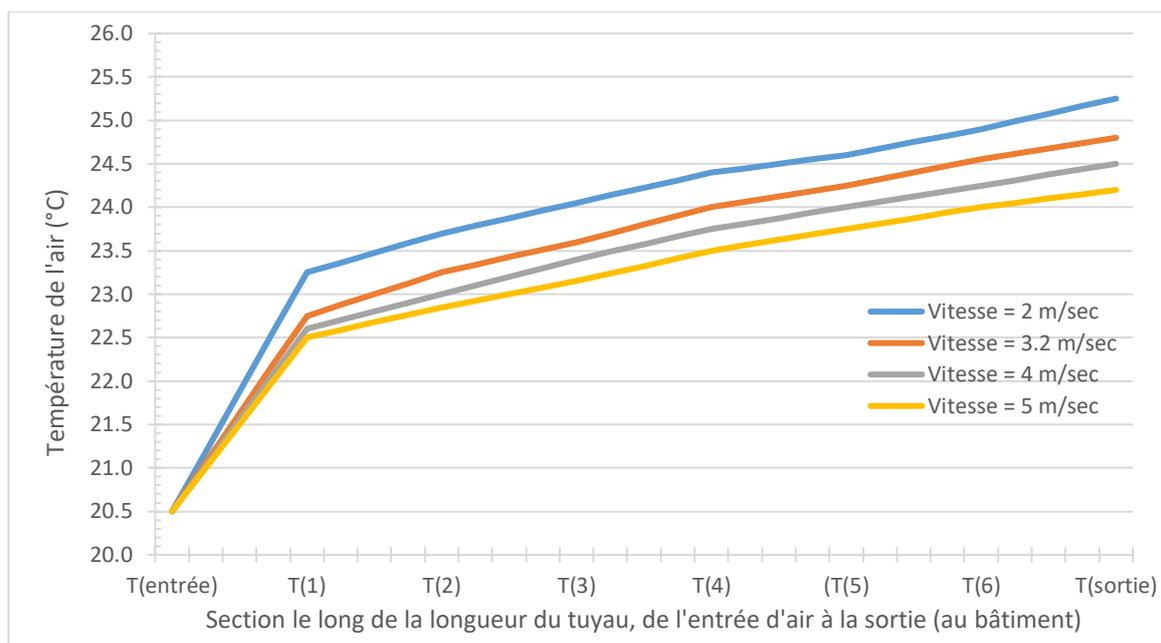


Figure 6 : Effet de la vitesse sur la température

Source : (Vikas Bansal, 2009)

La figure 6 montre les températures modélisées de l'air le long du tube à différentes vitesses. Pour la même géométrie du tube souterrain, des vitesses plus élevées entraînent des températures de sortie plus basses comparativement à des vitesses plus faibles. Toutefois, pour la même géométrie du tube souterrain, les vitesses plus élevées entraînent des débits plus élevés, ce qui se traduit par une quantité totale de chaleur transférée plus élevée comparativement aux vitesses plus faibles.

De plus, les vitesses plus élevées augmentent généralement la turbulence de l'air, améliorant ainsi le transfert de chaleur de l'air et de la surface dans le tube. La relation entre la vitesse de l'air, le débit d'air requis et le diamètre du tube fournira une meilleure indication du potentiel de préchauffage et de pré-refroidissement du tube. La figure 7 présente cette relation dans le cas du refroidissement.

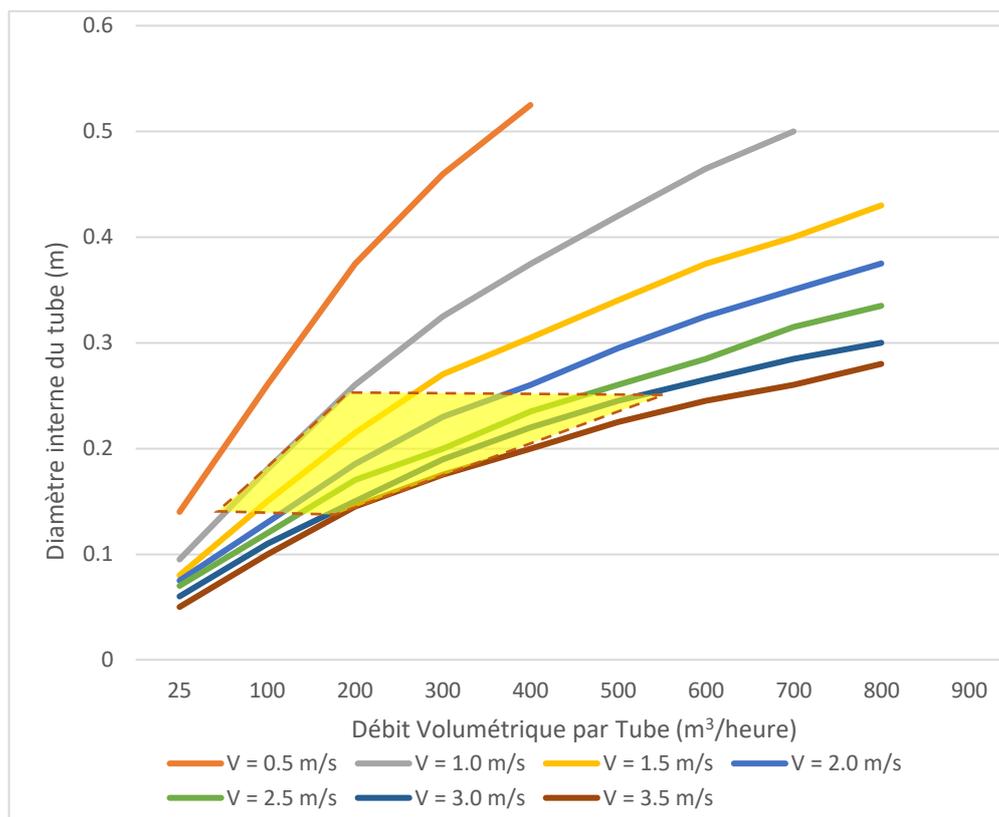


Figure 7 : Diamètre du tube en fonction de la vitesse et du débit d'air total

Source : (Barnard & Jaunzens, 2001)

La figure 7 présente le diamètre du tube recommandé pour un débit d'air de conception et une vitesse souhaités. Une vitesse de 2 m/sec est recommandée pour limiter les chutes de pression (Barnard & Jaunzens, 2001). La plage de conception recommandée selon les données de la figure 7 se situerait dans un diamètre intérieur du tube de 0,15 à 0,25 m pour des vitesses d'air comprises entre 1 et 3,5 m/sec comme il est indiqué dans la zone ombragée.

Il est important de préciser que la conception du tube souterrain ajoutera de la pression au système de traitement de l'air; par conséquent, la pression supplémentaire à travers les tubes et/ou le collecteur doit être incluse dans la conception du ventilateur de l'appareil de traitement de l'air.

Le système sera conçu pour fournir un débit d'air requis (π^3/m , L/sec, m^3/sec). La connaissance des exigences de conception et des types de tuyaux, de raccords, de coudes, de pertes de pression, etc., permet de calculer les vitesses d'air selon les lois fondamentales des ventilateurs.

L'entrée d'air elle-même doit être prise en compte lors de la conception. En tant qu'entrée d'air dans un bâtiment, le filtrage, l'emplacement et la taille devraient être conformes à la norme 62 de l'ASHRAE. L'entrée d'air doit être suffisamment élevée par rapport au sol pour éviter que des résidus du sol (humidité, décomposition des feuilles, traitement des pelouses) ne soient facilement aspirés dans le système d'échangeur thermique terre-air. De même, l'entrée d'air doit être physiquement située loin des sources de produits chimiques nocifs (près des stationnements, des routes, des hottes à évacuation des bâtiments). La norme 62 de l'ASHRAE définit les distances minimales de séparation entre l'entrée d'air et les zones de possible contamination de l'air.

Le dimensionnement des persiennes d'entrée d'air est fonction de la surface libre des persiennes, de ses dimensions réelles (hauteur et largeur), de la chute de pression statique du ou des tubes et du tuyau

d'admission, de la vitesse de l'air libre et du débit d'air requis pour l'admission. La connaissance de certaines de ces variables et l'utilisation des outils des fabricants de persiennes permettront de déterminer les dimensions exactes des persiennes pour répondre aux exigences en matière de débit d'air et de vitesse de l'air. L'Air Movement and Control Association (AMCA) propose des normes qui montrent comment calculer la surface libre des persiennes en fonction de leurs dimensions. Des vitesses d'air libre inférieures à 0,35 m/s (700 pi/m) réduiront l'induction d'eau dans l'entrée d'air (sauf en cas de vent ou de brouillard/brume). Même si l'humidité pénètre dans l'entrée d'air, il faut prévoir une solution de drainage pour l'entrée d'air.

La décision de prévoir une seule entrée d'air alimentant plusieurs tubes souterrains au moyen d'un collecteur d'alimentation ou une entrée d'air dédiée à chaque tube est davantage une question de logistique et de coût qu'une question de thermodynamique. Le collecteur d'alimentation d'air à l'entrée de chaque tube souterrain sera considéré comme faisant partie de l'échangeur thermique terre-air pour une modélisation détaillée du rendement, car le collecteur interagira sur le plan thermique avec la terre environnante.

2.6 Fonctionnements et contrôles

Un échangeur thermique terre-air peut fonctionner de façon continue, selon un horaire, en fonction de la charge, de façon saisonnière ou un mélange de certains de ces modes de fonctionnement. Il est important de noter que le fonctionnement en fonction des saisons peut éventuellement avoir une incidence sur le rendement à long terme du système. Le sol environnant va soit gagner trop de chaleur lors d'un fonctionnement en été seulement, et être saturé sur le plan thermique, soit perdre trop de chaleur lors d'un fonctionnement en hiver seulement, et être épuisé sur le plan thermique.

Lorsque les températures de l'air extérieur sont proches des températures du point de consigne intérieur, il faut envisager de contourner le tube souterrain et d'amener l'air de ventilation directement dans le bâtiment. En outre, il faut envisager la dérivation si le système d'échangeur thermique terre-air risque de produire l'effet contraire, tel que le chauffage pendant la saison de refroidissement, ou le refroidissement pendant la saison de chauffage.

En mode de chauffage, lorsque le tube souterrain est actif (non contourné), il faut simplement s'assurer que la température de l'air de sortie est supérieure à celle de l'air d'entrée.

Dans l'éventualité où une dérivation d'air est appliquée, une fraction de l'air admis devrait circuler dans l'échangeur terre-air afin d'éviter une accumulation de condensat.

2.7 Géométrie du champ de tube souterrain

La conception d'un système d'échangeur thermique terre-air peut comprendre un seul tube ou plusieurs tubes alimentant des collecteurs raccordés au système de ventilation du bâtiment. Pour obtenir des débits d'air élevés, il est recommandé d'utiliser plusieurs tubes plutôt qu'un seul, à condition que chacun des tubes ait une longueur supérieure à 10 m (Benkert, Heidt, & Schöler, 1997). L'espacement entre les tubes ne doit pas être inférieur au diamètre d'un seul tube, mais les recommandations pour une conception optimale varient de 3 diamètres de tube (PACTE, 2017) à 1 m (Barnard & Jaunzens, 2001).

La configuration peut être droite, de type méandre, combinée ou installée autour de la fondation du bâtiment (voir les figures 8a, b, c, d, e, f). La décision dépend de l'espace disponible; toutefois, plus le nombre de coudes est élevé, plus la pression statique que le ventilateur doit combattre est élevée.

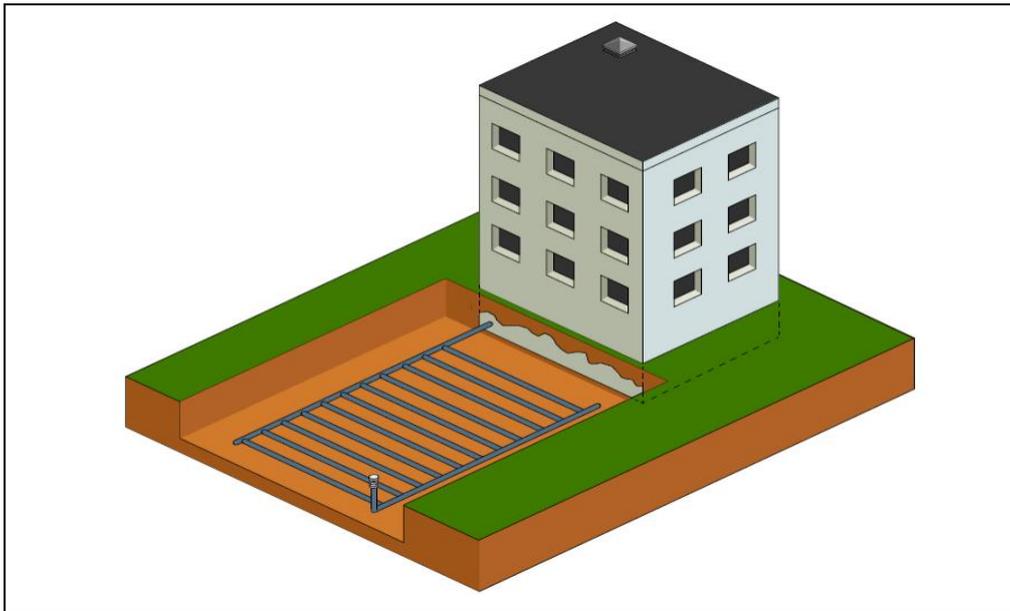


Figure 8a : Schéma de la configuration collecteur/distributeur

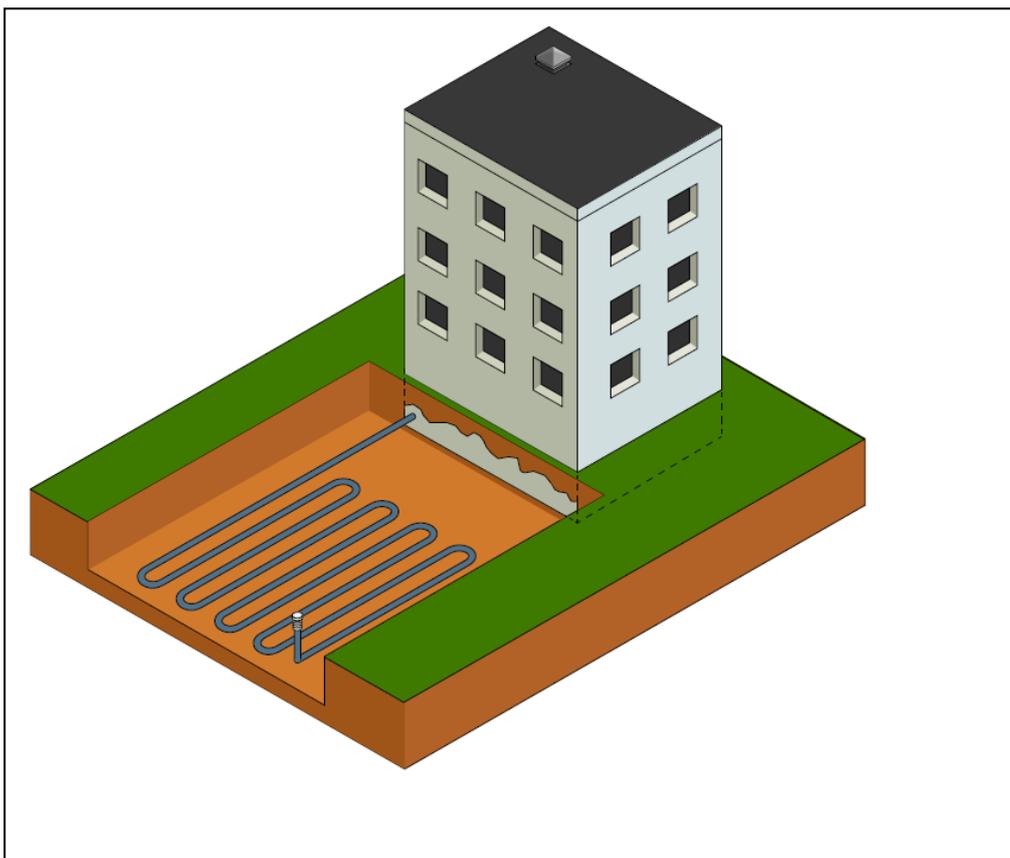


Figure 8b : Schéma de la configuration de type méandre

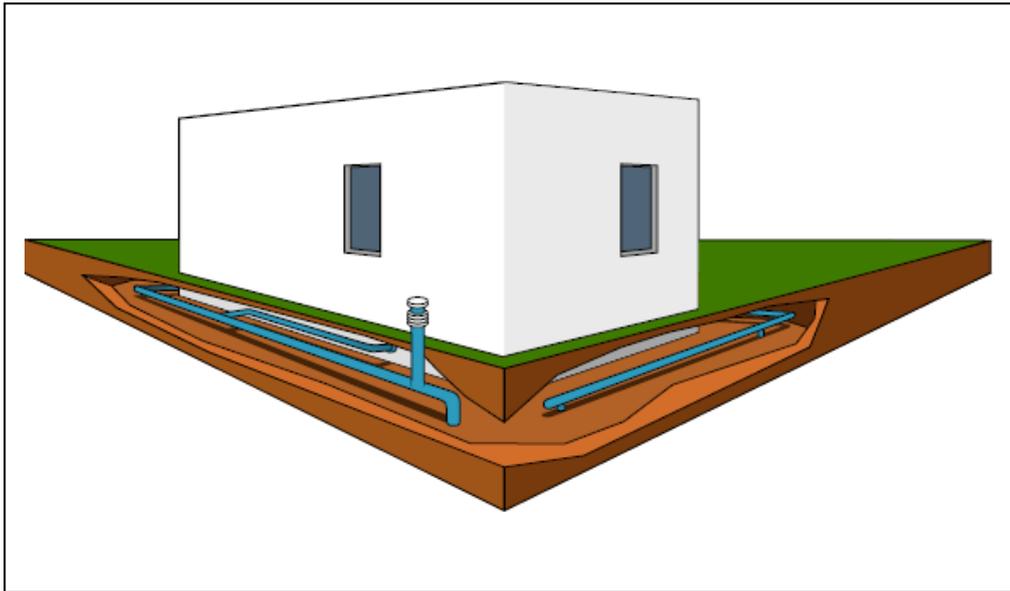


Figure 8c : Schéma de la configuration autour de la fondation

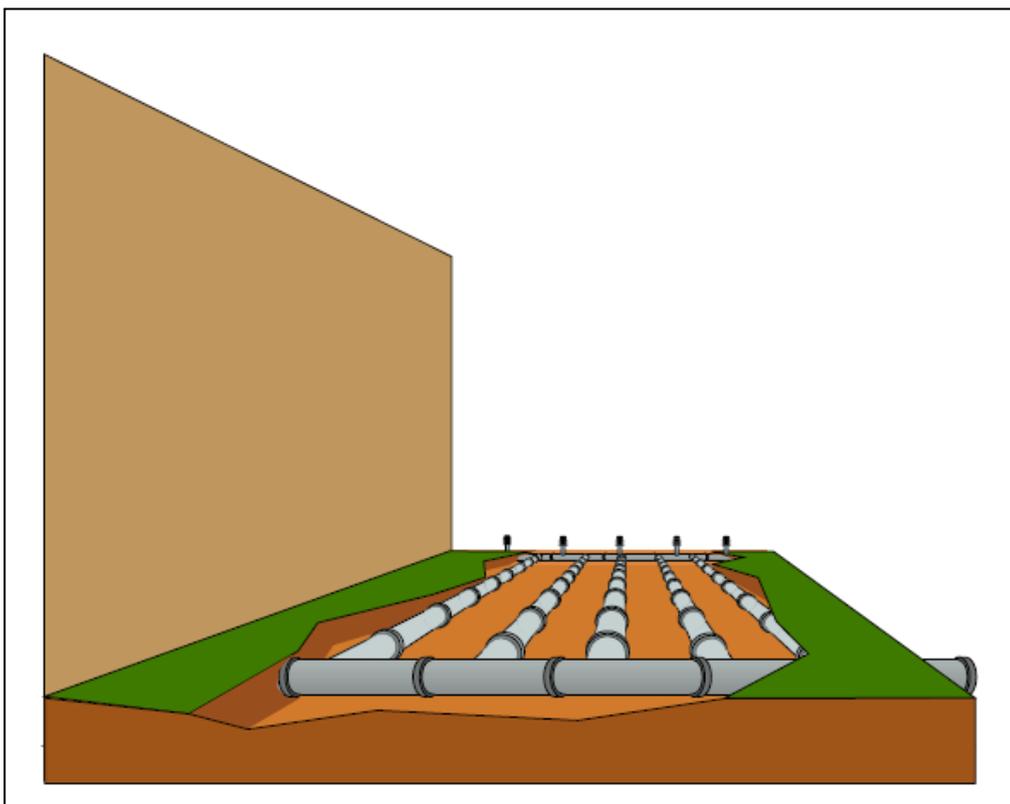


Figure 8d : Plusieurs tubes distributeurs connectés au collecteur

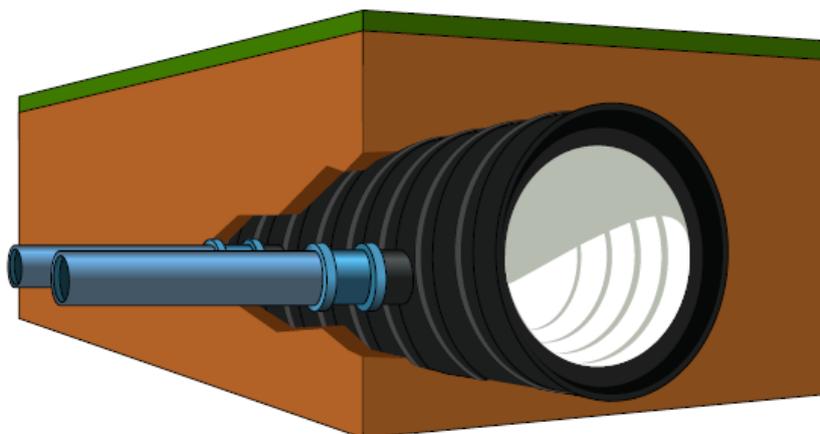
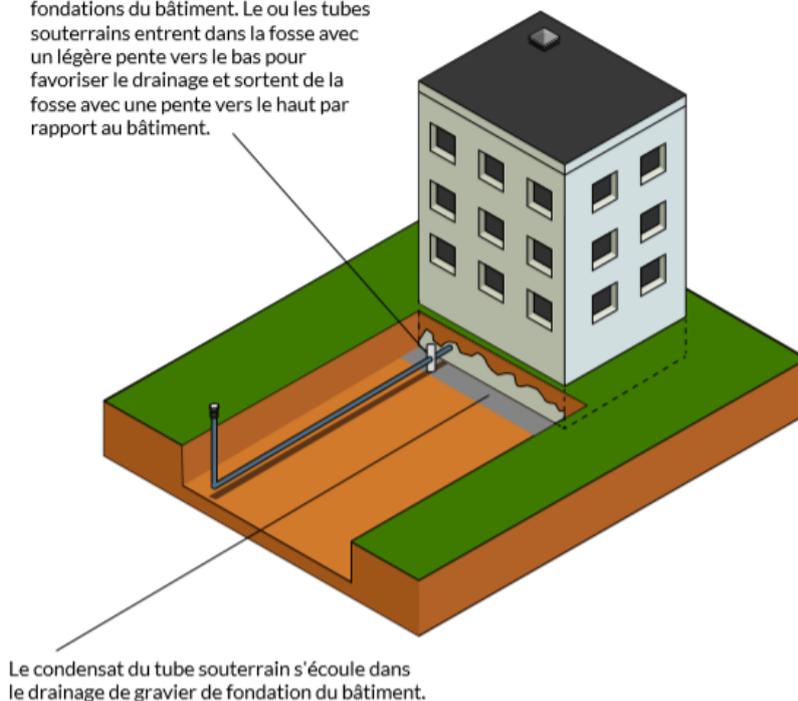


Figure 8e : Schéma du raccordement du collecteur

Le drainage des tubes souterrains comprend une fosse en béton ou de métal avec un couvercle accessible et qui s'étend jusqu'au drainage des fondations du bâtiment. Le ou les tubes souterrains entrent dans la fosse avec une légère pente vers le bas pour favoriser le drainage et sortent de la fosse avec une pente vers le haut par rapport au bâtiment.



Le condensat du tube souterrain s'écoule dans le drainage de gravier de fondation du bâtiment.

Dans les endroits où la condensation excessive est un problème, un moyen de drainage doit être envisagé. Idéalement, le drainage peut simplement impliquer un trou de drainage à la base du tuyau d'admission, où le tuyau d'admission rencontre le tube horizontal. Si cela n'est pas possible, une autre option consiste à créer une fosse de drainage à travers laquelle le tube de terre passerait. une fosse de drainage traversée par le tube souterrain serait une option. Dans ce cas, le tube souterrain traversant la fosse aurait un trou à l'intérieur de la fosse pour permettre à la condensation de s'écouler dans la fosse.

Figure 8f : Schéma de la fosse de drainage

2.8 Coûts de construction

Il est très difficile de généraliser les coûts de construction dans un guide de conception; par conséquent, quelques facteurs d'établissement des coûts seront proposés.

2.8.1 Excavation

Il existe deux méthodes d'excavation pour la configuration du tube souterrain : (1) l'excavation complète de toute la surface de l'échangeur thermique terre-air, ou (2) le creusement de tranchées. Le choix dépend du budget prévu pour l'excavation et de la capacité à stocker et à déplacer de grands volumes de terre. Pour les projets de construction de nouveaux bâtiments, il est d'usage de procéder à d'importants travaux d'excavation pour les fondations dans tous les cas et, par conséquent, les tubes souterrains peuvent être installés avant le remblayage, de sorte que seulement des coûts très mineurs associés aux travaux de terrassement sont engagés.

L'excavation complète n'est utilisée que lorsque la configuration comprend une série de tubes de plus petit diamètre placés à proximité les uns des autres. Dans le cas d'un espacement supérieur à 3 mètres, le volume de matériau à enlever puis à remplacer devient coûteux pour l'excavation sous contrat; les coûts de creusement de tranchées peuvent être plus viables pour la plupart des conditions du sol. Si les coûts d'excavation ne constituent pas un obstacle, il est préférable de procéder à une excavation complète pour la configuration de tubes multiples. Une excavation complète permettra d'assurer l'uniformité de l'emplacement des tubes, de la profondeur, de la pente et du remblayage. Elle permet également l'installation de dispositifs de drainage ou d'isolant au-dessus du tube dans des installations à faible profondeur (moins de 1,5 mètre sous la surface).

Le creusement de tranchées serait utilisé pour un seul tube en configuration droite ou de type méandre ou pour de multiples tubes avec un grand espacement.

2.8.2 Matériaux du tube souterrain

Les matériaux du tube et du collecteur lui-même ont des répercussions sur les coûts. Le béton et les tubes en acier galvanisé sont plus coûteux que les tubes en PVC/polyéthylène, même pour un même diamètre de tube. Les tuyaux en PVC ne doivent pas être utilisés pour tout projet ayant une interface avec l'air de ventilation du bâtiment, en raison des dégagements de gaz chimiques.

Les tubes en polyéthylène sont généralement rigides et vendus en longueurs de tuyaux distinctes, ce qui implique l'achat de raccords en té et de coudes pour les joints et le scellement de joints. Les tubes en polyéthylène peuvent également être souples et vendus sous forme de longs tubes laminés, ce qui permet éventuellement de réduire les coûts de raccordement. Bien que les raccords en té et en coude soient toujours nécessaires selon la configuration, le nombre de joints à sceller est réduit pour les tubes souples en polyéthylène. Quels que soient la configuration et le matériau du tube choisis, il faut tenir compte du coût du scellement des joints et des coudes.

Si des tuyaux en béton ou en acier de plus de 1,2 mètre de diamètre sont utilisés, il faut alors envisager une méthode pour créer une turbulence de l'air afin d'augmenter le potentiel de transfert de chaleur. Les aubes et les déflecteurs devront être fixés mécaniquement à la paroi du puits, ce qui augmentera le coût.

2.8.3 Entrée d'air

L'entrée d'air étant exposée aux conditions de surface, elle doit par conséquent être choisie en fonction des conditions ambiantes. Elle doit également comprendre un filtrage et une couverture pour évacuer la pluie et

la neige et limiter la pénétration de la pluie et de la neige induites par le vent dans l'entrée d'air. Une prise d'air unique comparativement à plusieurs prises d'air dépend de la configuration et des exigences de débit d'air du système.

2.8.4 Drainage

La gestion du drainage peut être aussi simple que permettre à la condensation de s'écouler naturellement dans un drain de plancher (pente du tube vers le bâtiment) ou dans le sol à la base de l'entrée d'air (pente du tube vers l'entrée d'air) ou installer une fosse de drainage avec une pompe. La décision dépend de la configuration, mais surtout du climat et du niveau d'humidité de l'air.

2.8.5 Contrôles

Les contrôles et l'utilisation d'un registre de dérivation augmentent les coûts du système en fonction du niveau de complexité de son fonctionnement, bien que ces coûts seraient négligeables si le système de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air (CVCA) du bâtiment utilisait un système d'économiseur côté air pour le refroidissement naturel.

La composante entretien ou réparation doit être pris en compte dans l'estimation du coût initial et dans la conception. À l'exception de l'entretien des filtres, le système d'échange thermique terre-air est conçu pour fonctionner pratiquement sans entretien pendant une longue période. Par conséquent, l'investissement dans la conception initiale devrait être suffisamment important pour que l'entretien se limite à l'entrée d'air, à la pompe de drainage (si elle est installée) et au raccordement au bâtiment.

La configuration, le choix des matériaux et leur installation auront une incidence non seulement sur le rendement et les coûts d'investissement, mais aussi sur les coûts d'entretien et de réparation. En suivant les recommandations du présent guide, un échangeur thermique terre-air bien conçu permettra de réduire les coûts d'exploitation, la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

2.9 Étapes de la conception

Les principes de conception décrits ci-dessus se traduisent par les étapes générales de conception suivantes :

1. Déterminer le débit volumétrique total requis pour l'air de ventilation du bâtiment (l/sec, pi^3/min m^3/h).
2. Calculer le diamètre du tube souterrain pour obtenir le débit requis en :
 - a. Utilisant le plus petit diamètre de tubes ($0,15 \text{ m} < \text{diamètre} < 0,25 \text{ m}$ est optimal, voir figure 7)
 - b. Utilisant des vitesses optimales de l'air comprises entre 1 et 3,5 m/sec (voir figure 7)
3. Calculer le nombre de tubes nécessaires pour atteindre le débit d'air total requis en utilisant le diamètre du tube choisi et les vitesses de l'air sélectionnées. Déterminer le nombre et la taille des entrées d'air pour répondre aux besoins de débit d'air.
4. Déterminer la configuration en gardant à l'esprit le nombre de tubes et leur diamètre pour atteindre le débit d'air requis : distributeur/ collecteur, type méandre, sur le périmètre des fondations du bâtiment, ou une combinaison. Indiquer l'emplacement et le nombre d'entrées d'air pour la configuration choisie.

5. Déterminer la stratégie d'évacuation du condensat en inclinant (de manière à former un angle de 2 degrés minimum) les tubes vers une fosse de drainage, une fosse de drainage comportant une pompe à condensat, un raccord de drainage au dispositif de ruissellement des eaux pluviales.
6. Déterminer la longueur des tubes en fonction de l'espace disponible sur le terrain devant comprendre un espacement entre les tubes ou les boucles en méandre de moins d'un mètre de diamètre ou idéalement d'un mètre. S'assurer que la longueur des tubes est supérieure à 10 m. La longueur maximale est d'environ 80 m. La longueur nécessaire dans la pratique sera définie par le site lui-même, mais une longueur minimale de 30 à 40 m est nécessaire pour que les tubes souterrains offrent un rendement thermique satisfaisant. Cette longueur donnera une indication générale de la superficie globale de l'espace à réserver au tube souterrain.
7. Déterminer la profondeur de l'installation proposée en fonction des conditions du site et des coûts en gardant à l'esprit que la profondeur optimale est de 3 à 5 mètres sous la surface. À des profondeurs de plus de 5 m, le matériau du tube devra faire l'objet de considérations supplémentaires liées à la charge de la couverture terrestre. Si le coût ou les conditions du site (substrat rocheux) ne permettent pas une installation en profondeur, envisager d'ajouter 50 mm d'isolant en polystyrène extrudé au-dessus du sommet du tube et de prolonger l'isolant de 2 à 3 diamètres de chaque côté du tube sur toute la longueur de celui-ci. La conception devra tenir compte du coût de l'isolation au-dessus du tube par rapport au coût de creusage d'une tranchée plus profonde ou du coût d'une tranchée supplémentaire. Le coût associé à une tranchée supplémentaire peut être minime comparativement au coût des matériaux et de la main-d'œuvre pour ajouter l'isolant au-dessus des puits.
8. Déterminer, sur la base de la configuration et du coût, si toute la zone qui entoure le tube souterrain sera excavée pour l'installation ou si une tranchée sera utilisée pour l'installation.
9. Choisir le matériau du tube (rendement thermique, coût, facilité d'installation, entretien)
10. Déterminer le nombre de té, de coudes, de raccords de tubes (à un collecteur ou à une entrée d'alimentation d'air), d'obstructions à la circulation de l'air afin de déterminer l'énergie supplémentaire requise pour le ventilateur.
11. Déterminer le fonctionnement du système terre-air et son interaction avec le système d'automatisation de bâtiments, le système de circulation de l'air et les commandes prioritaires

Quelques considérations de construction sont à prendre en compte :

1. Installer sur une pente de manière à former un angle de 2 degrés et poser les tubes de manière à favoriser le drainage
2. Éviter les tuyaux perforés (tuyaux de drainage), surtout dans les zones où la présence de radon est soupçonnée, et s'ils sont utilisés, les envelopper dans un tissu souterrain homologué
3. Remblayer avec des matériaux aussi denses (par exemple, sable fin) et compacts que possible pour améliorer le transfert de chaleur
4. L'humidité sera probablement présente à divers moments de l'année, mais elle devrait se dissiper rapidement; il faut cependant s'assurer que tous les raccords de tubes sont bien scellés pour éviter les points d'entrée d'eau souterraine et de radon.
5. S'assurer que les entrées d'air sont élevées pour éviter la pénétration de radon ainsi que des gaz d'échappement des véhicules ou autres et qu'elles sont dotées d'un système de filtrage approprié et d'une protection contre la pluie et la neige adéquate.

6. S'assurer que l'entrée d'air est munie d'un système de drainage (brouillard, brume, pluie chassée par le vent, condensation).
7. Situer l'entrée d'air conformément à la norme ASHRAE 62 et en tenant compte du principal besoin du système d'échangeur thermique terre-air; les zones ombragées pour les systèmes prioritaires de refroidissement et les zones ensoleillées pour les systèmes prioritaires de chauffage.
8. Si le puits est principalement utilisé pour le pré-refroidissement, localiser l'entrée d'air dans une zone ombragée.
9. S'assurer que les animaux sauvages ne vivent pas à proximité des entrées d'air et des accès extérieurs des tubes souterrains.
10. L'entrée d'air doit être filtrée et les crépines ou filtres doivent être accessibles pour le nettoyage relatif à la poussière, au pollen de sable et à l'accumulation de particules.
11. Si la conception prévoit un ventilateur en ligne pour fournir de l'air préchauffé ou pré-refroidi directement dans un espace au lieu d'être raccordé à un système de circulation d'air, s'assurer que le ventilateur est accessible, car l'air ambiant sera temporairement humide, ce qui réduira considérablement la durée de vie du ventilateur.
12. Si la profondeur de la conception est limitée (moins de 3 mètres sous la surface), envisager d'ancrer les tubes en cas de présence saisonnière d'eau souterraine ou si la profondeur de gel hivernal est proche du sommet des tubes.
13. Si le diamètre du tube souterrain est supérieur à 1,8 m, envisager d'ajouter des dispositifs intérieurs tels que des aubes et des déflecteurs pour favoriser la turbulence de l'air, ce qui augmentera le transfert de chaleur entre le flux d'air et la surface de la paroi du puits.

L'interaction des divers paramètres de conception décrits ci-dessus aura une incidence sur le rendement de préchauffage et de pré-refroidissement de l'échangeur thermique terre-air. Ils doivent être pris en compte conjointement avec les exigences en matière de chauffage et de refroidissement par ventilation et les exigences générales en matière de rendement de l'échangeur thermique terre-air. Il existe divers outils et modèles de conception de différents niveaux de complexité permettant d'évaluer les paramètres affectant le rendement thermique du puits.

3.0 Outils de conception

Quelques outils de conception d'échangeur thermique terre-air sont décrits dans la littérature (Hollmuller & Lachal, 2014; Muehleisen, 2012; Ahmed, Ip, Miller, & Gidado, 2009; Benkert, Heidt, & Schöler, 1997), mais ils ne sont pas facilement accessibles, sont difficiles à utiliser ou utilisent des modèles qui n'ont pas été validés par des données expérimentales. Le premier outil de conception présenté dans ce guide est convivial et utilise un modèle validé (Hollmuller & Lachal, 1998).

3.1 Approche relative à l'outil de conception

À l'aide d'un modèle mis en œuvre par Hollmuller et Lachal dans TRNSYS, une série de simulations ont été réalisées pour les paramètres et les intrants présentés au tableau 4. Deux années sont simulées pour permettre la stabilisation des températures au sol, et seuls les résultats de la deuxième année sont utilisés comme extrants. Le pas de temps de TRNSYS est fixé à 0,5 heure, mais le modèle peut utiliser un pas de temps interne plus petit pour assurer la convergence.

La version 2016 des fichiers de données des Fichiers météorologiques canadiens pour le calcul énergétique (FMCCE) a été utilisée pour les données climatiques (Meteorological Service of Canada, 2018a). La température bulbe sec et l'humidité relative ont été utilisées comme conditions d'entrée pour les tubes souterrains, tandis que le rayonnement solaire incident horizontal total, la vitesse du vent et la température bulbe sec ont été utilisés pour calculer la température sol-air et l'établir comme température de surface. Les données relatives à l'épaisseur moyenne mensuelle de la neige (Meteorological Service of Canada, 2018b) ont été utilisées pour estimer la résistance thermique causée par la neige à la surface. On a supposé une densité moyenne de 300 kg/m^{-3} (représentative de la neige accumulée) (Patterson W. , 1994) pour calculer une conductivité thermique de $0,126 \text{ W/m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Sturm, Holmgren, König, & Morris, 1997). On a constaté que la modélisation d'une distance de 14 m sous les tubes et de 10 m latéralement était suffisante pour représenter le système, la distance supplémentaire dans l'une ou l'autre direction n'ayant pas d'incidence majeure sur les résultats. Les conditions aux limites inférieures et latérales ont été fixées au niveau adiabatique. De plus amples détails sur la méthodologie sont disponibles dans une publication de Brideau, Lubun et Tardif (2018).

Les extrants de chaque simulation sont les suivants : profils horaires moyens des températures d'entrée et de sortie pour chaque mois, énergie mensuelle de refroidissement et de chauffage du flux d'air, pourcentage mensuel du temps pendant lequel l'humidité est extraite du flux d'air. Les données pour chaque emplacement géographique (tel que défini par les dossiers climatiques) sont sauvegardées sous forme de fichier texte séparé par virgule, que nous appellerons une *base de données*. Cette approche modulaire permet à l'utilisateur de télécharger uniquement le(s) emplacement(s) requis. Une base de données doit ensuite être importée dans un tableur Excel de l'outil principal de conception pour l'analyse des données à l'aide de menus déroulants, de graphiques et de données formatées. En théorie, l'utilisateur pourrait aussi employer uniquement les bases de données sans le tableur Excel de l'outil de conception, ce qui est cependant déconseillé.

Tableau 4

Intrants de l'outil de conception

| Paramètre | Sélections d'intrants | Remarques |
|---|--|---|
| Dossier climatique | Divers | Utilisation des Fichiers météorologiques canadiens pour le calcul énergétique (FMCCE) de 2016 |
| Diamètre intérieur D_i (m) | 0,142; 0,185; 0,273; 0,356; 0,457; 0,578 0,762; 1,07 | - |
| Matériau | Polyéthylène, béton, acier galvanisé | Seuls le béton et l'acier galvanisé ont été évalués pour le plus grand diamètre |
| Type de sol | Sol lourd et saturé Sol lourd et humide Sol lourd et sec Sol léger et sec | k (W/m-K) et ρC_p (J/(m ³ ·K)) : 2,42; 2,6770 x 10 ⁶ 1,30; 2,0155 x 10 ⁶ 0,865; 1,6764 x 10 ⁶ 0,346; 1,2357 x 10 ⁶ |
| Profondeur (m) | 1,5; 3; 5 | Du sol au sommet du puits |
| Espace entre les tuyaux | 1 D_e , 2 D_e , 3 D_e | 1 D_e = 1 diamètre d'espacement entre les tuyaux |
| Longueur (m) | 15, 40, 65, 100 | Longueur par tuyau |
| Configuration | Collecteur, type méandre | Collecteur = tubes de longueur simple ou multiple connectés en parallèle |
| Configuration | Dans le cas d'une configuration en collecteur, entrer la quantité de tubes parallèles. Dans le cas d'une configuration de type méandre, entrer le nombre de passage de tubes dans la déviation en serpent | |
| Vitesse de l'air (m/s) | 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4 | |
| Efficacité des ventilateurs | | Valeur : 0 – 1,0 |
| Coefficients de perte mineurs pour un seul tube | | Valeur pour tenir compte des chutes de pression dues aux raccords, aux coudes dans le tube (valeur C dans les manuels de l'industrie) Valeur par défaut = 15 |
| Horaire | En continu, programmé | « Programmé » signifie activé tous les jours (excluant les fins de semaine), de 7 h à 20 h |

3.2 Données d'intrants de l'outil de conception

L'outil de conception est une interface avec une grande base de données de résultats de simulation. L'outil permet à l'utilisateur de choisir divers paramètres (énumérés au tableau 4) et détermine les effets potentiels mensuels de chauffage et de refroidissement, l'impact moyen de la température d'alimentation d'air et la probabilité de condensation. Les données d'intrants de l'outil sont composées de deux analyses de base : l'analyse des tubes souterrains et une analyse comparative du système de récupération d'air de ventilation. Le préchauffage et le pré-refroidissement de l'air de ventilation peuvent être effectués au moyen d'un certain nombre de stratégies. Un compromis de conception commun est la décision relative aux tubes souterrains par

rapport à la récupération de la chaleur pour le préchauffage ou le pré-refroidissement de la ventilation. Les deux peuvent être utilisés conjointement, mais les coûts d'immobilisation ont généralement une incidence sur la décision; par conséquent, cet outil calcule l'impact énergétique des deux options et les compare.

Les étapes suivantes guideront l'utilisateur sur la manière d'employer l'outil.

1. Charger l'outil en ouvrant « DesignTool_macro_v2.#.xlsm » (nécessite Microsoft Excel 2016).
2. Choisir « Importer les données » pour accéder aux données du fichier météorologique spécifique. Les fichiers de données Excel se trouvent dans un dossier qui contient l'outil et sont nommés « databaseVille.csv ».

L'outil utilise les données météorologiques moyennes à long terme des FMCCE, qui créent un fichier météorologique moyen représentant les données météorologiques mesurées (ou modélisées) pour 30 ans de données jusqu'en 2014. Les FMCCE peuvent être consultés à l'adresse suivante <http://Climate.OneBuilding.org>.

Une analyse des résultats de l'outil de conception de l'échangeur thermique terre-air utilisant les conditions météorologiques des FMCCE par rapport aux conditions météorologiques réelles de 2017 et 2018 a été réalisée et est décrite dans la section 3.4 intitulée « Incidence des conditions météorologiques sur les extrants de l'outil de conception ».

Intrants du tube souterrain

3. Choisir le type d'« Horaire » parmi les deux options : « En continu » ou « Programmé ».

L'horaire « Programmé » suppose que le système (ventilateur) fonctionne de 7 h à 20 h du lundi au vendredi. Si l'horaire de l'utilisateur est différent, il est possible d'estimer les résultats pour un horaire différent. Les deux types d'horaires (En continu et Programmé) doivent être exécutés, et les résultats pour un nombre différent d'heures de fonctionnement programmées doivent être interpolés sur la base de ces résultats.

Exemple 1 : Pour une certaine géométrie et un débit donné, on veut connaître les résultats de l'énergie de chauffage de janvier pour un fonctionnement prévu de 7 h et 18 h, 7 jours par semaine.

Les résultats des deux types d'horaires sont les suivants :

En continu Chauffage de janvier = 1441,11 kWh

Tubes fonctionnant pendant 31 jours X 24 heures/jour = 744 heures

Calculer la puissance de chauffage moyenne :

$$\text{Puissance moyenne} = 1441,11 \text{ kWh} / (744 \text{ heures}) = 1,94 \text{ kW}$$

Programmé Chauffage de janvier = 855,28 kWh

Tubes fonctionnant 13 heures par jour x 5 jours par semaine x 4,43 semaines/mois = 287,95 heures

Calculer la puissance de chauffage moyenne :

$$\text{Puissance moyenne} = 855,28 \text{ kWh} / (287,95 \text{ heures}) = 2,97 \text{ kW}$$

Horaire souhaité : 7 jours/semaine – de 7 h à 18 h

Calculer le nombre d'heures par mois pour l'horaire souhaité : 11 heures/jour X 31 jours
= 341 heures

Calculer la puissance de chauffage moyenne pour l'horaire souhaité en interpolant avec la quantité d'heures de fonctionnement des puits

$$P_{\text{interpolé}} = (341 \text{ heures} - 287,95 \text{ heures}) / (744 \text{ heures} - 287,95 \text{ heures}) * (1,94 \text{ kW} - 2,97 \text{ kW}) + 2,97 \text{ kW} = 2,85 \text{ kW}$$

Estimation du kWh pour janvier = 11 heures/jour x 31 jours
x 2,85 kW = 971,85 kWh

4. Choisir la vitesse la plus proche en m/sec (1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4). Si vous n'êtes pas certain du réglage de la vitesse, sélectionner n'importe quelle vitesse, puis continuer à saisir les données pour obtenir le débit d'air souhaité que le système préchauffe/pré-refroidi. L'outil génère le débit d'air (m³/h et pi³/min) en fonction de la vitesse, du nombre de tubes et de leur diamètre.

On suppose que les vitesses sont moyennes pour tous les tubes dans une configuration en collecteur. En réalité, il peut y avoir jusqu'à 20 % de différence dans les vitesses mesurées de l'air dans les tubes parallèles (Tardif, Lubun, Ouazia, Booth, & Nordquist, 2014).

5. Choisir la longueur de chaque tube si la conception est une configuration en collecteur ou la longueur totale si la conception est une configuration de type méandre ou en boucle continue (installation sur le périmètre du bâtiment). Si l'installation du collecteur a des longueurs différentes, entrer la longueur moyenne la plus proche. Si la longueur est comprise entre les paramètres disponibles, vous pouvez obtenir des résultats supérieurs et inférieurs à la longueur souhaitée, et interpoler pour la longueur souhaitée.

Remarque : Ne pas inclure le tuyau collecteur ou plénum collecteur, ou l'entrée d'air dans l'entrée de la longueur du puits. L'outil ne calcule que le préchauffage et le pré-refroidissement des tubes sous le niveau du sol. Le collecteur et l'entrée d'air fourniront un préchauffage et un pré-refroidissement supplémentaires, mais ces calculs sont normalement insignifiants et ne font pas partie des tâches de l'outil de conception simple. Un modèle détaillé du tube souterrain serait nécessaire pour tenir compte de l'effet thermique supplémentaire.

6. Choisir l'espacement entre les tubes en fonction du diamètre extérieur (D_e) du tube. Par exemple, 2 D_e signifie l'espacement de 2 diamètres entre les tubes dans une installation en collecteur parallèle ou l'espacement entre les boucles de tubes dans une installation de type méandre (voir figure 8). Choisir 3 D_e pour un seul tube éloigné du mur ou pour un espacement supérieur à 3 diamètres de tube. L'espacement est supposé constant pour toutes les configurations.
7. Choisir une profondeur estimée à 1,5 m, 3 m ou 5 m. On suppose que les tubes sont à la même profondeur pour les installations à tubes multiples et que la profondeur va du niveau du sol au sommet de la surface du tube.
8. Choisir le type de sol parmi les quatre options possibles.

Tableau 5

Types de sol de l'outil de conception

| Type de sol | Conductivité thermique | Diffusivité thermique | Capacité de chauffage |
|-----------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | W/(m-K) | m ² /sec | J/(m ³ -K) |
| Lourd et saturé | 2,42 | 9,04E-07 | 2,667E6 |
| Lourd et humide | 1,3 | 6,45E-07 | 2,015 5E6 |
| Lourd et sec | 0,86 | 5,16E-07 | 1,676 4E6 |
| Léger et sec | 0,346 | 2,80E-07 | 1,235 7E6 |

Divers paramètres du sol, comme les matériaux de remblai, les matériaux de drainage, les différents sols et leurs propriétés, de la limite de surface à la canalisation, le compactage et les matériaux de surface détaillés (gazon, feuilles) auront un impact, mais ce modèle conceptuel inclut les principaux paramètres de température du sol.

Utiliser les propriétés du matériau de remblai pour déterminer l'option appropriée. Les sols lourds et saturés sont principalement des sols mouillés. Les sols lourds et humides peuvent être soit des sols argileux, limoneux ou des sols plus légers selon la teneur en humidité. Les sols lourds et secs sont généralement un mélange de limon argileux plus léger et les sols légers et secs sont principalement constitués de limon. Les propriétés thermiques sont censées être constantes tout au long de l'année, car les effets saisonniers du dégel du sol, de la fonte des neiges, de la saison des pluies sur l'humidité du sol et la conductivité thermique sous-jacente n'ont pas été pris en compte dans l'outil.

Si le tube est installé dans du gravier, choisir une valeur qui convient, car le gravier a une conductivité thermique de masse et une masse thermique relativement faibles en raison de l'air interstitiel.

- Choisir le diamètre intérieur du tube souterrain le plus proche du matériau utilisé. Les options sont les suivantes : 0,142 m, 0,185 m, 0,273 m, 0,356 m, 0,457 m, 0,578 m, 0,762 m et 1,07 m (0,356 m et 0,578 m n'ont pas été modélisés explicitement, mais les résultats sont interpolés dans l'outil en fonction des diamètres les plus proches). Les épaisseurs correspondantes des parois des tubes sont : 0,01 m, 0,02 m, 0,02 m, 0,03 m, 0,04 m, 0,05 m, 0,06 m. Pour le tube de 1,07 m, deux options supplémentaires en ce qui concerne le matériau sont disponibles : le béton et l'acier galvanisé. Les épaisseurs correspondantes des parois du tube sont : 0,13 m et 0,003 m.

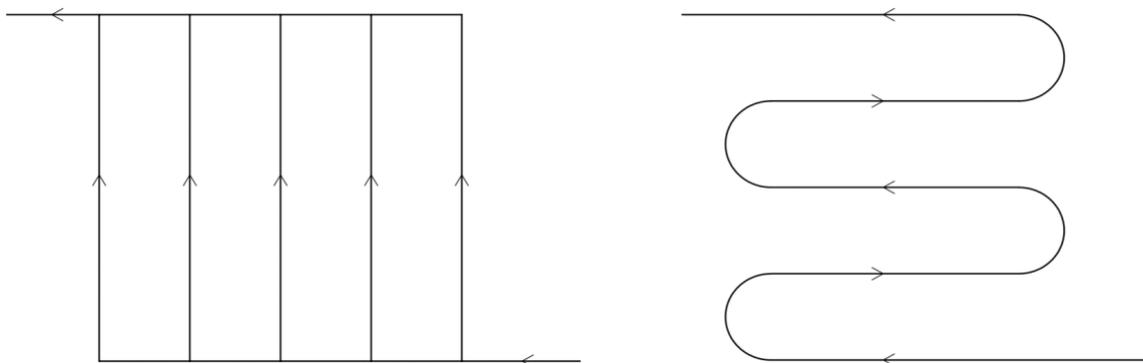
Si le matériau des tuyaux est ondulé, comme un tuyau de drainage ou de l'acier galvanisé, utiliser le diamètre intérieur le plus élevé. Toutefois, l'utilisation de tubes ondulés n'est pas recommandée en raison de problèmes de drainage du condensat. Un type courant de tuyau de drainage en polyéthylène est une construction à double paroi avec un tuyau en polyéthylène à surface extérieure ondulée collé à un tuyau en polyéthylène à surface intérieure lisse. Le diamètre correspondrait à l'épaisseur de la surface intérieure du tuyau.

Choisir le type de matériau pour le tube parmi les trois options (polyéthylène, béton, acier). Choisir du polyéthylène pour tous les matériaux en plastique, car leur conductivité thermique est semblable. Les autres matériaux ne sont disponibles que pour des tubes de 1,07 m de diamètre.

- Veillez entrer un rendement des ventilateurs compris entre 0 et 1. Le rendement des ventilateurs est celui du ventilateur qui aspire l'air par les tubes souterrains. Il peut s'agir d'un ventilateur dédié ou d'un ventilateur de traitement de l'air, qui peut être considéré comme la puissance supplémentaire

du ventilateur que les tubes souterrains ajoutent au système de circulation de l'air. Le rapport des extrants fournira une estimation de la puissance supplémentaire du ventilateur nécessaire en raison du système d'échangeur thermique terre-air. Si le système est suffisamment petit pour que le ventilateur de l'appareil de traitement de l'air du bâtiment puisse accueillir le système d'échangeur thermique terre-air sans en augmenter la taille, entrer une efficacité de 1.

11. Entrer le coefficient de perte supplémentaire pour un seul tube afin de tenir compte des coudes, du frottement des tuyaux, des obstructions (déflecteurs, filtres) et des raccords. Le coefficient de perte est utilisé pour générer la pression supplémentaire (statique) que le ventilateur doit surmonter pour maintenir la vitesse entrée. Les valeurs pour le tube unique seront utilisées pour tous les tubes dans une configuration avec collecteur et pour toutes les boucles dans une configuration de type méandre. Le coefficient de perte (C_o ou K) varie selon le diamètre du tube, la taille et la forme du raccord, le coude, etc. Additionner tous les coefficients de perte pour un tube unique, y compris l'entrée d'alimentation d'air et le raccordement au tube, ainsi que le raccordement du tube à un collecteur ou au système de circulation de l'air.
12. Entrer la configuration sous forme de collecteur ou de type méandre (voir la figure 9). Si la configuration n'est ni l'une ni l'autre, comme avec un tube unique, entrer le collecteur avec un tube unique (entrée suivante). Un tube unique avec de petits coudes est toujours considéré comme une configuration en collecteur avec un seul tube.



Configuration en collecteur avec 5 longueurs parallèles

Configuration de type méandre avec 5 boucles

Figure 9 : Configurations des tube souterrains

13. Entrer le nombre de tubes installés en parallèle pour une configuration en collecteur ou le nombre de boucles pour une configuration de type méandre. Si la configuration est irrégulière, utiliser son meilleur jugement.

Pour évaluer une installation terre-air autour du périmètre d'un bâtiment (voir figure 10), choisir une configuration de type méandre avec une boucle et l'espacement correspondant à la distance entre le tube et la fondation si le tube est dévié une fois autour de la fondation. Si le tube est dévié plus d'une fois, choisir l'espacement réel entre les tubes, ajouter une déviation à la quantité de déviations autour du bâtiment pour la quantité donnée de boucles (par exemple, pour un bâtiment avec trois déviations, entrer quatre boucles). Le modèle suppose qu'il n'y a aucune interaction avec le bâtiment

(conditions aux limites adiabatiques), ce qui peut avoir une incidence sur les résultats du rendement des tubes souterrains.

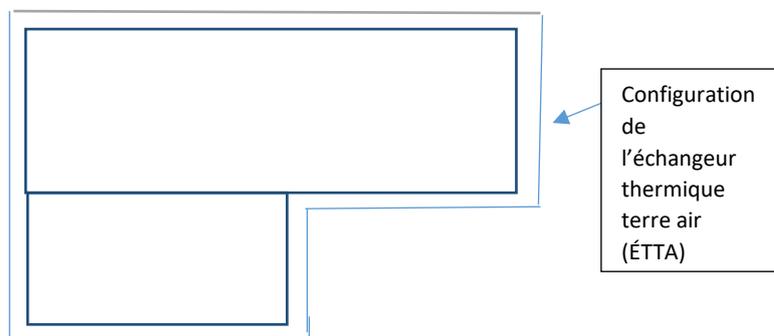


Figure 10 : Configuration du tube souterrain autour du périmètre de la fondation

Intrants de récupération de la chaleur de l'air de ventilation

Étant donné que l'analyse de récupération de la chaleur est calculée uniquement à des fins de comparaison, les entrées ci-dessous doivent correspondre aux entrées de vitesse du tube souterrain ou de débit d'air. Le dispositif de récupération de la chaleur suppose un flux d'air équilibré.

1. Entrer la température du point de consigne pendant la saison de refroidissement. Si une stratégie de d'abaissement de température est utilisée, entrer la température de refroidissement par heure en moyenne. Le refroidissement naturel (économiseur ou régulateurs de refroidissement nocturne) est automatiquement pris en compte lorsque l'enthalpie de l'air extérieur est inférieure à celle de l'air intérieur. Entrer de ce fait le point de consigne de la température de refroidissement mécanique. Ce point sera utilisé pour déterminer l'énergie potentielle de récupération de chaleur.
2. Entrer le point de consigne d'humidité relative souhaité du bâtiment (% HR) pendant la saison de refroidissement. Si le refroidissement de nuit est utilisé avec un régulateur d'enthalpie, déterminer alors l'humidité relative moyenne souhaitée pendant la saison de refroidissement avec refroidissement mécanique.
3. Entrer la température du point de consigne pendant la saison de chauffage. Comme pour l'intrant du point de consigne de refroidissement, calculer la température moyenne du point de consigne en fonction des abaissements de température.
4. Entrer le point de consigne d'humidité relative souhaité du bâtiment (% HR) pendant la saison de chauffage.
5. Entrer l'efficacité de récupération de la chaleur à (35 °C, 0 °C, -25 °C). L'efficacité de récupération nominale indiquée sur la documentation relative à l'équipement est adéquate. Ne pas inclure les préchauffeurs électriques et les impacts du dégivreur sur l'efficacité, car l'intrant requis est l'efficacité centrale uniquement liée à la température et à l'humidité. La stratégie de dégivrage n'est pas incluse dans l'analyse comparative.
6. Entrer le mois de début et de fin de la saison de refroidissement. Il s'agit de la période de l'analyse comparative du refroidissement et le calcul sera effectué pour toutes les heures du mois.

7. Entrer la pression (en pascals) dans le noyau de récupération de la chaleur du côté de l'alimentation du dispositif de récupération de la chaleur ou de l'énergie. Cette valeur sert à calculer les besoins en puissance du ventilateur ou du moteur d'alimentation. Elle comprend les effets des filtres à air, des dégivreurs, des préchauffeurs, des registres de dérivation et des conduits. Les valeurs types sont de 4 à 45 pascals pour les roues enthalpiques et de 7 à 30 pascals pour les échangeurs à plaque et boucles de glycol.
8. Entrer la pression (en pascals) dans le noyau de récupération de la chaleur du côté échappement du dispositif de récupération de la chaleur ou de l'énergie. Cette valeur sert à calculer les besoins en puissance du ventilateur d'extraction ou de reprise ou du moteur d'évacuation. Elle comprend les effets des filtres, des registres de dérivation et des conduits. Les valeurs par défaut types sont semblables aux hypothèses du côté de l'alimentation.
9. Entrer l'efficacité du ventilateur de soufflage ou d'extraction ou du moteur sous forme de valeur décimale.

3.3 Rapport de sortie de l'outil de conception

Une fois les intrants saisis, les extrants sont automatiquement calculés et la feuille de calcul est remplie. Premièrement, un rapport sommaire est présenté au tableau 6. Dans la cellule orange se trouve l'emplacement de la base de données, dans les cellules bleues figurent les intrants, et en rouge se trouve le résumé des extrants. Le résumé des données de sortie comprend :

1. Nombre réel de puits
2. Débit d'air (m^3/h et pi^3/min)
3. Puissance supplémentaire du ventilateur (en watts) basée sur le débit, la chute de pression et le rendement du ventilateur
4. Chute de pression (en Pa) dans les tubes (à l'exclusion des influences de la pression des entrées d'air et du collecteur à moins que celles-ci n'aient été prises en compte dans les coefficients de perte)

Tableau 6

Rapport sommaire des extrants

Débit et résultats des ventilateurs

| | | |
|-----------|--|-----|
| Résultats | Quantité réelle de tubes | 15 |
| | Débit d'air [m^3/h] | 855 |
| | Débit d'air [pi^3/min] | 503 |
| | ΔP à travers les tubes et pertes mineures (Pa) | 18 |
| | Consommation supplémentaire du ventilateur due à l'échangeur air-sol [W] | 8 |
| | Consommation supplémentaire du ventilateur causée par le système de récupération d'énergie [W] | 95 |

Des graphiques du transfert mensuel de chaleur entre les tubes pour le chauffage et le refroidissement sont également fournis. Un exemple est fourni à la figure 11 et le potentiel total de chauffage ou de refroidissement par rapport au système de comparaison de récupération de chaleur entré est fourni à la figure 12. L'entrée de la saison de refroidissement pour le système comparatif de récupération de la chaleur détermine le potentiel de récupération de la chaleur, pour le chauffage ou le refroidissement, tandis que le système d'échangeur thermique terre-air calcule le potentiel énergétique net pour le mois en question (les

mois peuvent être partiellement de chauffage et de refroidissement). Par exemple, dans la figure 12, le mois d'avril est choisi (préalablement par l'utilisateur) comme étant une période de chauffage pour un système de récupération de chaleur, alors que le système d'ETTAa effectué des calculs révélant que le potentiel de refroidissement du mois d'avril était prédominant. En plaçant le curseur de la souris sur le graphique à barres, on obtient la valeur réelle en kWh. Selon les données du mois d'avril, la figure 11 présentait un potentiel de chauffage de 129,75 kWh et un potentiel de refroidissement de 421,56 kWh. Les données présentées à la figure 12 représentent l'effet net (290 kWh).

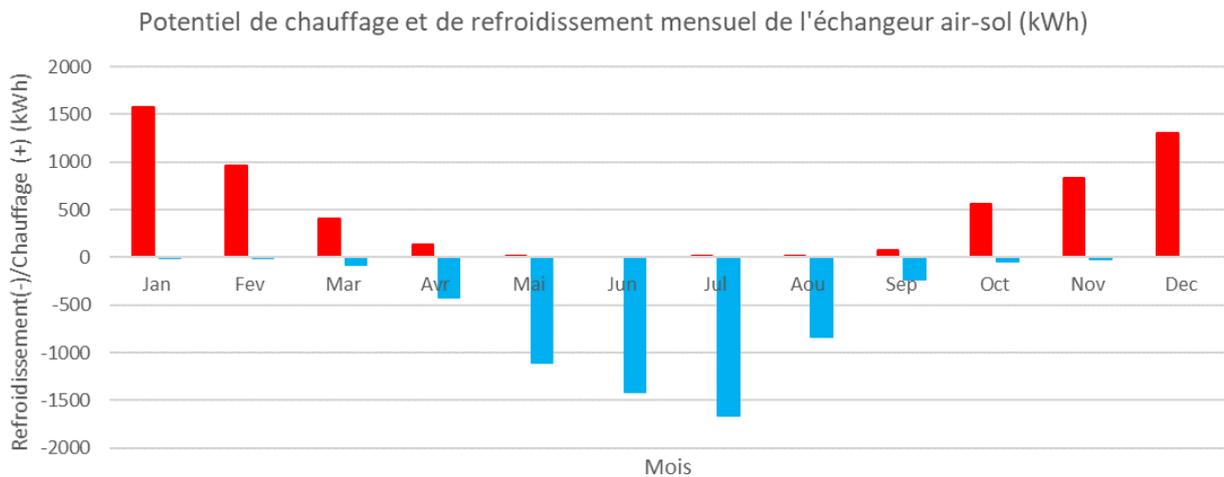


Figure 11 : Potentiel mensuel total de chauffage et de refroidissement

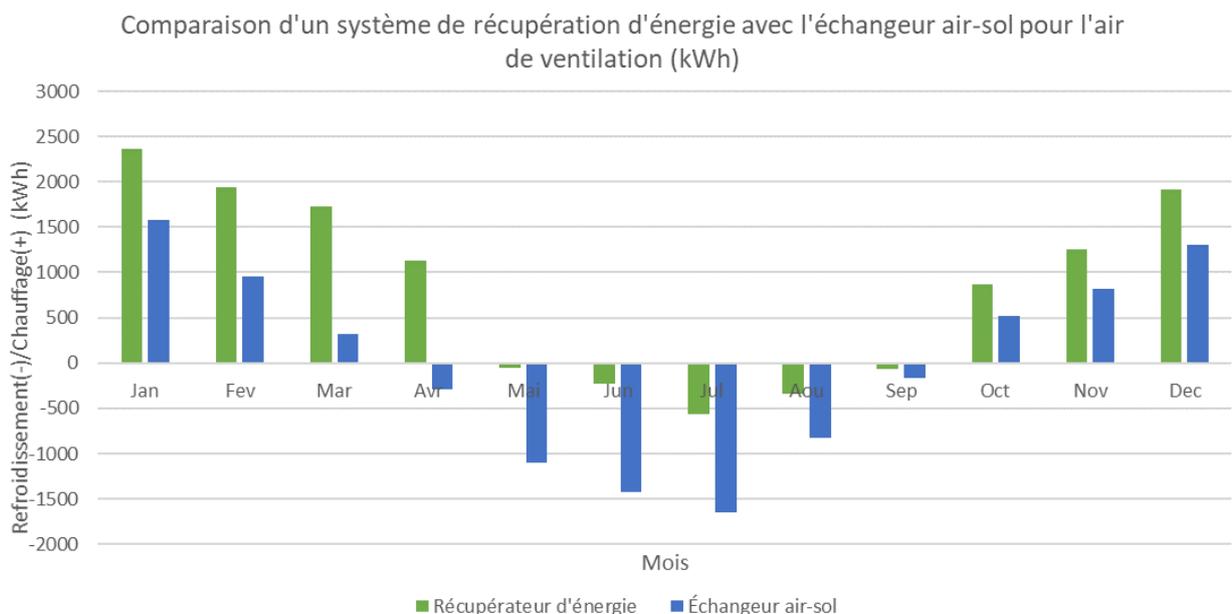


Figure 12 : Comparaison entre les systèmes d'échangeurs thermiques terre-airs et les systèmes de récupération de l'énergie

La figure 13 présente un graphique du « Profil mensuel de la température quotidienne moyenne ». Ce graphique fournit un résumé de la température d'entrée (température ambiante bulbe sec) et de la température de sortie (préchauffé/prérefroidi) des tube souterrains. Il s'agit du profil horaire moyen du mois.

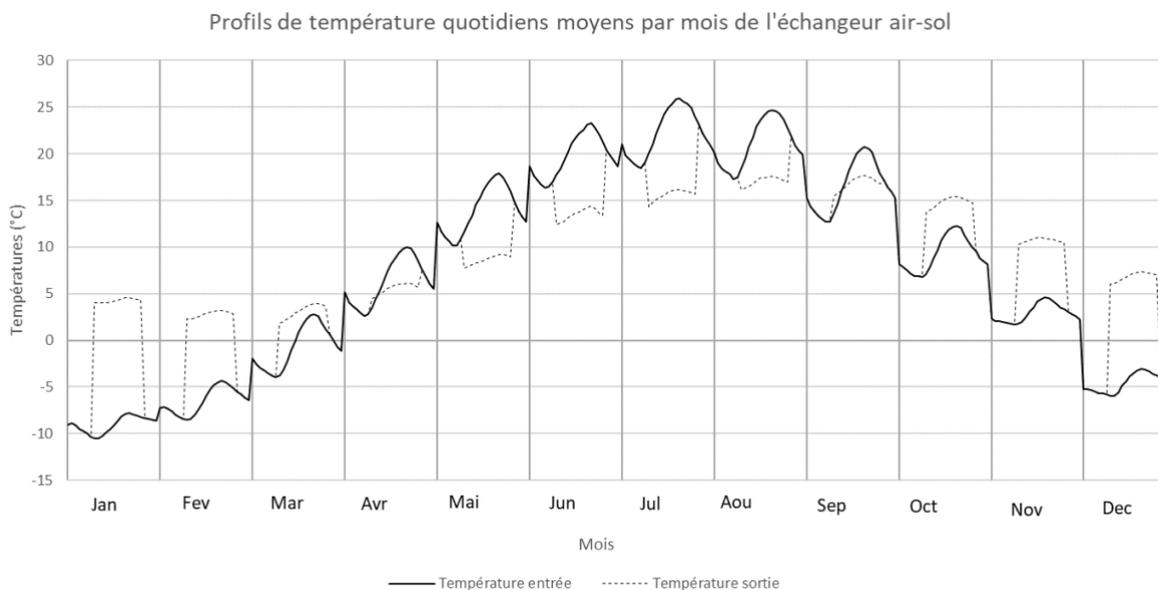


Figure 13 : Prototype du profil mensuel de la température quotidienne moyenne

La figure 14 fournit les données présentées aux figures 11 et 12 pour l'énergie de chauffage et de refroidissement. Également, une probabilité de condensation ou de gel dans les tubes est présentée pour chaque mois.

| Énergie mensuelle fournie par l'échangeur air-sol (kWh) | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|--------------|
| | Jan | Fev | Mar | Avr | Mai | Jun | Jul | Aou | Sep | Oct | Nov | Dec | Total |
| Chauffage | 1577.50 | 958.89 | 401.86 | 129.75 | 5.83 | 0.00 | 14.35 | 5.47 | 71.31 | 565.83 | 833.61 | 1305.56 | 5863.89 |
| Refroidissement | -1.58 | -0.94 | -75.69 | -421.56 | -1103.33 | -1418.33 | -1667.50 | -834.17 | -232.31 | -46.22 | -15.28 | 0.00 | -5819.44 |
| Total | 1577.50 | 958.89 | 326.17 | -290.00 | -1098.61 | -1418.33 | -1651.39 | -830.00 | -161.00 | 518.89 | 820.56 | 1305.56 | 55.75 |
| Probabilité de condensation / givre | FAIBLE | FAIBLE | FAIBLE | MOYENNE | MOYENNE | ÉLEVÉE | ÉLEVÉE | MOYENNE | MOYENNE | FAIBLE | FAIBLE | FAIBLE | |

| | | |
|---|--|--|
| FAIBLE = Condensation ou givre moins de 5% du temps | MOYENNE = condensation ou givre entre 5 et 25% du temps | ÉLEVÉE = condensation ou givre plus de 25% du temps |
|---|--|--|

Figure 14 : Résultats de l'énergie de chauffage et de refroidissement

La figure 15 présente le potentiel annuel de chauffage et de refroidissement du dispositif de récupération de chaleur entré à des fins de comparaison. Il s'agit du potentiel de récupération de l'énergie de base net de l'énergie du ventilateur. Cette figure n'inclut pas l'effet des préchauffeurs et de l'énergie de dégivrage.

| | Jan | Fev | Mar | Avr | Mai | Jun | Jul | Aou | Sep | Oct | Nov | Dec |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|
| Chauffage/Refroidissement | 2366.73 | 1942.34 | 1732.33 | 1127.96 | -48.04 | -226.97 | -558.83 | -345.58 | -64.60 | 864.11 | 1258.23 | 1912.08 |

Figure 15 : Puissance du dispositif de récupération de l'énergie

Un autre graphique est présenté dans l'onglet RésultatsDétailés. Ce graphique présente la température horaire moyenne mensuelle d'entrée et de sortie du tube souterrain pour les entrées de données spécifiques. Il s'agit des données utilisées dans les profils quotidiens moyens (figure 13). Les données sont présentées à titre d'information et peuvent être entrées dans un moteur de simulation horaire à des fins de modélisation de la conception détaillée.

3.4 Incidence des conditions météorologiques sur les résultats de l'outil de conception

L'outil de conception utilise les données météorologiques des Fichiers météorologiques canadiens pour le calcul énergétique (FMCCE), un fichier de données horaires créé à partir de 30 années de données enregistrées ou modélisées (1984 à 2014). Tandis que les données moyennes à long terme indiquent une tendance moyenne pour l'avenir, le rendement d'un tube souterrain ou de tout équipement CVCA est fondé sur des données réelles localisées. Afin de comprendre la corrélation entre la moyenne à long terme et les données météorologiques réelles mesurées, l'outil de conception a été réalisé à l'aide des données du FMCCE et des données réelles pour les années 2017 et 2018 d'Ottawa.

Il a été réalisé pour la configuration de l'échangeur thermique terre-air indiquée au Tableau 7 :

Tableau 7

Liste des intrants requis

| | |
|--|--------------------------|
| Horaire | En continu |
| Vitesse (m/s) | 1 |
| Longueur (m) | 65 |
| Facteur d'espacement | 2 D _e |
| Profondeur (m) | 3 |
| Type de sol | Sol lourd et humide |
| Diamètre intérieur (m) | 0,185 |
| Matériau | Polyéthylène |
| Efficacité du ventilateur (0.0 η ≤ 1.0) | 0,9 |
| Somme des coefficients de perte mineurs pour un seul tube (C ₀) | 15 |
| Type de configuration | Distributeur/Collecteurs |
| Si configuration distributeur/collecteur: quantité de tubes parallèles. Si configuration méandres: nombre de passages de tubes (Nombre entier ≥ 1) | 6 |

Les résultats sont présentés dans les figures 16 à 18. La différence en pourcentage par rapport aux résultats des FMCCE était une augmentation de 2,6 % de la production d'énergie pour le chauffage en utilisant les données météorologiques réelles de 2018 et une réduction de 7 % de la production d'énergie pour le chauffage en utilisant les données météorologiques réelles de 2017. La différence en pourcentage par rapport aux résultats des FMCCE était une augmentation de 18,8 % de la production d'énergie pour le refroidissement en utilisant les données météorologiques réelles de 2018 et une augmentation de 6,7 % de la production d'énergie pour le refroidissement en utilisant les données météorologiques réelles de 2017.

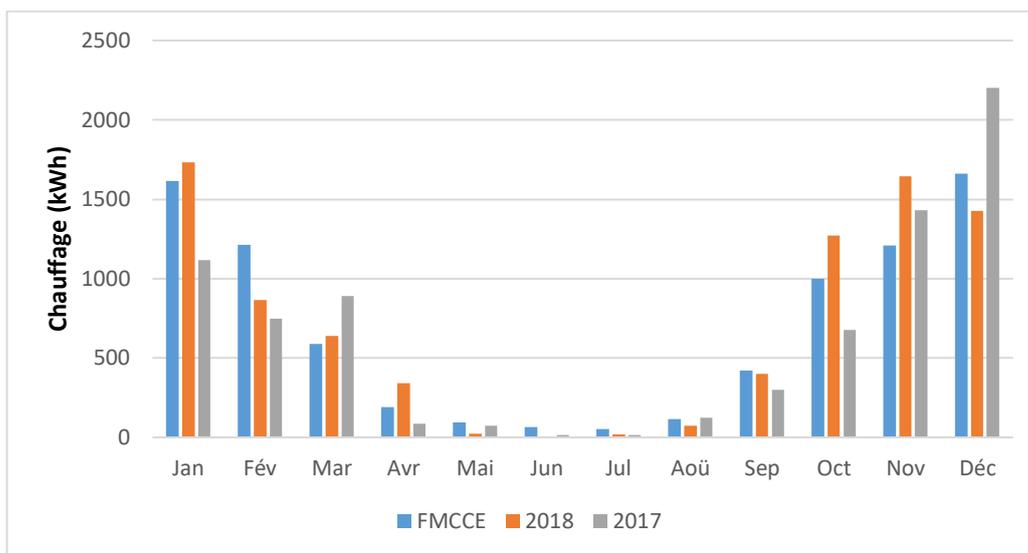


Figure 16 : Production mensuelle de chauffage

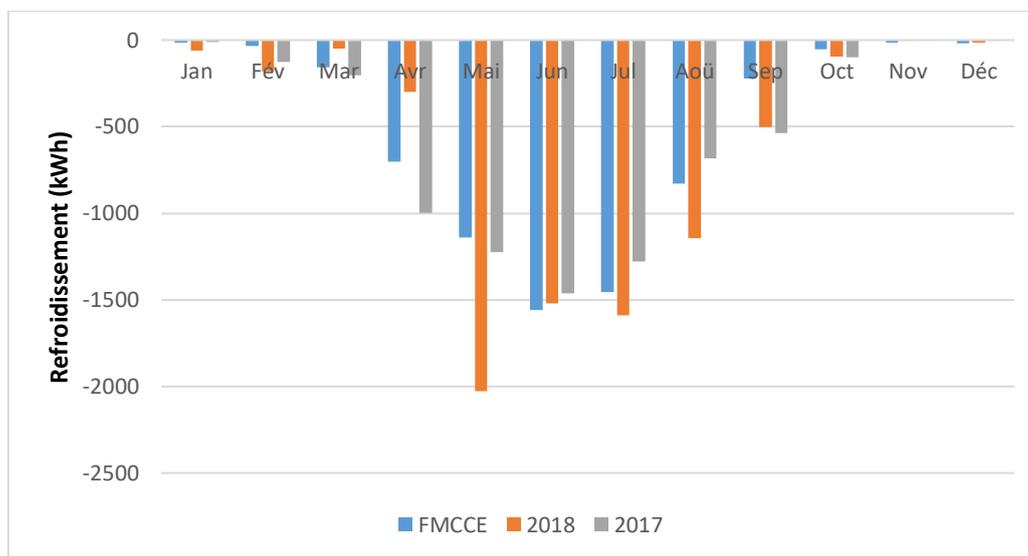


Figure 17 : Production mensuelle de refroidissement

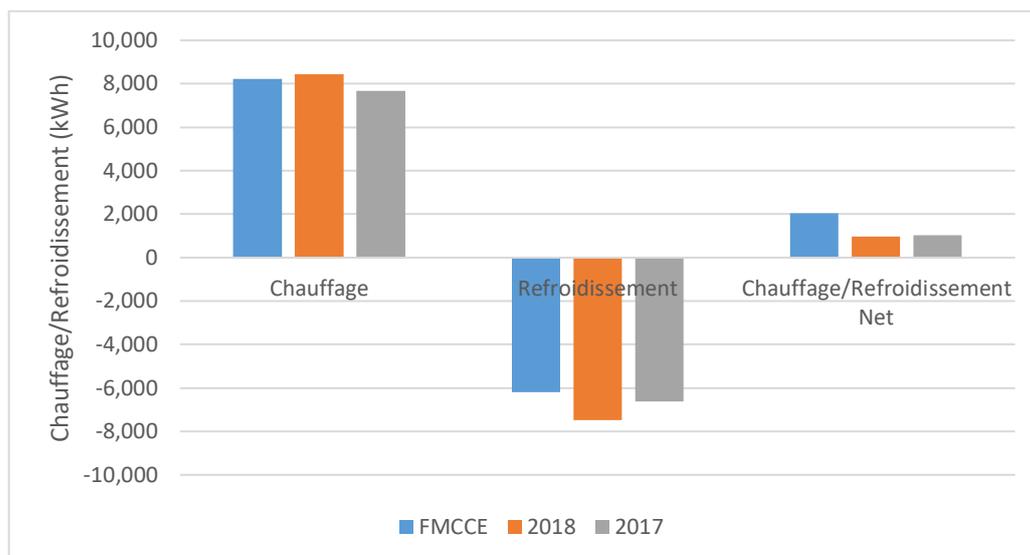


Figure 18 : Production de chauffage, refroidissement et bilan net annuel

3.5 Comparaison des prévisions de l’outil de conception avec les données mesurées

Entre 2015 et 2018, un programme de surveillance détaillé a été réalisé pour deux projets d’échangeur thermique terre-airs dans la région de Toronto. Surveillance ayant eu lieu à l’Université de Toronto : Le campus de Scarborough est présenté ici, car ce site a permis une surveillance plus détaillée et l’inclusion de mesures de la conductivité et de la diffusivité du sol en fonction des saisons (à l’aide d’un analyseur de propriétés thermiques KD2 Pro). Le site comprend 6 tubes souterrains en béton de longueur variable (20 à 30 mètres) et de 2 mètres de diamètre, chacun comprenant une entrée d’air. Les tubes sont reliés à un grand collecteur de plénum d’alimentation qui est relié au système de circulation de l’air du bâtiment. L’ensemble du système d’échangeur thermique terre-air préchauffe et pré-refroidi entre 26 000 et 36 000 pi³/min d’air extérieur.

Une surveillance détaillée a été effectuée sur 3 des 6 puits, ce qui a permis de réduire au minimum la surveillance sur les 3 autres puits. Dans le cadre de la surveillance détaillée, des stations de surveillance ont été installées à l’entrée de chaque puits, à leur point médian et à leur point de rejet dans le collecteur de plénum d’alimentation. À chaque station, des capteurs de température de surface des tubes souterrains et des capteurs de température du sol ont été installés dans les 4 directions cardinales; la vitesse de l’air, la température et l’humidité ont été mesurées dans le flux d’air. De plus, une sonde de conductivité du sol a été installée. La surveillance minimale des trois autres puits comprenait la température de l’air, l’humidité et la vitesse, ainsi que l’entrée, le point médian et le point de rejet de chaque puits. La température de la surface des puits et du sol a été omise. Les données ont été continuellement mesurées et des données moyennes de 3 minutes ont été archivées sur une période de 13 mois (d’août 2017 à septembre 2018).

Les résultats de la surveillance ont été comparés aux prédictions du modèle et les résultats sont présentés dans la figure 19 pour l’un des puits (résultats assez semblables pour les deux autres puits surveillés en détail). Les unités présentées sur l’axe des ordonnées sont en kilojoules. Les données mesurées et modélisées sont raisonnablement bien suivies, excepté en hiver. Cela est dû à une stratégie de contrôle SGC erroné qui affecte les données mesurées, qui implique de contourner le tube souterrain lorsque la température de l’air extérieur est inférieure à 5 C.

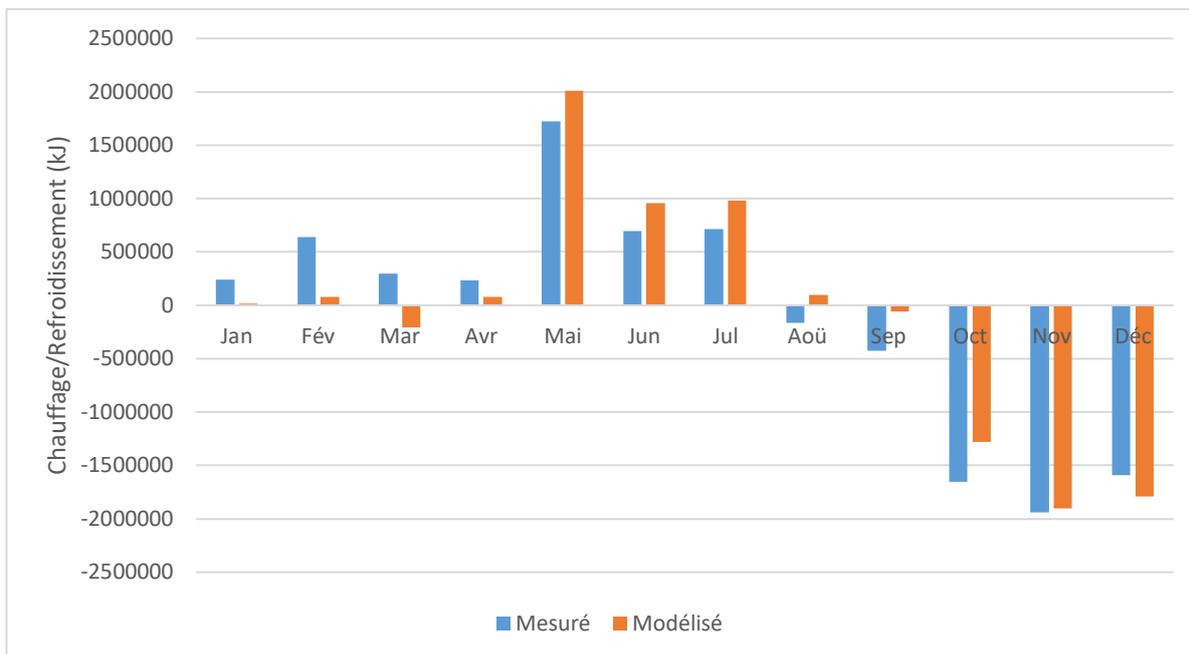


Figure 19 : Résultats comparatifs entre données mesurées et modélisées

4.0 Surveillance in situ du rendement énergétique de l'échangeur thermique terre-air

Cette section décrit certains points de contrôle recommandés pour une simple évaluation du rendement des tubes souterrains. Il est recommandé de prendre des mesures sub-horaires (les moyennes horaires des mesures sub-horaires sont appropriées). Il ne s'agit pas de recommandations exhaustives, et chaque projet doit être évalué avec soin.

Températures d'entrée et de sortie et humidité relative (HR)

Les températures d'entrée et de sortie doivent être monitorées avec les capteurs installés approximativement au centre du tube (voir figure 20). Lorsque cela est possible, l'ajout de capteurs d'humidité relative à l'entrée et à la sortie constitue un excellent complément aux capteurs de température, et ce, à peu de frais. Le fait d'avoir une température et une HR permet de vérifier si la condensation s'est produite dans les tubes en comparant les températures des points de rosée d'entrée et de sortie et en calculant le refroidissement latent.

Si plusieurs tubes sont installés en parallèle, installer le capteur de température de sortie ou d'humidité relative près de l'extrémité du collecteur s'il n'est pas possible de mesurer tous les tubes individuellement.



Figure 20 : Schéma de positionnement des sondes de vitesse et de température.

Débit d'air

Installation d'un capteur de vitesse de l'air

Pour mesurer le débit volumétrique, un capteur de vitesse doit être installé dans au moins un puits ou un collecteur. Le débit volumétrique ne sera pas parfaitement équilibré entre plusieurs tubes; par conséquent, un collecteur pourrait être plus approprié si possible pour mesurer le débit total. Le capteur de vitesse doit être installé au centre du puits.

Production d'énergie thermique

Le taux sensible de transfert de chaleur dans le tube peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\dot{Q}_s = \rho \dot{V} C_p (T_{\text{sortie}} - T_{\text{entrée}})$$

où ρ est la densité de l'air, V est le débit volumétrique, C_p la chaleur spécifique de l'air, et $T_{sortie} T_{entrée}$ sont les températures de sortie et d'entrée.

Le taux de transfert de chaleur latente peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\dot{Q}_l = \rho \dot{V} i_{fg} (W_{sortie} - W_{entrée})$$

où i_{fg} est l'enthalpie de la vaporisation de l'eau, W_{sortie} est le rapport d'humidité à la sortie, et $W_{entrée}$ est le rapport d'humidité à l'entrée

Autres points de données faisant l'objet d'une surveillance

Parmi les autres points à prendre en considération pour la surveillance, on peut citer : la consommation d'énergie des équipements électriques (par exemple, les lampes UV pour la qualité de l'air et les ventilateurs), les températures du sol en champ lointain, les températures près du sol, les températures de la surface intérieure et extérieure des tubes souterrains.

Partage des données de surveillance pour améliorer l'outil de conception

CanmetÉNERGIE apprécierait grandement toute occasion d'obtenir de nouveaux ensembles de données de monitoring. De nouvelles données pourraient nous aider à valider notre outil de conception et servir d'études de cas pour d'autres concepteurs (avec leur permission). N'hésitez pas à communiquer avec nous si vous avez des données de surveillance que vous seriez disposé à partager.

Pour toute question relative à la surveillance, veuillez communiquer avec :

Michel Tardif, ing.

Ingénieur de recherche, R&D Bâtiments résidentiels et commerciaux

CanmetÉNERGIE, Ressources naturelles Canada

Gouvernement du Canada

1 Haanel Drive

Ottawa (Ontario) Canada K1A 1M1

michel.tardif@canada.ca

Tél. : 613-943-2263

Télécopieur : 613-947-1599

[https://www.rncan.gc.ca/energie/bureaux-et-labos-de-](https://www.rncan.gc.ca/energie/bureaux-et-labos-de-energie/canmetenergie/5716?_ga=2.156532347.1972125641.1602182686-1446931839.1602182686)

[energie/canmetenergie/5716?_ga=2.156532347.1972125641.1602182686-1446931839.1602182686](https://www.rncan.gc.ca/energie/bureaux-et-labos-de-energie/canmetenergie/5716?_ga=2.156532347.1972125641.1602182686-1446931839.1602182686)

Références

- Ahmed, A., Ip, K., Miller, A., & Gidado, K. (2009). Thermal performance of earth-air heat exchanger for reducing cooling energy demand of office buildings in the United Kingdom. *Building Simulation* (pp. 2228-2235). Glasgow: IBPSA.
- Barnard, N., & Jaunzens, D. (2001). *Low Energy Cooling: Technology Selection and Early Design Criteria IEA-BCS Annex 28 Report 2*. London: Construction Research Communications Ltd.
- Baten, M., Akter, M., Miah, M., Hassan, M., & Mobin, M. (2015). Textural Influence on Surface and Subsurface Soil Temperatures under Various Conditions. *Journal of Environmental Science and Natural Resources*, 147-151.
- Benkert, S., Heidt, F., & Schöler, D. (1997). Calculation tool for earth heat exchangers GAEA. *Building Simulation*. Prague: IBPSA.
- Birch, F. (1995). *Handbook of Physical Constants, Section 17 Thermal Conductivity and Diffusivity*. Geological Society of America.
- Brideau, S., Lubun, M., & Tardif, M. (2018). Early Design Tool for Earth Tubes in Canada. *RoomVent and Ventilation 2018*. Espoo, Finland.
- Butler, T. L. (2018). Enhanced IEQ through Passive Earth Tubes in Canada. *39th AIVC - 7th TightVent & 5th Venticool Conference*. Juan-les-Pins: AIVC.
- Darius, D., Misaran, M., Rahman, M., Ismail, M., & Amaludin, A. (2017). Working parameters affecting earth-air heat exchanger (EAHE) system performance for passive cooling: A review. *International Conference on Materials Technology and Energy*. IOP Publishing Ltd.
- de Jong van Lier, Q., & Durigon, A. (2012). *Soil Thermal Diffusivity Estimated From Data of Soil Temperature and Single Soil Component Properties*. Sao Paulo.
- Elminshawy, N. A., Siddiqui, F. R., Qazi, F. U., & Addas, M. F. (2017). Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels. *Applied Thermal Engineering*, 1319-1327.
- Farouki, O. (1986). *Thermal Properties of Soils*. California.
- G.P. Williams and L. W. G. (1976). *Ground Temperatures*. Ottawa: Canadian Building Digest 26 National Research Council of Canada.
- Gan, G. (2014). Dynamic interactions between the ground heat exchanger and environments in earth-air tunnel ventilation of buildings. *Energy and Buildings*, 85, 12-22.
- Garde, D. F., Ayoub, J., Aelenei, D. L., Aelenei, D. D., & Scognamiglio, D. A. (2017). *Solution Sets for Net Zero Energy Buildings*. Berlin: Ernst & Sohn.
- George, C. K. (2010). Earth-tubes for Building Heating and Cooling in Drylands. *Annal of Arid Zone* 40, 285-301.

- 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. *Doctoral Thesis*. Université de Genève.
- Hollmuller, P., & Lachal, B. M. (1998). *TRNSYS compatible moist air hypocaust model*. Université de Genève.
- Hollmuller, P., & Lachal, B. M. (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.
- Kaushal, M. (2017). Geothermal cooling/heating using ground heat exchanger for various experimental and analytical studies: Comprehensive review. *Energy and Buildings*, 634-652.
- Kelker, S., Choudhary, S., Kushwaha, S., Kumar, S., Siddhey, S., & Vishwakarma, S. (2016). Earth Tube Heat Exchangers. 31.
- Kusuda, T., & Achenbach, P. (1965). *Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States*. Washington: National Bureau of Standards.
- Lee, K. H., & Strand, R. K. (2008). The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. *Energy and Buildings*, 40, 486-494.
- McAdams, W. H. (1954). *Heat Transmission* (éd. Third). New-York: McGraw-Hill.
- Meteorological Service of Canada. (2018a). *Engineering Climate Datasets*. Retrieved February 8, 2018, from http://climate.weather.gc.ca/prods_servs/engineering_e.html
- Meteorological Service of Canada. (2018b). *Canadian Climate Normals*. Retrieved February 8, 2018, from http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/
- Moncef, K., & Kreider, J. F. (1996). Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel. *Energy Conversion and Management*, 37(10), 1561-1574.
- Moseley, M. (s.d.). Récupéré sur www.rehau.com.
- Muehleisen, R. T. (2012). Simple design tools for earth-air heat exchangers. *SimBuild* (pp. 723-730). Madison, WI: IBPSA-USA.
- Ouellet, C. (1975). *Soil and Air Temperatures at Ottawa: Publication 1541-1975*. Ottawa: Agriculture Canada.
- PACTE. (2017). *Calepin de Chantier: Puits Climatiques en Habitat Individuel et en Tertiaire*. Récupéré sur www.programmepacte.fr.
- Patterson, W. (1994). *The Physics of Glaciers*. Tarrytown, New York: Elsevier Science Inc.
- Peretti, C., Zarella, A., De Carli, M., & Zecchin, R. (2013). *The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE). A literature review*. Padova.
- Pollack, H. N., Hurter, S. J., & Johnson, J. R. (1993). Heat flow from the earth's interior: analysis of the global data set. *Reviews of Geophysics*, 31(3), 267-280.

- Sturm, M., Holmgren, J., König, M., & Morris, K. (1997). The thermal conductivity of seasonal snow. *Journal of Glaciology*, 43(143), 26-41.
- Tardif, M., Lubun, M., Ouazia, B., Booth, D., & Nordquist, B. (2014). Energy Performance of Concrete Earth Tubes for Pre-Heating and Pre-Cooling of Supply Air in Cold Climates. *9th International Masonry Conference*, (p. 7). Guimaraes, Portugal.
- Vikas Bansal, R. M. (2009). Performance analysis of earth-pipe-air exchanger for winter heating. *Energy and Buildings* 41, 1151-1154.
- Vlad, G.-E., Ionescu, C., Necula, H., & Badea, A. (2013). *Thermoeconomic design of an earth to air heat exchanger used to preheat ventilation air in low energy buildings*. Bucharest.
- Zhang, J., & Haghghat, F. (s.d.). *CFD Modelling of Heat Convection in a Large Cross-Section Earth-to-Air heat Exchanger*. Montreal: Department of Building, Civil and Environmental Engineering Concordia University.