

IMPACT DE RÉSERVOIRS DE STOCKAGE THERMIQUE SUR LES SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES

Antoine Langlois¹, Michel Bernier¹, Michaël Kummert¹, Jacques Lagacé²

¹Département de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal
Case Postale 6079, succursale « centre-ville », Montréal, Québec, H3C 3A7, Canada

²Bouthillette Parizeau et associés inc.
9825, rue Verville, Montréal, Québec, H3L 3E1, Canada

RÉSUMÉ

Cet article traite de l'impact de l'ajout de réservoirs de stockage thermique hors-terre sur les systèmes géothermiques. Une étude de cas basée sur un bâtiment (surface de 6000 m² sur 5 étages) en construction à Montréal est utilisée pour quantifier cet impact. Un système composé de 28 puits d'une longueur de 130 m chacun sert de source à deux séries de pompes à chaleur (PAC) eau-eau qui assurent respectivement le chauffage et la climatisation du bâtiment. Deux réservoirs de stockage tampon (un chaud et un froid) sont placés entre les PACs et les serpentins de chauffage et de climatisation afin de réduire la longueur des puits et la consommation énergétique des PACs. Le système est modélisé avec TRNSYS en utilisant des composants standards ainsi que quelques modules de la bibliothèque TESS. Les résultats montrent, pour les cas étudiés, une réduction possible de la longueur de l'échangeur géothermique de 23% et une réduction de la consommation énergétique annuelle de 1% grâce à l'utilisation de deux réservoirs de stockage thermique d'un volume de 120 m³ chacun.

INTRODUCTION

L'utilisation de l'énergie géothermique pour le chauffage et la climatisation de bâtiments est de plus en plus répandue dans le monde (Lund, 2005). De tels systèmes sont généralement plus coûteux que les systèmes de chauffage/climatisation conventionnels étant donné les coûts importants liés aux travaux de forage des puits géothermiques. Les systèmes de stockage thermique sont aussi largement utilisés dans les bâtiments (ASHRAE, 2007). Ils peuvent entre autres servir à réduire la taille des équipements de chauffage/climatisation en permettant un décalage entre la production de l'énergie et son utilisation. Ces systèmes peuvent aussi servir à améliorer l'opération d'un système de chauffage, ventilation et air-climatisé (CVAC) en permettant l'augmentation du coefficient de performance des appareils. Adam et al. (2003) ont étudié l'avantage économique d'utiliser un stockage jumelé à un système CVAC. Ils concluent que des

économies peuvent être générées, mais qu'il faut porter une attention particulière au design du système et à la stratégie de contrôle. Un avantage économique évident du stockage thermique est son utilisation dans des régions où le coût de l'énergie varie en fonction de l'heure de la journée. Caldwell et al. (1997) ont toutefois démontré que le stockage d'eau froide peut présenter un avantage économique pour un bâtiment même si aucun tarif préférentiel sur l'énergie n'est appliqué. D'autres études traitent de l'utilisation des matériaux à changement de phases (MCP) pour stocker l'énergie. Ure (2004) a étudié un système CVAC où des conduites sont équipées avec des MCP afin d'améliorer l'efficacité d'un système neuf ou existant. Sharma (2009) fait une révision des applications du stockage thermique à l'aide de MCP. Il traite des avantages de leur utilisation dans les systèmes CVAC, mais met surtout l'accent sur leur utilisation dans des régions où le coût de l'électricité est différencié dans le temps, ce qui n'est pas le cas dans la présente étude. Finalement, Arnold (2000) a présenté une étude de cas où la masse thermique d'un bâtiment est utilisée pour diminuer la consommation énergétique et le coût d'entretien des équipements.

Dans le but de réduire les coûts reliés aux systèmes géothermiques, plusieurs stratégies ont été évaluées dont l'utilisation de systèmes hybrides. Ces systèmes utilisent un élément d'ajout ou de rejet de chaleur. Bernier (2006) a démontré qu'un système hybride pouvait avoir un coût total sur le cycle de vie inférieur à un système géothermique conventionnel. Par ailleurs, Eslami-Nejad et al. (2009) ont étudié l'injection de chaleur solaire dans les puits géothermiques pour en réduire la longueur. Toutefois, aucun article n'a été trouvé sur l'utilisation de réservoirs de stockage thermique hors-terre dans le but de réduire le coût d'un système géothermique.

Sachant que la longueur d'un échangeur géothermique est principalement influencée par la charge de pointe d'un bâtiment, ces systèmes peuvent bénéficier du stockage d'énergie pour permettre le nivelage de la charge thermique au sol et ainsi réduire la longueur nécessaire des puits. Le présent article traite donc de

l'impact que peuvent avoir les réservoirs de stockage thermique sur les systèmes géothermiques tant au niveau de la longueur de l'échangeur qu'au niveau de la consommation énergétique. Pour ce faire, les résultats sont présentés en deux temps. Premièrement, un design conventionnel sans stockage est étudié pour évaluer deux principaux paramètres : la longueur nécessaire des puits et la consommation énergétique annuelle des PACs. Ensuite, des réservoirs de stockage sont ajoutés au système pour en évaluer les impacts au niveau de ces deux paramètres. Pour la présente étude, des réservoirs de stockage de chaleur sensible (remplis d'eau) sont utilisés.

MÉTHODOLOGIE

Système de base: Un cas de base a été élaboré pour servir de repère de comparaison. Ce système est formé d'une boucle géothermique utilisée comme source par deux paires de PACs eau-eau. Une de ces paires de PACs ne fonctionne qu'en chauffage, tandis que l'autre ne fonctionne qu'en climatisation. La figure 1 montre une représentation schématique de l'installation.

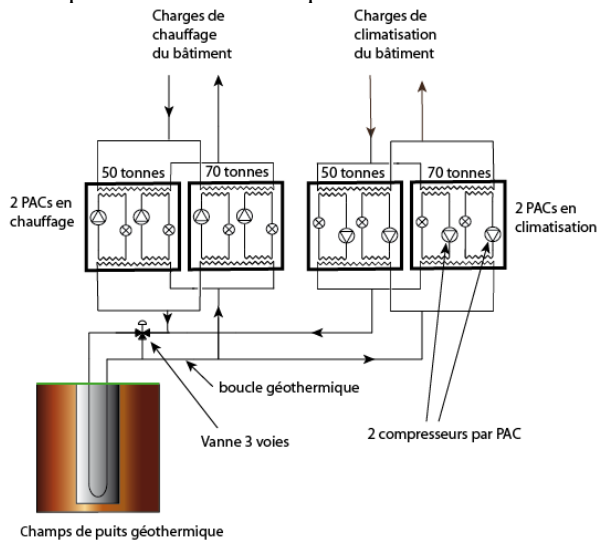


Figure 1 : Représentation schématique du système de base.

Chacune des paires est formée d'une PAC d'une capacité de 50 tonnes (176 kW) et d'une autre d'une capacité de 70 tonnes (246 kW). La capacité nominale totale en chauffage et en climatisation est donc de 120 tonnes (420 kW). Chacune de ces PACs possède deux compresseurs sur deux circuits indépendants qui peuvent chacun fournir la moitié de la capacité. La PAC de 50 tonnes peut donc fournir 25 ou 50 tonnes et la PAC de 70 tonnes peut fournir 35 ou 70 tonnes. La PAC de 50 tonnes étant sollicitée la première, les capacités nominales suivantes sont permises en fonction des besoins du bâtiment: 25, 50, 85 et 120 tonnes (88, 175, 298 et 420 kW). Les besoins de

chauffage et de climatisation du bâtiment sont comblés directement par la mise en marche de ces PACs.

Système étudié: La principale différence entre le système étudié et le système de base est l'ajout de deux réservoirs de chaleur sensible entre les PACs et les serpentins de chauffage/climatisation du bâtiment. Les réservoirs permettent de combler les besoins du bâtiment sans nécessairement mettre en marche les PACs. La figure 2 montre une représentation schématique de l'installation modifiée.

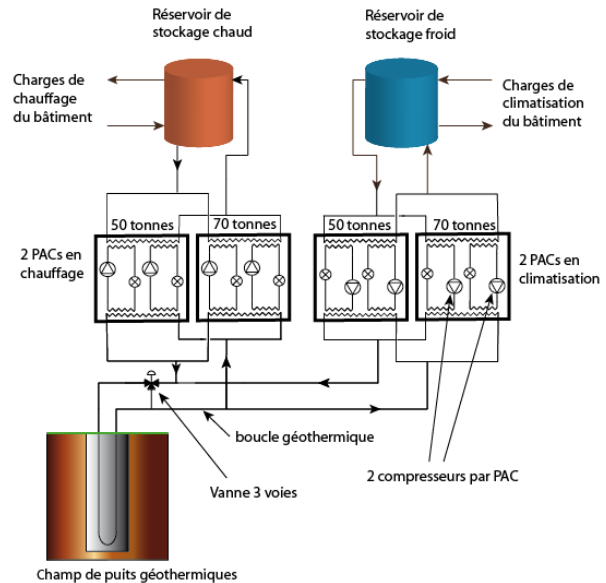


Figure 2 : Représentation schématique du système étudié.

Besoins du bâtiment: Le bâtiment étudié est situé à Montréal. Il a une surface de 6000 m² sur 5 étages. Les besoins horaires de ce bâtiment ont été évalués lors de la conception préliminaire. Le profil de charge résultant, présenté à la figure 3, est pratiquement équilibré entre le chauffage et la climatisation avec une charge de pointe d'environ 420 kW dans les deux cas.

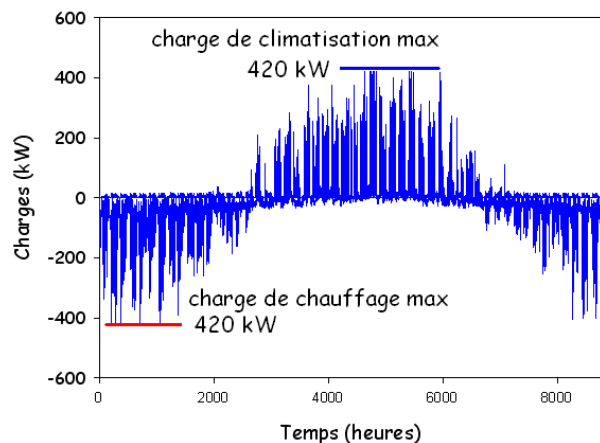


Figure 3 : Besoins horaires du bâtiment étudié.

Pour des considérations d'espace de terrain disponible, l'installation des puits géothermiques se fera sous le bâtiment. Ce dernier ayant des dimensions d'environ 20 m par 60 m, un nombre maximal de 28 puits a été choisi dans une configuration de 7×4 avec un espacement entre chaque puits de 6.1 m. La figure 4 montre cet arrangement.

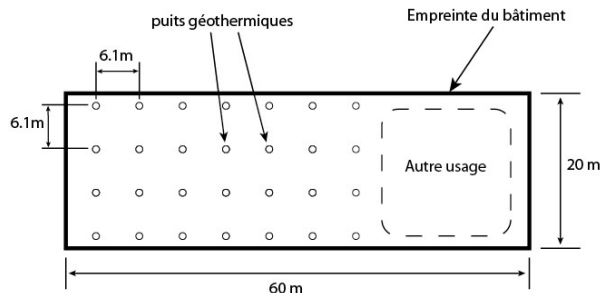


Figure 4 : Empreinte du bâtiment et position approximative des puits géothermiques.

Le tableau 1 présente les caractéristiques des puits et les conditions géologiques utilisées dans cette étude.

Tableau 1 : Caractéristiques du champ de puits géothermiques utilisés dans cette étude.

Paramètre		
Sol		
Conductivité thermique	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	3.67 *
Diffusivité thermique	(m ² /jour)	0.148 *
Température non perturbée	(°C)	12.08 *
Puits		
Nombre total	(-)	28
Espacement	(m)	6.1
Diamètre	(cm)	15
Profondeur de tête	(m)	1
Résistance thermique	(mKW ⁻¹)	0.08

* Essai de réponse thermique (GeoÉnergie, 2009)

Une évaluation préliminaire de la longueur nécessaire de l'échangeur géothermique a été réalisée en utilisant l'équation suivante tirée des travaux de Bernier (2006) :

$$L = \frac{q_h R_b + q_a R_a + q_m R_m + q_h R_h}{(T_g + T_p) - \frac{T_{out,ground} + T_{in,ground}}{2}} \quad (1)$$

où q_a est la charge moyenne annuelle au sol, q_m est la charge moyenne mensuelle au sol pour le mois de design, q_h est la charge au sol horaire maximale, R_a , R_m , et R_h représentent les résistances thermiques effectives du sol pour des durées 10 ans, 1 mois et 6 heures, $R_b = 0.08 \text{ mKW}^{-1}$ (voir tableau 1) est la résistance thermique équivalente du puits, $T_g = 12.08 \text{ °C}$ (voir tableau 1) est la température du sol non

perturbé, T_p est la température de pénalité (causée par l'interférence thermique entre les puits, Bernier et al. (2008)) et T_{sortie} et $T_{entrée}$ sont les températures de sortie et d'entrée de l'échangeur géothermique aux conditions de design. La valeur de T_{sortie} , qui est aussi la température à l'entrée des PACs, a été fixée à 0 °C en chauffage et à 33 °C en climatisation. Ces valeurs ont été choisies pour permettre une marge de sécurité pour l'opération des PACs qui peuvent fonctionner jusqu'à une température minimale en chauffage de -3 °C et une température maximale en climatisation de 38°C. La charge annuelle moyenne, q_a , est appliquée pendant 10 ans dans le but de tenir compte de l'impact à long terme.

Les valeurs des charges au sol q_a , q_m et q_h sont obtenues en utilisant les charges (voir figure 3) et les valeurs de COPs qui correspondent aux conditions de design : 3.3 pour le chauffage et 4.9 pour la climatisation. La valeur de q_m est calculée pour le mois de design c'est-à-dire janvier pour le chauffage et août pour la climatisation. Le tableau 2 résume ces calculs de charges au sol.

Tableau 2 : charges au sol pour le calcul de longueur des puits géothermiques

	heures par mois	charge max chauffage	charges mensuelles chauffage	charge max climatisation	charges mensuelles climatisation	charge au sol max chauffage	charge au sol max climatisation	charge au sol mensuelle
		kW	kWh	kW	kWh	kW	kW	kW
janvier	744	420.00	85301.74	14.12	2156.77	292.73	-17.00	76.42
février	672	415.65	66082.43	18.39	2155.89	289.69	-22.38	64.67
mars	744	259.38	45806.04	37.39	3010.06	180.92	-45.27	38.04
avril	720	186.45	23630.84	210.18	6662.59	129.95	-253.07	11.75
mai	744	36.17	9352.45	283.89	24819.06	25.21	-341.82	-31.41
juin	720	27.09	3222.44	390.58	49116.00	18.88	-470.29	-79.02
juillet	744	19.82	1541.02	420.00	62538.50	13.81	-505.71	-99.77
août	744	27.44	1926.54	420.00	61323.52	19.13	-505.71	-97.44
septembre	720	35.80	7418.20	416.38	26096.15	24.95	-501.36	-36.46
octobre	744	120.52	17992.51	155.30	5311.54	84.00	-187.00	8.26
novembre	720	252.00	36790.04	19.11	2654.85	175.64	-23.01	31.17
décembre	744	403.84	71219.73	16.02	2215.03	281.46	-19.28	63.13
Total			370303.98		248039.97			
				COP en chauffage =	3.3	déséquilibre thermique annuel du sol		
				COP en climatisation =	4.9	-4.63 kW		

Les trois dernières colonnes du tableau 2 représentent respectivement la charge au sol maximale en chauffage et en en climatisation (q_h) et la charge au sol moyenne mensuelle (q_m). Le déséquilibre thermique annuel du sol, donné au bas du tableau 2, représente q_a et est égal à -4.63 kW. Par convention, la valeur négative indique que le sol est plus sollicité en climatisation qu'en chauffage.

La longueur nécessaire obtenue en solutionnant l'équation 1 est de 3743 m et est déterminée par les besoins de climatisation. Cette longueur correspond à environ 130 m par puits géothermique. Le détail de ce calcul est présenté à l'équation 2.

$$L_{cl} = \frac{47.5 \cdot (-505713 \times 0.081) + 2.4 \cdot (-70064 \times 0.030) + 10.9 \cdot (-97440 \times 0.096) + 39.2 \cdot (-505713 \times 0.067)}{(12.08 + 0.9) - (33.0 + 39.0)/2}$$

$$L_{cl} = 3743 \text{ [m]} \quad (2)$$

Les chiffres au dessus de l'équation 2 représentent le pourcentage de la longueur attribuable à chacun des termes. Ainsi, q_h qui est présent dans le premier et le dernier terme de cette équation est responsable d'environ 87% de la longueur des puits. Conséquemment, une réduction de q_h engendre une réduction de la longueur requise. C'est précisément ce que cet article étudie en proposant de réduire q_h au moyen de réservoirs de stockage thermique. Il est à noter que la température de pénalité (T_p) est de 0.9 °C, ce qui veut dire qu'au bout de 10 ans, la température du sol non perturbé aura augmenté de 0.9 °C à cause du déséquilibre thermique.

SIMULATION

Le système est ensuite modélisé dans l'environnement TRNSYS (Klein, S.A., et al. 2004) avec un pas de temps de 0.01 heures et les particularités suivantes:

Pompes à chaleur : Le type 668 (TESS, 2004) est utilisé pour modéliser les PACs eau-eau. Pour représenter les 2 paires de PACs utilisées respectivement pour le chauffage et la climatisation, le type 668 est utilisé 8 fois (4 en chauffage et 4 en climatisation). Cette configuration permet de représenter les deux compresseurs des PACs correctement. La figure 5 montre cet arrangement. Ce type fonctionne en interpolant des performances, issues d'un manufacturier (voir tableaux 3 et 4), en fonction des températures d'entrée du côté *source* et du côté *charge* de la PAC ($T_{in source}$ et $T_{in charge}$, voir figure 5).

Tableau 3. Performances des PACs en chauffage.

$T_{in charge}$ (°C)	$T_{in source}$ (°C)											
	-1.11		4.44		10		15.56		21.1			
	Cap.*	Cons.**	Cap.	Cons.	Cap.	Cons.	Cap.	Cons.	Cap.	Cons.		
	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	
15.6	15.4	2.8	16.9	3.0	18.6	3.1	20.4	3.2	22.5	3.4		
21.1	15.2	3.1	16.6	3.2	18.4	3.4	20.1	3.5	22.2	3.7		
26.7	15.0	3.5	16.4	3.6	18.1	3.7	19.8	3.8	21.9	4.0		
32.2	14.7	3.9	16.1	4.0	17.9	4.1	19.6	4.2	21.6	4.3		
37.8	14.5	4.5	15.9	4.5	17.6	4.6	19.3	4.7	21.4	4.8		
43.3	14.1	4.9	15.5	5.0	17.1	5.1	18.7	5.1	20.7	5.2		
48.9	13.8	5.5	15.0	5.6	16.6	5.6	18.1	5.7	20.0	5.7		

Tableau 4. Performances des PACs en climatisation.

$T_{in charge}$ (°C)	$T_{in source}$ (°C)													
	18		21.1		23.89		26.67		29.4		32.2		35	
	Cap.*	Cons.**	Cap.	Cons.	Cap.	Cons.	Cap.	Cons.	Cap.	Cons.	Cap.	Cons.	Cap.	Cons.
	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW
8.0	15.2	3.0	14.9	3.2	14.7	3.4	14.4	3.6	14.2	3.8	13.9	4.0	13.7	4.1
9.3	15.7	3.0	15.4	3.2	15.2	3.4	15.0	3.6	14.7	3.8	14.5	4.0	14.3	4.1
10.6	16.3	3.0	16.0	3.2	15.8	3.4	15.5	3.6	15.3	3.8	15.0	4.0	14.8	4.1
11.9	16.9	3.0	16.6	3.2	16.4	3.4	16.1	3.6	15.8	3.8	15.6	4.0	15.3	4.1
13.2	17.6	3.1	17.3	3.3	17.0	3.4	16.7	3.6	16.4	3.8	16.1	4.0	15.8	4.1
14.5	18.3	3.1	17.9	3.3	17.6	3.5	17.3	3.6	17.0	3.8	16.7	4.0	16.3	4.1
15.9	18.9	3.2	18.5	3.4	18.2	3.5	17.9	3.6	17.5	3.8	17.2	3.9	16.9	4.1

* Cap. = Capacité; ** Cons. = Consommation

Une même carte de performance est utilisée pour chacune des 4 PACs en chauffage et une autre pour les 4 PACs en climatisation.

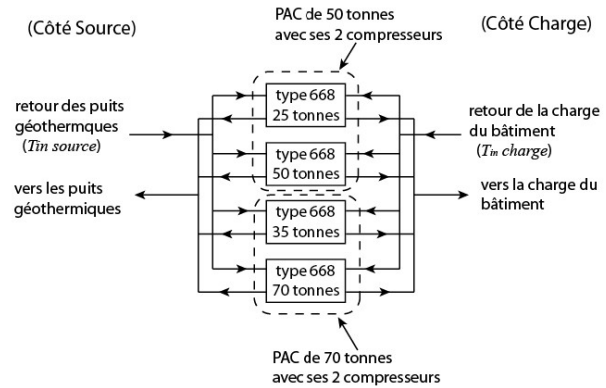


Figure 5: Arrangement des PACs en chauffage dans TRNSYS pour représenter 2 PACs avec chacune 2 compresseurs.

Contrôle des PACs : Le contrôle de la mise en marche des différentes PACs est réalisé à l'aide des type 671 et 672 (contrôleur différentiel « n-stage » respectivement en chauffage et en climatisation) de la bibliothèque TESS (2004). Ce contrôleur agit, pour le cas étudié, en fonction de la température de retour aux PACs du côté *charge* ($T_{in charge}$, voir figure 5). Pour le chauffage, les températures de retour à la PAC de 40, 38.5, 37 et 35.5 °C activent respectivement les PACs de 25, 50, 35 et 70 tonnes. Comme les PACs de 25 et 50 tonnes représentent la même PAC mais avec respectivement 1 ou 2 compresseurs en marche, la mise en marche de la PAC de 50 tonnes éteint celle de 25 tonnes et la mise en marche de la PAC de 70 tonnes éteint celle de 35 tonnes. Pour la climatisation, la même stratégie de contrôle est appliquée avec les températures de retour du côté *charge* ($T_{in charge}$, voir figure 5) de 8.5, 10, 11.5 et 13 °C qui activent respectivement les PACs de 25, 50, 35, et 70 tonnes.

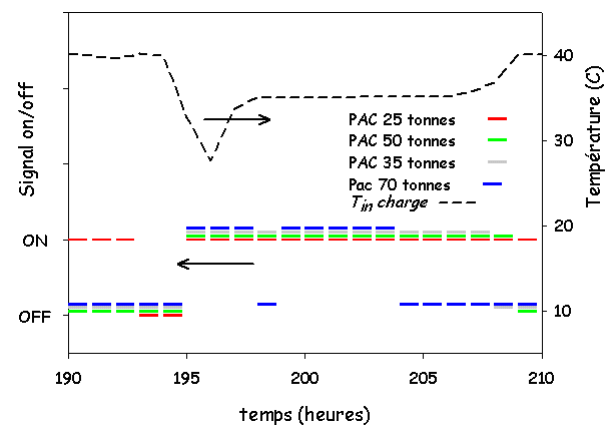


Figure 6 : Exemple du contrôle effectué sur les PACs

La figure 6 montre un exemple du contrôle effectué sur les PACs en chauffage. Sur cette figure, la ligne en pointillé représente la température de retour vers les PACs ($T_{in charge}$, voir figure 5) et les traits de couleurs indiquent le mode d'opération des différentes PACs en

chauffage (mode *ON* ou *OFF*). Ainsi, entre l'heure 190 et 194, 3 des 4 PACs sont arrêtées (mode *OFF*) puisque la température $T_{in\ charge}$ est près de 40 °C et à l'heure 196, les 4 PACs se mettent en marche (mode *ON*) pour compenser la température qui descend sous 35.5°C.

Réservoirs de stockage thermique : Le type 4 de TRNSYS a été utilisé pour représenter les réservoirs d'énergie sensible. Une stratification de 10 nœuds a été choisie. Deux réservoirs cylindriques de 120 m³ chacun (5 m de hauteur et 2.76 m de rayon) sont utilisés, un pour stocker la chaleur produite par les PACs en chauffage et un deuxième pour stocker le froid produit par les PACs en climatisation (voir figure 2). Les points de consigne pour ces deux réservoirs sont respectivement de 40 °C et 8.5 °C. Ceci implique qu'aucune PAC ne fonctionne lorsque la température de retour aux PACs ($T_{in\ charge}$, voir figure 5) est supérieure à 40 °C dans le cas du réservoir chaud et inférieure à 8.5 °C dans le cas du réservoir froid. Pour représenter le cas de base (sans stockage) dans l'environnement TRNSYS, ces réservoirs sont aussi utilisés, mais avec un volume moindre de 5 m³ (3m de hauteur et 0.73m de rayon) qui représente environ le volume de fluide caloporteur contenu dans la tuyauterie du bâtiment. Une stratification de 3 nœuds est utilisée dans ce cas pour représenter adéquatement la différence de température entre le fluide qui part et qui revient de la PAC. L'utilisation de ces réservoirs pour représenter le cas sans stockage thermique permet de contrôler l'opération des PACs en température.

Puits géothermiques : Le modèle DST (Hellström, 1989) est utilisé pour simuler le champ de puits géothermiques en utilisant les caractéristiques présentées au tableau 1.

Charges du bâtiment : Les charges du bâtiment sont intégrées au système avec le type 682 de la bibliothèque TESS (2004). Les charges en chauffage et en climatisation sont traitées séparément. Il est à noter que le bâtiment peut nécessiter du chauffage et de la climatisation simultanément.

Débits et fluides : Puisqu'elles représentent en fait la même PAC, un même débit est utilisé pour les PACs de 25 et 50 tonnes et un autre pour les PACs de 35 et 70 tonnes. Le débit du côté *source* est de 9.5 L/s pour la PAC de 50 tonnes et de 13.3 L/s pour la PAC de 70 tonnes. Du côté *charge* les débits sont respectivement de 7.2 L/s et 10 L/s pour la PAC de 50 et 70 tonnes. Les débits des différentes PACs sont additionnés. Les puits géothermiques peuvent donc admettre un débit variant de 9.5 L/s si une seule des PACs de 50 tonnes fonctionne, à 45.8 L/s si toutes les PACs fonctionnent en même temps. Du propylène glycol 25 % est utilisé

comme fluide caloporteur pour les puits géothermiques et de l'eau est utilisé pour le côté *charge*. Pour fournir la charge nécessaire au bâtiment à partir des réservoirs de stockage, un débit variable proportionnel à cette charge est utilisé. Un débit minimal est toutefois fixé et représente 10 % du débit à charge maximale. Le débit maximal étant de 17.2 L/s, le débit alimentant la charge du bâtiment varie donc entre 1.7 et 17.2 L/s. La figure 7 illustre la variation de ce débit en fonction de la charge relative du bâtiment.

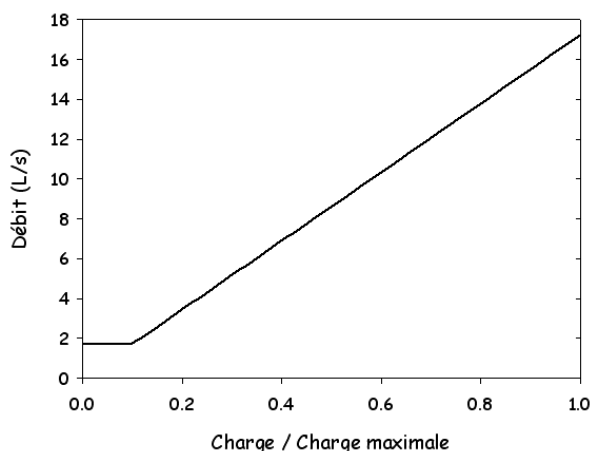


Figure 7 : Débit variable alimentant la charge du bâtiment à partir du réservoir de stockage en fonction de la charge relative.

RÉSULTATS

La température de retour des puits géothermiques a été utilisée pour quantifier l'impact de l'ajout de réservoirs de stockage thermique sur la longueur des puits géothermiques.

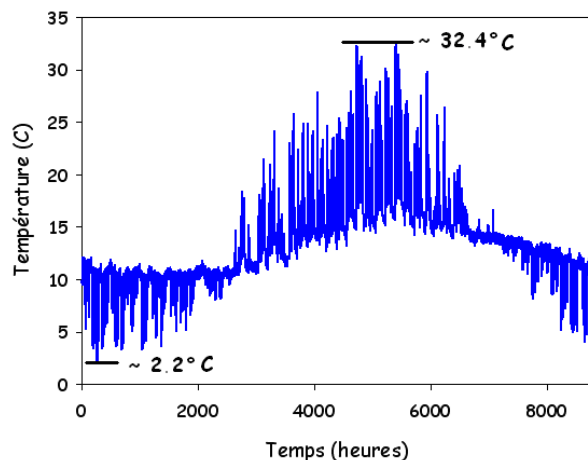


Figure 8 : Température de sortie des puits géothermiques pour le cas sans stockage thermique et une longueur des puits de 130 m.

La figure 8 présente la température de retour du champ de puits à chaque heure pour la 10^{ème} année de

simulation pour la configuration sans stockage. La figure 8 montre que pour le cas sans stockage thermique et des puits de 130 m de longueur (dénote par « SS130 »), la température à la sortie des puits atteint environ 32.4 °C comme température maximale en climatisation et environ 2.2 °C comme température minimale en chauffage. Avec un stockage thermique et en conservant la même longueur de puits géothermique (AS130), la température de sortie des puits est plus faible en climatisation et plus élevée en chauffage. La figure 9 montre ces résultats.

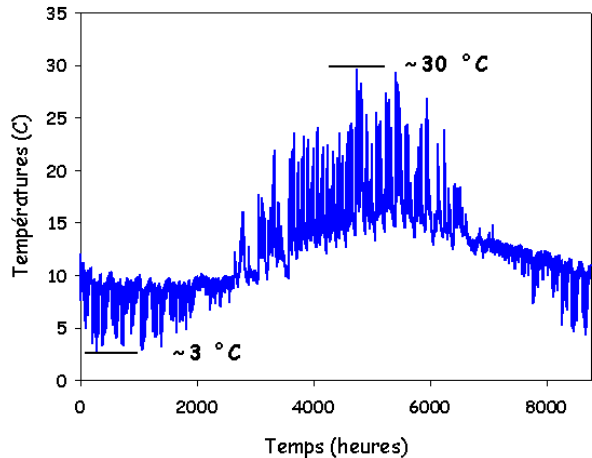


Figure 9 : Température de sortie des puits géothermiques pour le cas avec stockage thermique et une longueur des puits de 130m.

Les résultats de la figure 9 montrent que les puits sont moins sollicités et que des puits moins profonds seraient suffisants pour combler les besoins de chauffage et de climatisation du bâtiment.

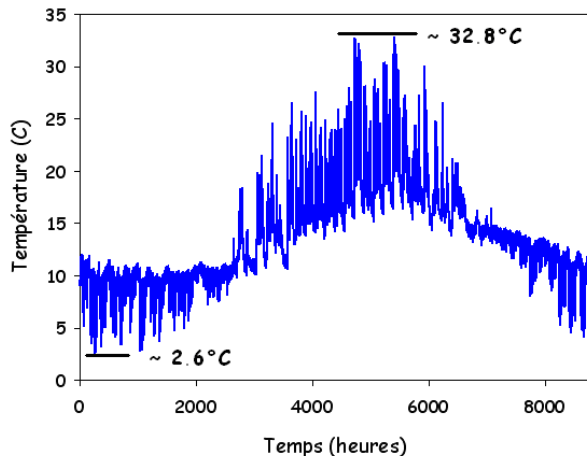


Figure 10 : Température de sortie des puits géothermiques pour le cas AS110 (avec stockage thermique et une longueur des puits de 110m).

Ainsi, tel que montré à la figure 10, avec une longueur réduite à 110m (AS110), l'évolution de la température de sortie des puits est sensiblement la même que pour

le cas sans stockage. Effectivement, sur cette dernière figure, la température maximale de retour des puits en climatisation atteint environ 32.8 °C et la température minimale en chauffage atteint environ 2.6 °C soit seulement 0.4 °C de plus que pour le cas SS130. Cela indique que la longueur des puits peut être réduite d'environ 15 % en utilisant le stockage thermique. Cette différence de longueur, pour une même charge à combler, est en grande partie due à la réduction de la charge de pointe au sol, q_h . La figure 11 montre la différence de charge au sol entre les cas AS110 et SS130. Lors de la pointe qui se produit environ à l'heure 4740, cette différence est de 13%.

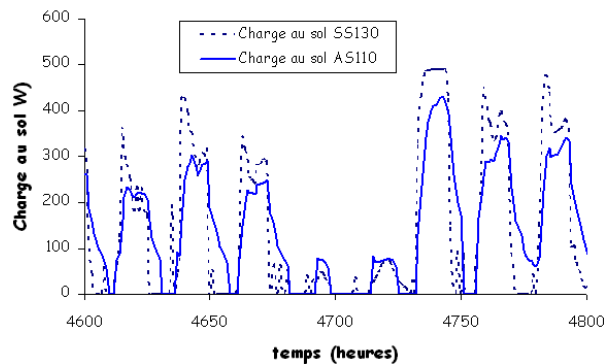


Figure 11 : Charge au sol pour les cas SS130 et AS110 lors de la pointe en climatisation.

Toutefois, cette réduction de la charge n'est pas due au fait que, grâce au stockage, tous les compresseurs des PACs ne sont pas sollicités puisque lors de la pointe de la charge au sol vers l'heure 4740 (voir figure 11), ils sont tous en marche. Cette réduction est plutôt due au fait que grâce aux conditions de température permises par le stockage (T_{in} charge plus faible), la capacité des appareils lors de la pointe est légèrement moindre, ce qui réduit la charge au sol. La figure 12 montre les températures d'entrée des PACs du côté source et du côté charge (T_{in} source et T_{in} charge, voir figure 5) de même que les COPs et les capacités des PACs pour les cas SS130 et AS110 lors de la pointe de la charge au sol en climatisation. Les courbes en vert sur la figure 12 représentent la capacité des PACs pour les conditions présentes de températures. La comparaison de ces courbes montre la réduction de la charge fournie par les PACs entre les cas AS110 et SS130. Les courbes en rouges représentent les COPs des machines pour les mêmes conditions. Ainsi, pour une charge fournie plus petite et des COPs pratiquement identiques, la charge au sol sera aussi plus petite. Cette réduction de la capacité des PACs explique dans ce cas-ci la réduction de la charge au sol et par le fait même, la réduction de la longueur requise de l'échangeur géothermique.

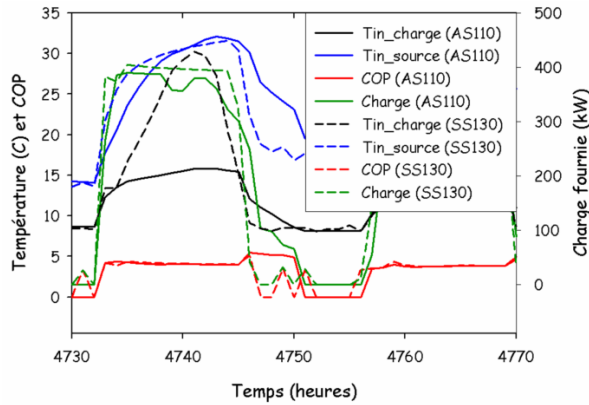


Figure 12 : T_{in} charge, T_{in} source et les COPs et les capacités des PACs pour les cas AS110 et SS130 lors de la pointe de la charge au sol en climatisation.

Toutefois, pour obtenir une réduction de la charge au sol plus importante, il faut réduire la capacité des PACs tout en utilisant le stockage thermique afin de combler la charge. Ainsi, en diminuant la capacité des PACs de 35 tonnes, c'est-à-dire en empêchant le deuxième compresseur de la PAC de 70 tonnes de démarrer, on peut réduire la longueur des puits d'environ 30m, soit une réduction de 23%.

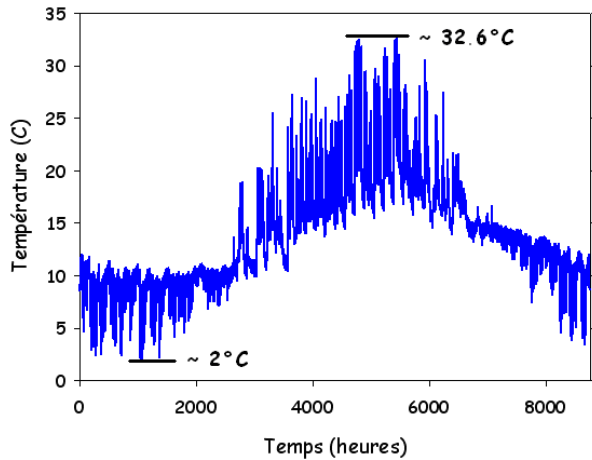


Figure 13 : Température de sortie des puits géothermiques pour le cas AS100-35 (avec stockage thermique et une longueur des puits de 100m).

La figure 13 montre la température de retour des puits géothermiques pour ce cas simulé (AS100-35 = cas avec stockage thermique, des puits d'une longueur de 100m et une réduction de la capacité des appareils de 35 tonnes) pour la 10^{ième} année de simulation. Ainsi la température de retour des puits (T_{in} source) maximale et minimale pour le cas AS100-35 sont pratiquement identiques à celles dans le cas SS130. Cela indique que la longueur des puits peut être réduite de 30 m (23% de la longueur initiale de 130 m), pour un total de 840 m (30 m x 28 puits).

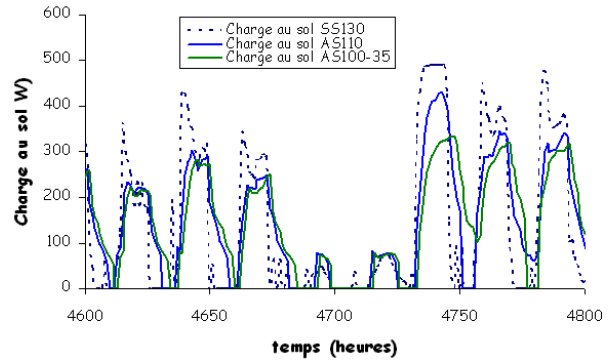


Figure 14 : Charge au sol pour les cas SS130, AS110 et AS110-35 lors de la pointe en climatisation.

Cette réduction de longueur est principalement due à la réduction de la charge au sol. La figure 14 montre une comparaison de cette charge pour les cas SS130, AS110 et AS110-35. La courbe en vert, qui représente le cas AS100-35, indique que la charge au sol maximale est ainsi réduite de 32%. Pour ce qui est de la consommation énergétique annuelle des PACs, le tableau 3 résume les consommations calculées et les différents COP pour la première et la 10^{ième} année de simulation des différents cas.

Tableau 3 : Résumé des consommations énergétiques des PACs et des COPs des 3 cas pour la 1^{ière} et la 10^{ième} année de simulation.

Cas	Consommation énergétique annuelle des PACs (kWh)	COP moyen en chauffage	COP moyen en climatisation
	(1 ^{ière} / 10 ^{ième} année)	(1 ^{ière} / 10 ^{ième} année)	(1 ^{ière} / 10 ^{ième} année)
SS130	169780 / 167200	3.67 / 3.71	3.7 / 3.69
AS110	169190 / 166670	3.63 / 3.7	3.7 / 3.73
AS100-35	168900 / 166000	3.62 / 3.69	3.74 / 3.79

Ces résultats montrent que l'utilisation des réservoirs de stockage thermique, dans ce cas ci, n'a qu'un très faible impact sur la consommation énergétique des PACs tant en chauffage qu'en climatisation puisqu'une réduction de la consommation énergétique de moins de 1% est réalisée par rapport au cas sans stockage.

ANALYSE

La présente étude fait ressortir des résultats concluants sur l'utilisation de réservoirs de stockage thermique. Toutefois, il importe de souligner certaines limites quant à l'interprétation des résultats. Le modèle DST (type 557 dans TRNSYS), représentant le champ de puits géothermiques, a certaines limites quant à la géométrie qu'il peut représenter. Comme l'ont présenté

Chapuis et Bernier (2009), ce modèle place uniformément les puits dans un volume de sol cylindrique et ne peut donc pas représenter correctement l'interaction entre les puits disposés de façon rectangulaire dans une configuration de 7×4. Toutefois, la comparaison présentée ici, est faite entre deux cas qui utilisent le même modèle numérique d'échangeur géothermique et met donc l'emphase sur l'impact des réservoirs de stockage thermique sur un certain champ de puits qui est celui représenté par le modèle DST.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été rendue possible grâce à la participation de la firme Bouthillette Parizeau Inc. et d'Équiterre à travers le projet de la Maison du Développement Durable. Les auteurs aimeraient aussi remercier le Fond Québécois de Recherche sur la nature et les technologies et le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie pour leur appui financier à travers le programme de bourses BMP innovations FQRNT-CRSNG.

CONCLUSIONS

Cet article traite de l'impact de l'ajout de réservoirs de stockage thermique sur les systèmes géothermiques. Une étude de cas basée sur un bâtiment (de 6000 m² sur 5 étages) en construction est utilisée pour quantifier cet impact. Le système est modélisé avec TRNSYS en utilisant des composants standards ainsi que quelques modules de la bibliothèque TESS. Les résultats obtenus montrent qu'une réduction de la charge au sol permettant la réduction de la longueur des puits géothermique est possible grâce à l'utilisation de réservoirs de stockage thermique. Toutefois, une réduction importante n'est réalisable qu'en limitant la capacité des PACs pour ainsi réduire la charge maximale au sol. Ainsi, en utilisant deux réservoirs de stockage de 120 m³ chacun et en diminuant la capacité des PACs de 30%, la longueur des puits géothermiques peut être réduite de 23%. Toutefois, pour le cas étudié, l'impact des réservoirs sur la consommation énergétique des PACs est négligeable.

Les futurs travaux chercheront à étudier d'autres scénarios de besoins de bâtiment et considéreront la possibilité d'utiliser des matériaux à changement de phase (MCP) comme médium de stockage. De plus, l'utilisation d'une vanne trois voies sur la boucle géothermique pour permettre une recirculation du fluide si les conditions de température le permettent sera étudiée afin de minimiser la charge thermique imposée au sol.

RÉFÉRENCES

- Adam, C. et Andre, P., (2003), 'Ice storage system (ISS): Simulation of a typical HVAC Primary plant equipped with an ice storage unit', Eight International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, 47-54.
- Arnold, D., (2000), 'Thermal storage case study: Combined building mass and cooling pond', ASHRAE Transactions, 106, 819-827.
- ASHRAE handbook—HVAC applications. (2007), R. Parsons, ed., American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Ga.
- Bernier, M., Chahla, A., et Pinel, P. (2008), 'Long-Term Ground Temperature Changes in Geo-Exchange Systems', ASHRAE Transactions, 114(2), 342-350.
- Bernier, M. (2006), 'Closed-loop Ground-Coupled Heat Pumps Systems', ASHRAE Journal, 48 (9), 12-19.
- Caldwell, J. et Bahnfleth, W. (1997), 'Chilled Water Thermal Energy Storage Without Electric Rate Incentives or Rebates', Journal of Architectural Engineering, 3(3), 133-140.
- Chapuis, S. et Bernier, M. (2009), 'Seasonal storage of solar energy in borehole heat exchangers', Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, 599-606.
- Eslami-Nejad, P. et al. (2009), 'Solar heat injection into boreholes', 4th Canadian Solar Buildings Conference, Toronto, Ontario, 10 pages.
- Geo-Energie inc. (2009), Rapport sur la conductivité thermique du sol, No. de référence : GE-244.
- Hellström, G., (1989), 'Duct ground heat storage model. Manual for Computer Code', Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- Klein, S.A., et al., (2004), TRNSYS 16 – A TRAnSient SYstem Simulation program, user manual. University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, Madison, WI, United States.
- Lund, J.W., Freeston, D.H., et Boyd, T.L. (2005), 'Direct application of geothermal energy: 2005 worldwide review', Geothermics, 34 (6), 691–727.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R. et Buddhi, D. (2009), 'Review on thermal energy storage with phase change materials and applications', Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 318-345.
- TESS (2004). TESS Libraries Version 2, User manual. Madison, WI: Thermal Energy Systems Specialists.
- Ure, Z. (2004), 'Positive temperature eutectic (PCM) thermal energy storage systems'. ASHRAE Winter meeting, Anaheim, consulté le 29 janvier 2010, tiré de <http://www.slideshare.net/PCMProducts/pcm-thermal-energy-storage-systems-ashrae-2004-conference-paper>