

# Le dimensionnement de systèmes géothermiques avec tuyaux Geoperformx

Jasmin Raymond, géo., Ph.D.,  
Conseiller en recherche, HydroGeoPro – jraymond@hydro-geo.net  
Alexandre Léger, ing.,  
Chargé de projet, IPL extrusion – aleger@ipl-plastics.com

## Introduction

Depuis près d'un an, la compagnie IPL fabrique un tuyau conçu pour la filière géothermique. Ce dernier est fabriqué de polyéthylène haute densité (PEHD) dont la conductivité thermique a été améliorée. Le tuyau, nommé **Geoperformx**, contient des nanoparticules lui conférant une conductivité thermique de  $0,7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  ( $0,4 \text{ Btu hr}^{-1}\text{pi}^{-1}\text{°F}^{-1}$ ), soit 75 % de plus que le PEHD conventionnel. Lorsqu'utilisé avec système de pompes à chaleur couplées au sol (PACCS), le tuyau permet de réduire la longueur ou le nombre de forages nécessaires à l'installation. La conception des échangeurs de chaleur doit être optimisée pour favoriser les économies associées à l'installation d'un système avec tuyaux **Geoperformx**. Certains logiciels de dimensionnement utilisés à cette fin permettent de réaliser facilement le travail, alors que d'autres demandent plus efforts ou sont incompatibles. Les caractéristiques du tuyau **Geoperformx** et des logiciels de dimensionnement sont présentées dans cet article afin d'orienter un concepteur qui désire utiliser ce nouveau produit. Des calculs de dimensionnement effectués avec différents logiciels sont ensuite donnés en exemples pour démontrer les économies de forage qui sont à envisager avec l'utilisation du tuyau **Geoperformx**.

## Caractéristiques et avantages du tuyau Geoperformx

Le tuyau **Geoperformx** (Figure 1) est disponible en deux formats selon le standard américain ASTM D3035 pour les dimensions SDR-11 avec les diamètres nominaux 32 mm et 19 mm (1¼ po et ¾ po; Tableau 1). La résine utilisée pour extruder le tuyau, d'une conductivité thermique améliorée, facilite le transfert de chaleur. La résistance thermique du forage associée à un échangeur de chaleur équipé de tuyaux **Geoperformx** est donc plus faible. Dans une équation de dimensionnement d'un système de PACCS, la résistance thermique du forage est multipliée par la charge de pointe imposée au sous-sol (Bernier, 2000). Cette charge est généralement importante et une diminution de la résistance thermique permet de réduire la longueur ou le nombre de forages requis pour le fonctionnement adéquat d'un système.

**Figure 1.**  
Le tuyau **Geoperformx**, fait de PEHD amélioré.



**Tableau 1.**  
Propriétés thermiques et dimensions du tuyau **Geoperformx**.

Propriété	Valeur, unités SI	Valeur, unités impériales
Conductivité thermique	$0,7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	$0,40 \text{ Btu hr}^{-1}\text{pi}^{-1}\text{°F}^{-1}$
Chaleur massique	$1,958 \text{ JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$	$0,468 \text{ Btu lb}^{-1}\text{°F}^{-1}$
Masse volumique	$1,040 \text{ Kgm}^{-3}$	$64,9 \text{ lbft}^{-3}$

Propriété	Valeur, unités SI	Valeur, unités impériales
32 mm (1¼ po) SDR 11 ASTM D3035		
Diamètre interne	35 mm	1,36 po
Diamètre externe	42 mm	1,66 po
19 mm (¾ po) SDR 11 ASTM D3035		
Diamètre interne	22 mm	0,86 po
Diamètre externe	27 mm	1,05 po

L'efficacité du tuyau **Geoperformx** a d'abord été évaluée sur le terrain par Golder Associés en effectuant des tests de réponse thermique à l'usine d'IPL à Saint-Lazare (Pasquier et Groleau, 2009). Deux échangeurs de chaleur formés d'un tube en U espacé par des entretoises ont été aménagés dans des forages de 15,2 cm (6 po) de diamètre et remplis de sable de silice. Le premier échangeur était équipé de tuyaux **Geoperformx** et le second de tuyaux **VERSApipe**, soit du PEHD conventionnel dont la conductivité thermique est  $0,4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  ( $0,23 \text{ Btu hr}^{-1}\text{pi}^{-1}\text{°F}^{-1}$ ). Les essais de terrain ont révélé que le premier et second échangeurs avaient des résistances thermiques respectivement égales à  $0,068 \text{ m K W}^{-1}$  et  $0,082 \text{ m K W}^{-1}$  ( $0,036 \text{ hr ft °F Btu}^{-1}$  et  $0,043 \text{ hr ft °F Btu}^{-1}$ ).

Des travaux de modélisation numérique ont ensuite été entrepris au Centre spécialisé de technologie physique du Québec et à l'Université Laval pour optimiser la conception d'échangeurs fabriqués avec le tuyau **Geoperformx** (Raymond et coll., 2010; 2011). Des simulations de transfert thermique en deux et trois dimensions ont été effectuées avec le logiciel d'éléments finis Comsol Multi-physics pour des échangeurs formés d'un et deux tubes en U. Les résultats obtenus ont indiqué que le tuyau **Geoperformx** contribue à réduire la résistance thermique du forage de 6 à 24 %. Cette réduction est maximale lorsque les tuyaux sont espacés par des entretoises et que la conductivité thermique des matériaux de remplissage est élevée. Pour faire suite à ces travaux, des calculs de dimensionnement effectués pour des systèmes de PACCS sont présentés ci-dessous afin de quantifier les économies de forage associées au tuyau **Geoperformx**.

## Méthodologie

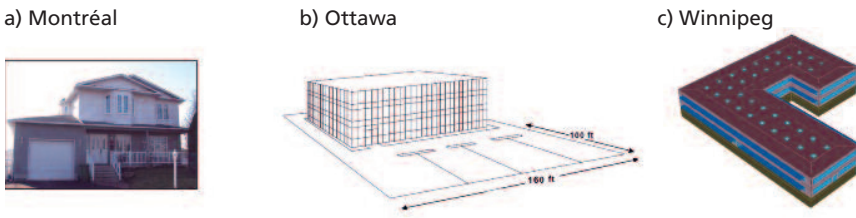
Une évaluation des principaux logiciels commerciaux utilisés pour le dimensionnement des systèmes de PACCS a servi à déterminer si ces derniers sont aptes à considérer les propriétés du tuyau **Geoperformx**. Les programmes évalués sont un chiffrier développé dans Excel<sup>1</sup> par Philippe et coll. (2010), EED<sup>2</sup>, eQuest<sup>3</sup>, GeoAnalyser<sup>4</sup>, GLD<sup>5</sup>, GLHEpro<sup>6</sup> et GS2000<sup>7</sup>. Des calculs de dimensionnement et des simulations de la température d'opération des systèmes de PACCS ont ensuite été réalisés avec a) GeoAnalyser pour une maison située en banlieue de Montréal, b) EED pour un bâtiment commercial situé à Ottawa et c) le chiffrier Excel et eQuest pour un second bâtiment commercial de plus grande taille situé à Winnipeg. Les bâtiments considérés sont illustrés à la Figure 2.

- 1 [www.ashrae.org/borehole.xls](http://www.ashrae.org/borehole.xls)
- 2 <http://www.buildingphysics.com/index-filer/Page1099.htm>
- 3 <http://doe2.com/equest/>
- 4 <http://www.geoanalyser.com/>
- 5 <http://www.groundloopdesign.com/>
- 6 <http://www.hvac.okstate.edu/glhepro/>
- 7 [http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-ncan.gc.ca/fra/outils\\_logiciels/g2000.html](http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-ncan.gc.ca/fra/outils_logiciels/g2000.html)





**Figure 2.** Bâtiments pour lesquels les systèmes de PACCS ont été dimensionnés.



**Revue des logiciels de dimensionnement**

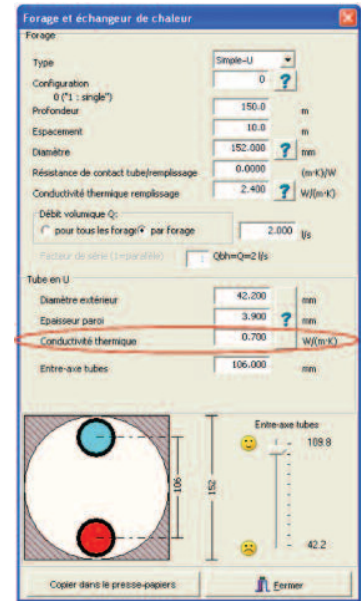
Pour chaque programme, la méthode utilisée pour calculer la résistance thermique du forage, ainsi que la possibilité d'ajuster de façon manuelle ce paramètre et la conductivité thermique du tuyau, ont été déterminées (Tableau 2). Les méthodes utilisées pour calculer la résistance thermique du forage sont de nature expérimentale (Remund, 1999) ou analytique (Bennet et coll., 1987; Hellström, 1991). La plupart des logiciels sont aptes à considérer le **Geoperformx** lors d'un dimensionnement par un ajustement manuel de la conductivité thermique des tuyaux (Figure 3). Le logiciel est alors entièrement compatible (chiffrier Excel, EED, eQuest, GLHEpro; +++). Quand cet ajustement n'est pas possible, un utilisateur doit évaluer la résistance thermique du tuyau ou du forage et entrer manuellement

le paramètre dans le logiciel. Le calcul est considéré simple lorsqu'il s'agit d'évaluer la résistance thermique du tuyau (GeoAnalyser; ++) et plus complexe lorsqu'il s'agit d'évaluer celle du forage (GLD; +). L'utilisation du chiffrier Excel (Philippe et coll., 2010) est recommandée pour faciliter l'évaluation de la résistance thermique du forage quand ce paramètre doit être calculé de façon manuelle dans un autre logiciel de dimensionnement comme GLD. Pour un seul cas, le logiciel n'a pas permis de tenir compte des propriétés du **Geoperformx** puisque des valeurs ne peuvent être assignées manuellement aux tuyaux (GS2000; -).

**Dimensionnements et simulations de systèmes types**

Les résultats obtenus pour les calculs effectués à tous les bâtiments sont présentés au Tableau 3. Dans chacun des cas, les

**Figure 3.** Exemple d'ajustement manuel de la conductivité thermique du tuyau avec le logiciel EED afin de considérer le **Geoperformx**.



échangeurs de chaleur seront aménagés dans des forages verticaux de 15,2 cm (6 po) de diamètre et remplis de sable de silice dont la conductivité thermique est 2,4 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> (1,39 Btu hr<sup>-1</sup>pi<sup>-1</sup>°F<sup>-1</sup>). Les tuyaux, d'un diamètre nominal de 32 mm (1¼ po) SDR-11, sont espacés avec des entretoises.

**Tableau 2.** Grille de comparaison des logiciels

Programme	Date de dernière mise à jour	Coût	Méthode pour calculer la résistance thermique du forage	Ajustement manuel de la résistance thermique du forage	Ajustement manuel de la conductivité thermique du tuyau	Paramètres de tuyaux HDPE standards dans la base de données	Compatible avec le <b>Geoperformx</b>
Chiffrier (Philippe et coll., 2010)	10-07-01	Gratuit	Hellström, 1991	Oui	Oui	Aucun	+++
EED V3.16	10-07-04	1000 US\$	Bennet, 1987	Oui	Oui	PE, SCH, SDR	+++
eQuest V3.64	10-08-25	Gratuit	Bennet, 1987	Non	Oui	SCH, SDR	+++
GeoAnalyser V1.0	Continue	99 à 395 CA\$	Remund, 1999	Non	Possible via la résistance thermique du tuyau	SCH, SDR	++
GLD V7.15	10-10-05	800 à 4250 US\$	Remund, 1999	Oui	Non	SCH, SDR	+
GLHEpro V4	07-10-25	525 à 725 US\$	Bennet, 1987	Oui	Oui	SCH, SDR	+++
GS2000 V3.0.1	08-05-02	Gratuit	?	Non	Non	SCH, SDR	-

**Tableau 3.**  
Sommaire des calculs de dimensionnement

Description du bâtiment	Lieu	Champ d'échangeurs de chaleur	Cond. thermique du sous-sol W/m <sup>2</sup> K <sup>-1</sup> /(Btu hr <sup>-1</sup> pi <sup>-1</sup> F <sup>-1</sup> )	Logiciel	Longueur de forage (m/pi)	Réduction <b>Geoperformx</b> (%)
Maison, 1075 pi <sup>2</sup>	Montréal, QC	1, <b>VERSA</b> pipe	3,97 2,29	GeoAnalyser	112 367	
Maison, 1075 pi <sup>2</sup>	Montréal, QC	1, <b>Geoperformx</b>	3,97 2,29	GeoAnalyser	103 338	8,0 %
Édifice à bureaux, 27 000 pi <sup>2</sup>	Ottawa, ON	4x6, <b>VERSA</b> pipe	3,50 2,02	EED	2 986 9 787	
Édifice à bureaux, 27 000 pi <sup>2</sup>	Ottawa, ON	4x6, <b>Geoperformx</b>	3,50 2,02	EED	2 663 8 737	10,8 %
Édifice à bureaux + serveurs, 27 000 pi <sup>2</sup>	Ottawa, ON	4x6, <b>VERSA</b> pipe	3,50 2,02	EED	3 556 11 667	
Édifice à bureaux + serveurs, 27 000 pi <sup>2</sup>	Ottawa, ON	4x6, <b>Geoperformx</b>	3,00 2,02	EED	3 556 10 505	10,0 %
Édifice à bureaux, 50 000 pi <sup>2</sup>	Winnipeg, MB	4x5, <b>VERSA</b> pipe	3,00 2,02	Chiffrier	2 670 8 760	
Édifice à bureaux, 50 000 pi <sup>2</sup>	Winnipeg, MB	4x5, <b>Geoperformx</b>	3,00 1,73	Chiffrier	2 503 8 212	6,3 %

Le calcul effectué avec GeoAnalyser suppose que la maison près de Montréal (Figure 2a) à des pertes et gains de chaleur de -21,5 kW et 10 kW (73,4 kBtu<sup>-1</sup> et 34,1 kBtu<sup>-1</sup>) lors des périodes de pointe en hiver et en été. La maison a besoin d'un seul forage qui est moins long de 8,0 % lorsque le tuyau **Geoperformx** est utilisé (Tableau 3).

Les charges de chauffage et de climatisation du bâtiment commercial à Ottawa (Figure 2b), dont le système est dimensionné avec EED, sont des charges mensuelles décrites par Morrison (2000). Les charges des mois de conception, soit janvier et juillet, sont - 47 906 kWh et 27 444 kWh (163 465 kBtu et 93 644 kBtu). Le dimensionnement effectué avec EED indique que le système aménagé avec des échangeurs de chaleur formés de tuyaux **Geoperformx** a besoin de 10,8 % moins de forages (Tableau 3). Un deuxième calcul de dimensionnement est effectué pour le même bâtiment en supposant qu'on y aménage une salle de serveurs informatiques ce qui requiert des besoins additionnels en climatisation de 5 000 kWh (17 061 kBtu) par mois tout au long de l'année. Le bâtiment demande désormais plus de climatisation que de chauffage et même dans ces conditions, le tuyau **Geoperformx** réduit la longueur de forage de 10,0 % (Tableau 3).

Le logiciel EED a aussi été utilisé pour simuler la température du fluide dans la boucle souterraine durant 25 ans d'opération pour les deux cas, sans et avec serveurs (Figure 4). Le système répondant aux besoins de climatisation des serveurs contribue à augmenter la température d'opération des échangeurs et conséquemment celle du sous-sol. Cette augmentation de température est équivalente pour les systèmes avec ou sans tuyaux **Geoperformx** puisqu'avec moins de forage et un meilleur transfert thermique, les performances des systèmes sont semblables.

Les charges horaires de chauffage et de climatisation ont été évaluées avec eQuest pour le bâtiment commercial situé à Winnipeg (Figure 2c). À cause de sa taille et des gains thermiques internes, ce bâtiment demande plus de climatisation que de chauffage. Les charges imposées au sous-sol sont 320,9 kW (1 095,0 kBtu<sup>-1</sup>) pour la charge horaire maximale, 94,4 kW (322,1 kBtu<sup>-1</sup>) pour la charge moyenne mensuelle du mois de conception et 31,6 kW (107,8 kBtu<sup>-1</sup>) pour la charge moyenne annuelle. Le système de PACCS envisagé pour le bâtiment a d'abord été dimensionné avec le chiffrier Excel (Philippe et coll., 2010) puisque eQuest ne permet pas de dimensionner un système.

Le programme eQuest est plutôt utilisé pour simuler les températures d'opération de la boucle souterraine sur une base horaire afin d'évaluer les économies d'énergie. Le calcul de dimensionnement indique que le bâtiment a besoin de 6,3 % moins de forages en utilisant le tuyau **Geoperformx** (Tableau 3). Dans ces conditions, les températures d'opération (Figure 5) et les économies d'énergie (Tableau 4) évaluées après 25 ans sont semblables pour les deux systèmes. Même avec moins de forages, les performances du système avec les tuyaux **Geoperformx** sont encore une fois équivalentes puisque le tuyau offre un meilleur transfert thermique.

## Conclusion

En diminuant la résistance thermique, le tuyau **Geoperformx** a réduit d'environ 6 à 11 % la longueur des forages requis pour les systèmes de PACCS dimensionnés. Cette réduction dépend de la conception des échangeurs de chaleur, des propriétés thermiques du sous-sol, des charges du bâtiment et de la méthode de calcul utilisée pour le dimensionnement. Un système opéré avec moins de forages et un tuyau **Geoperformx** peut offrir des performances semblables à un système avec plus de forages et un tuyau de PEHD conventionnel, même lorsque les charges de chauffage et de climatisation du bâtiment ne sont pas égales.

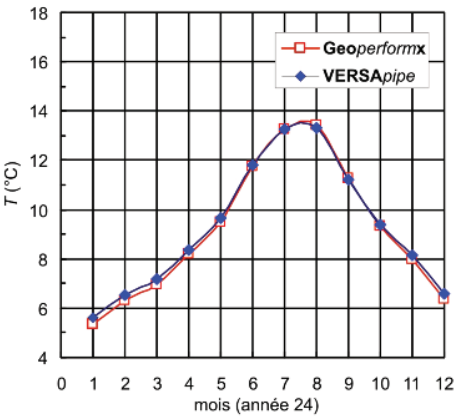




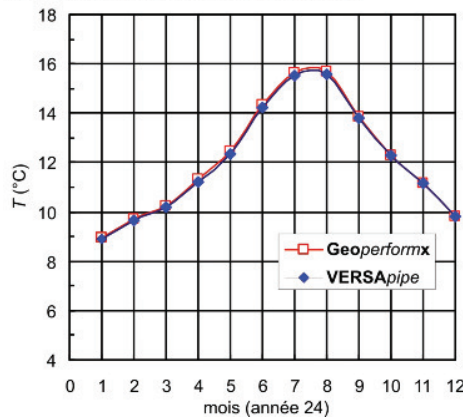
**Figure 4.**

Température moyenne d'opération des échangeurs de chaleur avec tuyaux **Geoperformx** et **VERSApipe**. Les simulations sont effectuées pour le système du bâtiment commercial situé à Ottawa sans a) et avec b) une salle de serveurs informatiques (Figure 2b).

a) Bâtiment à Ottawa sans serveur

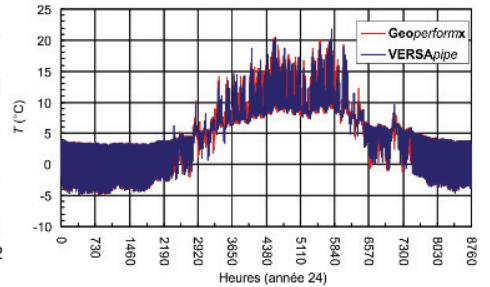


b) Bâtiment à Ottawa avec serveurs



**Figure 5.**

Température du fluide à la sortie des échangeurs de chaleur pour les systèmes avec tuyaux **Geoperformx** et **VERSApipe**. Les simulations sont effectuées pour le système du bâtiment commercial situé à Winnipeg (Figure 2c).



**Tableau 4.**

Consommation énergétique annuelle et économies d'énergie évaluées après 25 ans avec eQuest pour le bâtiment commercial à Winnipeg

Système	Chauffage (kWh/kBtu)	Climatisation (kWh/Btu)	Coût d'opération (\$)	Économies (%)
Résistance électrique + climatiseur	595 200 2 030 906	39 800 135 803	98 104	
PACCS <b>VERSApipe</b>	56 000 192 080	22 500 76 773	42 352	56,8 %
PACCS <b>Geoperformx</b>	56 400 192 445	22 400 76 432	42 344	56,8 %

Les simulations effectuées ont démontré que les températures d'opération sont équivalentes tout au long de l'année. La croyance populaire qui suppose qu'un tuyau plus conducteur réchauffera ou refroidira rapidement le sous-sol n'est pas fondée lorsque le système est adéquatement dimensionné. Le tuyau **Geoperformx** demeure une innovation technologique aidant à réduire les coûts d'installation d'un système de PACCS puisque les forages nécessaires à l'aménagement des échangeurs de chaleur sont généralement dispendieux. De plus, la réduction de la longueur des échangeurs de chaleur apportera d'autres bénéfices comme une diminution de l'utilisation de matériaux de remplissage, du nombre d'entretoises, du nombre de forages et par conséquent de tranchées pour raccorder le système, du temps de travail consacré à la boucle souterraine et des pertes de pression dans les tuyaux. Cette innovation vise à augmenter la rentabilité des systèmes, particulièrement en milieu urbain où l'espace de forage est restreint. ■

**Références**

Bennet, J., J. Claesson, and G. Hellstrom. 1987. Multipole method to compute the conductive heat transfer to and between pipes in a composite cylinder. Notes on heat transfer 3-1987. Department of Building Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Suède.

Bernier, M. 2000. A Review of the cylindrical heat source method for the design and analysis of vertical ground-coupled heat pump systems. Proceedings of the Fourth International Conference on Heat Pumps in Cold Climates Conference, Caneta Research Inc., Aylmer, Canada, p. 1-14.

Hellström, G. 1991. Ground heat storage; thermal analysis of duct storage systems. Thèse de doctorat, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Lund, Suède.

Morrison, A.D. 2000. GS2000tm Software. Proceedings of the Fourth International Conference on Heat Pumps in Cold Climates, Caneta Research Inc., Aylmer, Canada, p. 1-10.

Pasquier, P., and P. Groleau. 2009. Comparaison des performances thermiques de puits géothermiques aménagés avec des conduits **VERSApipe** HD et **Geoperform**. Rapport Interne, Golder Associates, Montréal, Canada.

Philippe, M., M. Bernier, and D. Marchio. 2010. Sizing calculation spreadsheet – Vertical geothermal borefields. *ASHRAE Journal*. 52(7): 20-28.

Raymond, J., M. Frenette, A. Léger, É. Magni, et R. Therrien. 2010. Modélisation numérique d'échangeurs de chaleur au sol équipés de tuyaux **Geoperformx**. *La maîtrise de l'énergie*. 25(2): 8-10.

Raymond, J., M. Frenette, A. Léger, É. Magni, et R. Therrien. 2011. Numerical modeling of thermally enhanced pipe performances in vertical ground heat exchangers. *ASHRAE Transactions*, LV-11-024.

Remund, C. 1999. Borehole thermal resistance: Laboratory and field studies. *ASHRAE Transactions*. 105(1): 439-445.