

SIMULATIONS DE CHAMPS DE PUITS GÉOTHERMIQUES VERTICAUX DE CHARGES THERMIQUES DIFFÉRENTES

F. Sheriff¹, M. Bernier²

¹Centre de la technologie de l'énergie CANMET – Varennes, Varennes, Québec, Canada

²École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada

RÉSUMÉ

Cet article traite de la simulation du transfert thermique transitoire dans les champs de puits verticaux de systèmes de pompes à chaleur géothermiques. Une nouvelle méthodologie est proposée pour évaluer la température à la paroi des puits lorsque les charges thermiques aux puits sont différentes. La méthode s'appuie sur la solution analytique dite de la source linéique finie jumelée aux techniques classiques de superposition spatiale et temporelle. L'agrégation des charges est également utilisée pour réduire le temps de calcul associé à la superposition temporelle. L'utilité de la nouvelle méthodologie est illustrée en examinant deux exemples. Le premier concerne la réponse d'un champ de trois puits alignés dans lequel les deux puits externes puisent de l'énergie du sol alors que de la chaleur est injecté dans le puits central. Dans l'autre exemple, les trois puits sont alimentés en parallèle avec un fluide à la même température. Dans ce cas, les résultats montrent que la température de sortie des puits ne sera pas la même pour le puits central et ceux situés aux extrémités.

INTRODUCTION

La prédiction du transfert thermique dans les champs de puits verticaux de systèmes géothermiques est importante puisqu'elle permet un bon dimensionnement de ces systèmes et une évaluation précise de la consommation des pompes à chaleur qui y sont reliées.

La Figure 1 montre schématiquement un champ de puits géothermiques. Dans cet exemple, le champ comporte trois puits verticaux de hauteur H . La tête du puits est enfouie à une profondeur D . Ces puits sont situés dans un sol dont la conductivité et la diffusivité thermique sont représentés par k et α , respectivement, alors que T_o est la température du sol non perturbé.

Les puits d'un champ géothermique peuvent être sollicités de différentes façons. En utilisant la Figure 1 à titre d'exemple, plusieurs sollicitations sont envisageables. Ainsi, si les 3 puits sont reliés en parallèle et ont des débits identiques, les trois températures d'entrée sont identiques ($T_{in,1} = T_{in,2} =$

$T_{in,3}$). Dans ce cas, si les puits sont assez éloignés les uns des autres, de façon à éliminer l'interférence thermique entre eux, alors le transfert thermique est identique dans chaque puits ($q_1 = q_2 = q_3$) et les températures de sortie sont identiques ($T_{out,1} = T_{out,2} = T_{out,3}$) de même que les températures à la paroi des puits ($T_{b,1} = T_{b,2} = T_{b,3}$). Si il y a interférence thermique entre les puits alors $q_1 \neq q_2 \neq q_3$, $T_{out,1} \neq T_{out,2} \neq T_{out,3}$, et $T_{b,1} \neq T_{b,2} \neq T_{b,3}$.

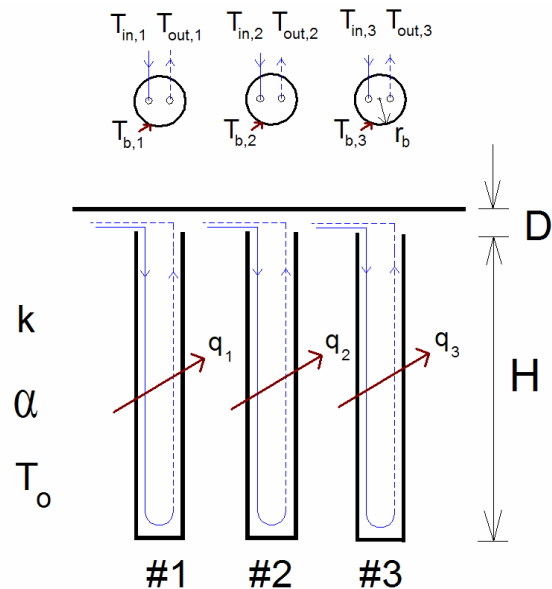


Figure 1 : Champ de puits géothermiques

Si les trois puits sont alimentés indépendamment, alors on se retrouve dans le cas le plus général pour lequel $T_{in,1} \neq T_{in,2} \neq T_{in,3}$, $q_1 \neq q_2 \neq q_3$, $T_{out,1} \neq T_{out,2} \neq T_{out,3}$, et $T_{b,1} \neq T_{b,2} \neq T_{b,3}$.

L'objectif de ce travail est de développer une technique qui permette de modéliser des charges thermiques variables dans le temps et différentes à chaque puits.

Cet article se divise en 4 parties. D'abord, une revue de la littérature est présentée. Ensuite, la méthode proposée est décrite et validée. Finalement, l'utilité de la méthodologie est illustrée en examinant deux exemples.

REVUE DES ÉTUDES ANTÉRIEURES

Il existe plusieurs modèles permettant de simuler le comportement thermique transitoire d'un champ de puits géothermiques. Quelques unes de ces méthodes sont passées en revue dans les paragraphes suivants.

Eskilson (1987) a développé une méthode basée sur des facteurs de réponse qu'il nomme « *g*-function ». Les *g*-function ont été obtenues en solutionnant numériquement le transfert thermique transitoire bidimensionnel (axial et radial) autour d'un seul puits géothermique. Ensuite, une superposition spatiale est appliquée pour obtenir la réponse du champ au complet. Cette superposition permet d'évaluer la température dans la direction azimutale ce qui rend l'approche de Eskilson tridimensionnelle.

Les *g*-function permettent de calculer la température moyenne à la paroi de tous les puits du champ. Cette température dépend de la conductivité thermique du sol, du taux de transfert de chaleur, et de trois paramètres adimensionnels. Ces trois paramètres, sont le rapport entre le rayon et la profondeur des puits (r_b/H sur la Figure 1), le rapport entre la distance entre les puits et la profondeur des puits (B/H sur la Figure 1) et un nombre adimensionnel faisant intervenir le temps (t/t_s où t_s est un temps caractéristique). Ces facteurs de réponse souffrent de deux lacunes. Premièrement, ils ne s'appliquent que pour le cas où le taux de transfert thermique est le même pour chaque puits. La deuxième lacune est associée au nombre restreint de configurations dont on possède les facteurs de réponse (essentiellement des champs de puits rectangulaires ou en ligne).

Le modèle DST fait partie de la librairie TESS du progiciel TRNSYS (Klein et *al.*, 2004). Dans cette sous-routine, les puits sont considérés comme étant disposés uniformément dans un volume cylindrique dans le sol. Ce modèle est inspiré des travaux de Hellström (1989). La température calculée dans le sol tient compte de composantes globale et locale ainsi que d'une composante pour un taux de transfert de chaleur en régime permanent. Les solutions globale et locale sont obtenues à l'aide d'une méthode de différence finie explicite, alors que la solution pour un taux de transfert de chaleur constant est obtenue de façon analytique. Ces trois composantes sont ensuite superposées pour obtenir le profil de température du champ entier. Ce modèle est considéré comme étant une référence et il a été utilisé à maintes reprises comme outil de validation (Shonder et *al.*, 2000). Cependant, le modèle DST ne permet pas de simuler des puits ayant des charges thermiques différentes.

Pinel (2003) et Bernier et *al.* (2004) sont à l'origine d'une méthode qui allie la solution analytique dite de la

source de chaleur cylindrique infinie au voisinage des puits à une solution numérique bidimensionnelle du champ pour tenir compte de l'interférence thermique entre les puits. Étant donné que cette méthode est bidimensionnelle, elle devient imprécise au bout de quelques années (Bernier et *al.*, 2007). De plus, elle ne permet pas de simuler des puits chargés différemment.

Cette revue de la littérature indique que le cas énoncé dans l'introduction et expliqué à la Figure 1 ne peut être simulé avec les méthodes existantes. Tel que montré aux sections suivantes, la méthode proposée ici permet de simuler de tels cas.

MÉTHODE PROPOSÉE

La méthode proposée ici permet d'évaluer la température à la paroi des puits (T_b sur la Figure 1). Cependant, le développement qui suit est plutôt basé sur des différences de température, θ et Θ . Ces valeurs sont définies par les relations suivantes :

$$\theta = T_o - T_b \quad (1)$$

$$\Theta = \frac{2\pi k\theta}{Q} \quad (2)$$

La solution analytique dite de la source linéique finie (SLF) dans un milieu semi-infini est utilisée. Cette solution est présentée par Eskilson (1987) et détaillée par Zeng et *al.* (2002). La SLF doit être superposée spatialement pour obtenir la réponse de plusieurs puits. De plus une superposition temporelle doit être utilisée lorsque le taux de transfert de chaleur varie dans le temps. Finalement, une agrégation des charges est requise pour limiter le temps de calcul associé à la superposition temporelle classique.

SOURCE LINÉIQUE FINIE (SLF)

Avec la SLF, le cylindre du puits est remplacé par une source linéique de longueur finie située au centre du puits et soumise à un taux de transfert de chaleur constant Q (Q est positif lorsque la chaleur est puisée dans le sol).

Une source linéique finie est présentée à la Figure 2. Sur cette figure le puits a une hauteur finie (H) et est situé sous l'axe r (cet axe représente le niveau du sol). Dans le but de simplifier l'analyse, il est supposé que la tête du puits correspond au niveau du sol, i.e. $D = 0$ (Sheriff (2007) donne la méthodologie à utiliser pour $D > 0$). Une source linéique miroir identique mais ayant un taux de transfert de chaleur inverse à la source dans le sol est utilisée, afin d'obtenir la condition de frontière correspondant à une température constante au niveau du sol (pour $z=0$). Pour plus de détails sur la

théorie des sources miroirs, le lecteur est référé aux travaux de Bose *et al.* (1985).

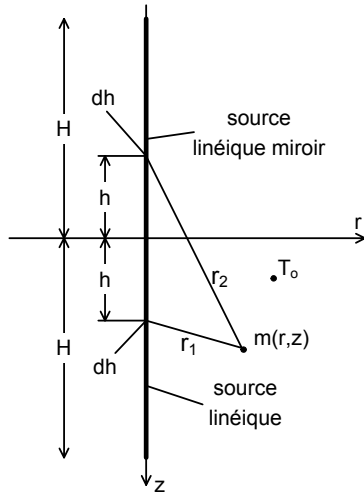


Figure 2 : Géométrie de la source linéique finie

Les hypothèses sous-jacentes à l'utilisation de la SLF sont les suivantes :

- Les effets de changement de température du fluide à travers les puits en fonction de la profondeur ne sont pas pris en compte.
- Le sol est considéré comme étant homogène.
- Les conditions initiale et de frontière de la température du sol non perturbé sont constantes.
- Toutes perturbations à la surface du sol, telles que la variation de la température ambiante, la résistance thermique air-sol, le gel et la neige, sont négligées.
- L'effet des mouvements des eaux souterraines est négligé.

Eskilson (1987) a démontré que ces hypothèses engendraient de faibles erreurs sur la solution.

Par ailleurs Eskilson (1987) évalue que le temps requis pour que les variations dues à la capacité thermique du puits se répercutent dans le sol sont données par le rapport: $5r_b^2 / \alpha$. En appliquant ce principe à la situation présente, il est donc supposé que la SLF n'est valide que pour des temps supérieurs à $5r_b^2 / \alpha$.

Chaque incrément dh de la source linéique peut être considéré comme une source ponctuelle. Ainsi, l'augmentation de température au point m (voir Figure 2) après un certain temps t est donnée par l'équation suivante :

$$d\theta = \frac{Q}{4\pi k} \times \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} dh \quad (3)$$

La différence de température θ au point m , causée par la source linéique en entier, est obtenue en intégrant cette équation de 0 à H pour la source réelle et la source miroir :

$$\theta = T_0 - T \quad (4)$$

$$= \frac{Q}{4\pi k} \times \int_0^H \left[\frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right] dh$$

où T représente la température au point m .

Sous forme adimensionnelle cette relation devient :

$$\Theta = \int_0^1 \left[\frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{R^2 + (Z-H')^2}}{2\sqrt{F_o}}\right)}{\sqrt{R^2 + (Z-H')^2}} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{R^2 + (Z+H')^2}}{2\sqrt{F_o}}\right)}{\sqrt{R^2 + (Z+H')^2}} \right] dH' \quad (5)$$

La Figure 3 montre un exemple d'application de l'équation 5 dans le cas où le régime permanent est atteint (i.e. $F_o \rightarrow \infty$). Sur cette figure le puits s'étend de $Z = 0$ à 1. Des distributions de températures pour $R = 0,0995, 0,0495$ et $0,0005$ sont présentées.

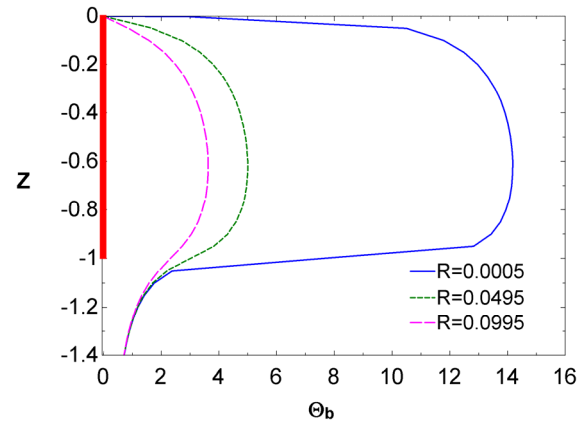


Figure 3 :Variation de la température (adimensionnelle) en fonction de la profondeur pour trois distances radiales.

Pour $H=100$ m et trois puits alignés séparés d'une distance de 5m, ces trois courbes représentent donc la

distribution de température à $r=0,05$ m (ce qui correspond typiquement au rayon d'un puits), à $r = 4,95$ m, ce qui correspond à une distance typique entre le centre d'un puits et la paroi du puits voisin ($=5-0,05$), et à $r = 9,95$ m, ce qui correspond à la distance entre les deux puits les plus éloignés ($=5+5-0,05$).

Tel que montré à la Figure 3, la température varie de façon significative en fonction de la profondeur. La moyenne sur toute la hauteur du puits est obtenue en solutionnant l'intégrale suivante :

$$\bar{\theta}_b = \frac{1}{H} \int_0^H \theta(r_b, z) dz \quad (6)$$

Donc, l'obtention de la température moyenne à la paroi du puits passe par la solution de deux intégrales (soit les équations 4 et 6). Ces calculs peuvent s'avérer longs. Lamarche et Beauchamp (2007), à l'aide de manipulations mathématiques sur ces équations proposent une façon rapide de calculer la température moyenne sur toute la longueur du puits :

$$\Theta = \int_{\beta}^{\sqrt{\beta^2+1}} \frac{\operatorname{erfc}(\gamma z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_A - \int_{\sqrt{\beta^2+1}}^{\sqrt{\beta^2+4}} \frac{\operatorname{erfc}(\gamma z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_B \quad (7)$$

Où β est le rayon adimensionnel du puits ($\beta=r/H$), γ est le ratio $1/(2\sqrt{F_o})$ et D_A et D_B sont donnés par :

$$D_A = \sqrt{\beta^2 + 1} \operatorname{erfc}(\gamma \sqrt{\beta^2 + 1}) - \beta \operatorname{erfc}(\gamma \beta) - \frac{e^{-\gamma^2(\beta^2+1)} - e^{-\gamma^2\beta^2}}{\gamma \sqrt{\pi}}$$

$$D_B = \sqrt{\beta^2 + 1} \operatorname{erfc}(\gamma \sqrt{\beta^2 + 1}) - 0,5 \left(\beta \operatorname{erfc}(\gamma \beta) + \sqrt{\beta^2 + 4} \operatorname{erfc}(\gamma \sqrt{\beta^2 + 4}) \right) - \frac{e^{-\gamma^2(\beta^2+1)} - 0,5 \left(e^{-\gamma^2\beta^2} + e^{-\gamma^2(\beta^2+4)} \right)}{\gamma \sqrt{\pi}}$$

Noter que les équations définissant D_A et D_B , présentées par Lamarche et Beauchamp (2007), comportent une erreur qui a été révélée et corrigée par Sheriff (2007). En résumé, l'équation 7 permet de calculer la température à la paroi d'un puits (T_b sur la Figure 1) soumis à un taux de transfert de chaleur constant (q sur la Figure 1). A titre d'exemple, pour la Figure 3, $\Theta = 12,5, 4,3$, et $3,1$ pour $R=0,0005, 0,0495$, et $0,0995$, respectivement.

SUPERPOSITION TEMPORELLE

En situation réelle, les charges thermiques d'un bâtiment varient d'heure en heure. Conséquemment, le taux de transfert de chaleur dans le sol est variable.

Dans ce cas, la superposition temporelle doit être utilisée afin de pouvoir simuler des taux de transfert de chaleur variables dans le temps. La superposition temporelle « classique » où les charges thermiques horaires sont additionnées et soustraites à chaque pas de temps demande d'importants temps de calcul lorsque des simulations annuelles sont réalisées. Afin de réduire le temps de calcul, un algorithme d'agrégation de charges peut être utilisé. Cette technique est basée sur l'hypothèse que plus une charge thermique a eu lieu dans le passé moins elle a d'impact sur le calcul au temps présent. Pinel (2003) et Bernier et al. (2004) proposent une méthode qui permet d'effectuer ces calculs à l'aide d'un algorithme d'agrégation de charges multiples (Multiple Load Aggregation Algorithm – MLAA). Cet algorithme est modifié ici pour utilisation avec la source linéique finie. L'équation ci-dessous montre les résultats de ces modifications :

$$\theta_t = \frac{1}{2\pi k} \left(\bar{Q}_{y,t} [A-B] + \bar{Q}_{m,t} [B-C] + \bar{Q}_{w,t} [C-D] + \bar{Q}_{d,t} [D-F_1] \right. \\ \left. + \bar{Q}_{t-N_h+1} [F_1-F_2] + \bar{Q}_{t-N_h+2} [F_2-F_3] + \dots + \bar{Q}_{t-1} [F_{N_h-1} - F_{N_h}] + \bar{Q}_t [F_{N_h}] \right) \\ \text{où} \\ A = \Theta_{t=t}, B = \Theta_{t=t-N_y}, C = \Theta_{t=t-N_y-N_m}, D = \Theta_{t=t-N_y-N_m-N_w}, F_1 = \Theta_{t=N_h}, \\ F_2 = \Theta_{t=N_h-1}, F_3 = \Theta_{t=N_h-2}, \dots, F_{N_h} = \Theta_{t=1} \quad (8)$$

où

$\bar{Q}_{i,t}$ est le taux de transfert de chaleur moyen pour chaque période d'agrégation ($i=d,w,m$ et y) et Q_j est le taux de transfert de chaleur horaire (non agrégé).

SUPERPOSITION SPATIALE

Dans le cas où le champ ne comporte qu'un seul puits, il suffit d'utiliser directement l'équation 7 en remplaçant r par r_b , le rayon du puits. Il n'y a pas d'interférence thermique d'autres puits et donc la superposition spatiale n'est pas requise.

Dans le cas où un champ compte plusieurs puits qui interagissent thermiquement entre eux, la superposition spatiale doit être utilisée. Par exemple, en supposant un champ de trois puits alignés (Figure 1) pour lesquels $B=5$ m et $H=100$ et qui ont atteint un état permanent il est possible, à l'aide des résultats montrés à la Figure 3, d'illustrer le calcul associé à la superposition spatiale. Ainsi la Figure 3 indique que la température moyenne adimensionnelle à la paroi du puits central (causée par le rejet du puits central lui-même) est de 12,5 et que les 2 puits externes engendrent une température moyenne adimensionnelle de 4,3 et de 3,1 à 4,95 et 9,95 m de leur centre, respectivement. La superposition spatiale consiste à superposer les réponses des trois puits. Ainsi

dans cet exemple, le puits central aura une température adimensionnelle de 21,1 (=12,5+2×4,3) et les deux autres auront une température adimensionnelle de 19,9 (=12,5+4,3+3,1).

Mathématiquement, la superposition spatiale se traduit par les équations suivantes. La différence entre la température du sol non perturbé et la température à la paroi du puits j causée par tous les puits du champ, $\theta_{j, champ}$, est donnée par :

$$\theta_{j, champ} = \theta_{b-j} + \sum_{i=1, i \neq j}^{n_b} \theta_{i-j} \quad (9)$$

où

θ_{b-j} est la différence de température à la paroi du puits j causée par le puits j lui-même (°C)

θ_{i-j} est la différence de température à la paroi du puits j causée par le puits i (°C)

θ_{b-j} et θ_{i-j} sont obtenus en utilisant les équations 4 et 6 (ou l'équation 7 pour un calcul plus rapide) en remplaçant r par r_b et par r_{i-j} , respectivement. Cette dernière valeur est la distance entre le centre du puits i et la paroi du puits j .

La différence de température moyenne entre la température du sol non perturbé et la température à la paroi de tous les puits du champ, $\bar{\theta}_{champ}$, est obtenue par :

$$\bar{\theta}_{champ} = \frac{1}{n_b} \sum_{j=1}^{n_b} \theta_{j, champ} \quad (10)$$

La méthode proposée est développée avec les progiciels FORTRAN et EES (Klein, 2006). Une bibliothèque de liens dynamiques (DLL – Dynamic Link Library) est créée avec le progiciel FORTRAN, permettant une exécution rapide, puis elle est appelée par le progiciel EES en tant que fonction provenant d'une routine externe. EES est convivial et permet de visualiser facilement les résultats obtenus.

La méthode proposée est relativement rapide pour des champs comportant peu de puits. Cependant, le temps d'exécution pour les champs de plusieurs puits est plutôt long. Cela constitue un handicap majeur. Il serait donc important de raccourcir le temps de calcul dans le futur.

Finalement, il y a lieu de signaler que la méthode proposée s'applique sur des champs de géométrie quelconque qui n'ont pas nécessairement une disposition régulière (carré, rectangulaire, etc.). Cet important aspect de la méthode (qu'aucune autre méthode ne considère) n'est pas traité dans cet article; le lecteur est référé aux travaux de Sheriff (2007) pour plus de détails.

VALIDATION

La méthode proposée a été validée de façon exhaustive par Sheriff (2007). Quelques résultats de cette validation sont présentés aux paragraphes suivants.

La Figure 4 montre les résultats d'une comparaison entre les valeurs de θ calculées selon la méthode de la source linéique infinie (SLI) et la méthode proposée (SLF). La méthode SLI diffère fondamentalement de la SLF en ce qu'elle ne tient pas compte de la conduction axiale dans le sol selon l'axe du puits.

Les résultats obtenus avec la SLI et ceux obtenus avec la SLF sont à toutes fins utiles identiques jusqu'à $at/r^2=10^4$ (environ 180 jours d'opération pour une installation typique). Au-delà de cette valeur, la conduction axiale dans le sol devient importante. Étant donné que la SLI ne tient pas compte de cet effet il n'est pas surprenant de voir l'écart entre les deux modèles augmenter au-delà de cette valeur. La Figure 4 montre clairement que le calcul de θ avec la méthode proposée a été correctement implémenté.

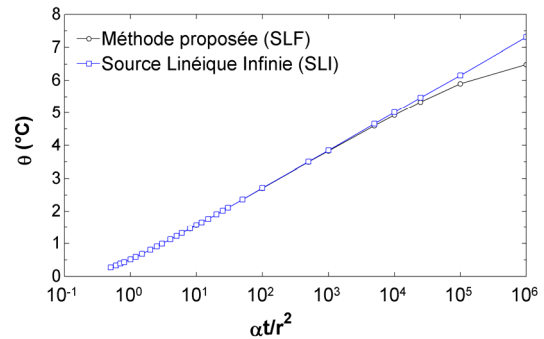


Figure 4 : θ calculé selon la méthode proposée (SLF) et selon la méthode de la source linéique infinie (SLI)

Les résultats obtenus avec la méthode proposée comparés à ceux obtenus par Eskilson (1987) pour un champ de trois puits alignés, et pour différents rapports B/H sont présentés à la Figure 5. Sur cette figure, les valeurs de θ sont tracées en fonction du logarithme naturel d'un temps adimensionnel (t/t_s) où $t_s = H^2/9\alpha$. À titre indicatif, $t \sim 20$ ans pour $\ln(t/t_s) = 0$, $H=100$ m, et $\alpha=1,62 \times 10^{-6}$ m²/s.

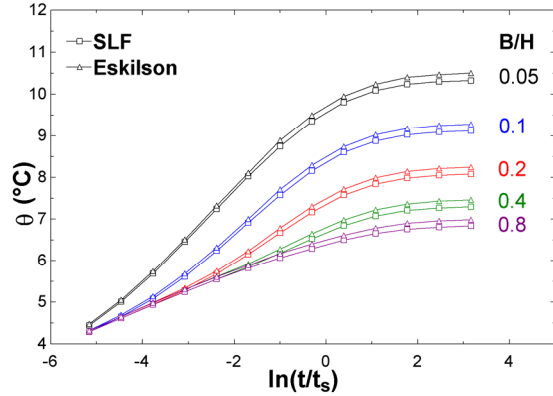


Figure 5 : Comparaison de la méthode proposée (SLF) avec les g -function de Eskilson pour un champ de trois puits alignés

Les valeurs obtenues avec les deux approches sont très semblables. L'écart peut s'expliquer par le fait qu'Eskilson a obtenu ces g -function en supposant une température de paroi constante alors que la méthode proposée utilise une condition de flux de chaleur constant à la paroi. Sheriff (2007) présente d'autres comparaisons qui semblent indiquer une plus grande différence entre la méthode proposée et les g -function pour des champs comportant beaucoup de puits faiblement espacés. Cependant, dans la plupart des cas l'écart entre la méthode proposée et la méthode d'Eskilson est inférieur à 5%.

APPLICATIONS

Cette section présente deux exemples d'applications de la méthode proposée pour des installations comportant trois puits alignés. Le premier exemple concerne la recharge du puits central alors que le deuxième montre l'évolution de la température à la paroi des trois puits lorsqu'ils sont alimentés avec un fluide dont la température à l'entrée des puits est identique.

EXEMPLE #1 : RECHARGE DU SOL

Cet exemple, tiré d'une application réelle, utilise une configuration à trois puits. Le puits central est utilisé pour effectuer un rejet thermique et les deux puits externes puisent la chaleur dans le sol et sont reliés à des pompes à chaleur géothermiques servant au chauffage d'une résidence. En référant à la Figure 1, cet exemple est un cas où $q_1 = q_3$ et q_2 est différent de q_1 et q_3 . L'objectif d'une telle installation est de récupérer une partie de l'énergie thermique rejetée au centre par l'intermédiaire des puits aux extrémités. Dans le scénario envisagé, le rejet thermique dans le puits central, q_2 , est de 131 W/m pendant une période de 6 heures par jour (de 15h à 21h). La charge thermique au sol (issue des besoins en chauffage et en climatisation de la résidence) est montrée à la Figure 6.

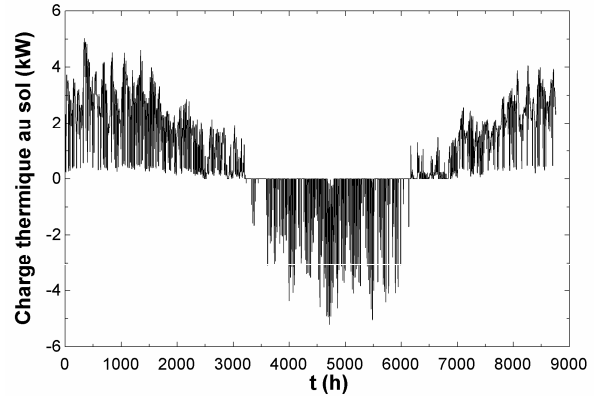


Figure 6 : Évolution de la charge thermique au sol pour chacun des puits externes du champ

Le tableau 1 donne les autres paramètres utilisés pour cette simulation horaire d'une durée de six ans.

Tableau 1 : Paramètres utilisés pour les deux exemples

Paramètres et description	Valeurs	
	Exemple #1	Exemple #2
k Conductivité thermique du sol	2,7 W/m ² °C	3,5 W/m ² °C
r_b Rayon des puits	0,0762 m	0,05 m
α Diffusivité thermique du sol	0,108 m ² /jour	$1,62 \times 10^{-6}$ m ² /s
H Profondeur des puits	53,3 m	100 m
B Distance entre les puits	4,6 m	10 m
T_0 Température du sol non perturbé	11°C	0°C
T_{in} Température du fluide caloporteur à l'entrée du puits	---	10°C
\dot{m} Débit massique du fluide caloporteur dans chaque puits	0,25 kg/s	0,25 kg/s
C_p Chaleur spécifique du fluide caloporteur	4,2 kJ/kg·°C	4,2 kJ/kg·°C

Dans cet exemple, il est supposé que la résistance thermique du puits est négligeable; θ est donc égal à la température moyenne du fluide. Ainsi la température de sortie des puits, T_{out} , est calculée avec les deux équations suivantes :

$$\theta = T_0 - T_b = T_{moy} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (11)$$

$$\text{Charge thermique au sol} = \dot{m} \times C_p \times (T_{out} - T_{in}) \quad (12)$$

Dans le but de vérifier l'impact du rejet thermique central, deux séries de simulations sont présentées, soit avec et sans rejet central (Figure 8 et Figure 7, respectivement).

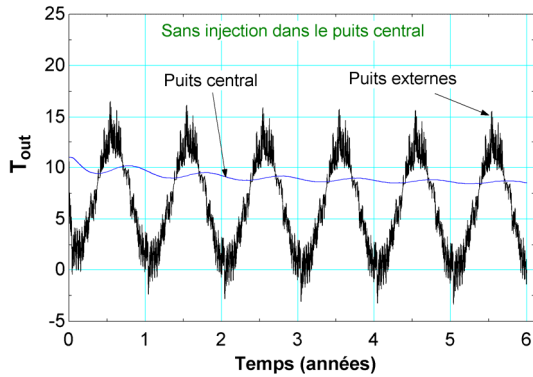


Figure 7 : Évolution de T_{out} pour chacun des 3 puits du champ avec $q_2 = 0$

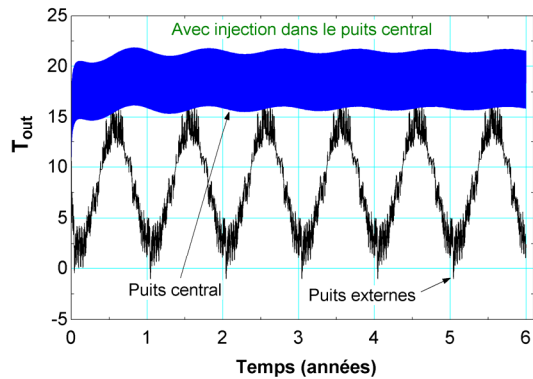


Figure 8 : Évolution de T_{out} pour chacun des 3 puits du champ avec $q_2 \neq 0$

Les deux figures montrent que l'impact d'une injection dans le puits central sur la température du fluide caloporteur à la sortie des puits externes (servant au chauffage et à la climatisation) est minimale. En effet, après 6 ans d'opération, la température T_{out} des puits externes est égale à 0°C sans injection centrale et à $2,4^\circ\text{C}$ avec injection centrale. Cet exemple démontre que la méthode proposée peut être utilisée pour modéliser des systèmes dont la charge est différente pour chacun des puits.

EXEMPLE #2 : TROIS PUITS ALIMENTÉS À DES CONDITIONS IDENTIQUES

Dans l'exemple précédent, il est supposé que Q est connu. Or, dans une situation réelle, c'est plutôt T_{in} qui est connue. Dans ce deuxième exemple, la méthode proposée est utilisée pour calculer la température de sortie du fluide caloporteur, T_{out} (voir Figure 1), pour chacun des puits d'un champ de trois puits alignés lorsque la température d'entrée (T_{in}) est constante et identique pour chacun des puits. Les paramètres utilisés pour cette simulation sont présentés au tableau 1. Dans cet exemple, la résistance thermique du puits est négligée; θ est donc égale à la température moyenne du fluide. Comme Q n'est pas connu, il doit être évalué de façon itérative en utilisant les équations 11 et

12. Donc, à chaque pas de temps, il y aura quelques itérations sur Q jusqu'à ce que la solution converge.

L'évolution de T_{out} et de Q pour chacun des puits du champ pour une durée d'opération d'un an (8760 heures) est présentée à la Figure 9.

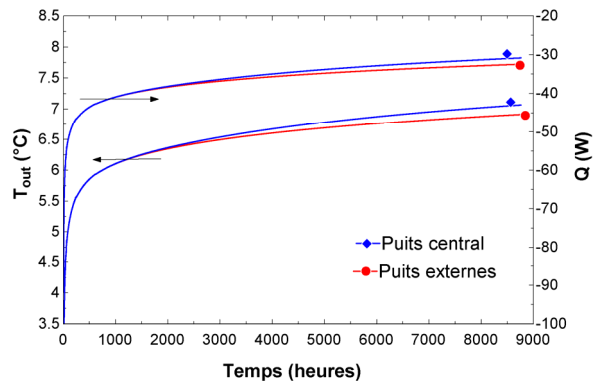


Figure 9 : Évolution de T_{out} et Q pour chacun des puits du champ

La Figure 9 révèle que la température du fluide caloporteur à la sortie des puits augmente, alors que le taux de transfert de chaleur rejeté dans le sol ($|Q|$) diminue. Durant les premières heures d'opération du système, la différence de température entre le sol non perturbé et la paroi du puits est élevée et l'échange de chaleur est très bon. T_{out} augmente rapidement dans cette région (jusqu'à environ $t = 200$ heures). À mesure que la température du sol augmente au voisinage des puits, l'échange de chaleur s'effectue moins bien. Il en résulte une augmentation moins rapide de T_{out} et une diminution de Q . T_{out} et Q sont presque identiques pour les 3 puits jusqu'à environ 1 500 heures (2 mois) d'opération. Ensuite, T_{out} pour le puits central devient plus élevée que pour les 2 puits situés aux extrémités du champ, tandis que le taux de transfert de chaleur rejeté dans le sol par le puits central est plus faible que celui des puits situés aux extrémités. Ceci se produit car la diffusion de la chaleur est meilleure aux extrémités du champ.

La méthode proposée permet de calculer le taux de transfert de chaleur puisé ou rejeté dans le sol et la température du fluide caloporteur à la sortie des puits en ne connaissant que la description physique du champ, les propriétés du sol et du fluide caloporteur, ainsi que le débit massique et la température du fluide caloporteur à l'entrée des puits.

CONCLUSIONS

Cet article traite de la simulation du transfert thermique transitoire dans les champs de puits verticaux de systèmes de pompes à chaleur géothermiques. Une nouvelle méthodologie est proposée pour évaluer la

température à la paroi des puits lorsque les charges thermiques aux puits sont différentes. La méthode s'appuie sur la solution analytique dite de la source linéique finie jumelée aux techniques classiques de superposition spatiale et temporelle. L'agrégation des charges est également utilisée pour réduire le temps de calcul associé à la superposition temporelle.

Les résultats issus de la méthode proposée se comparent favorablement à ceux obtenus avec d'autres méthodes existantes pour des cas où les charges thermiques aux puits sont identiques.

L'utilité de la méthode pour des charges thermiques différentes est illustrée en examinant deux exemples. Le premier concerne la réponse d'un champ de trois puits en ligne dans lequel les deux puits externes puisent de l'énergie du sol alors que de la chaleur est injecté dans le puits central. La nouvelle méthode a permis de déterminer que l'interaction thermique entre le puits central et les deux autres puits est minimale même après six ans d'utilisation. Dans l'autre exemple, trois puits en ligne sont alimentés en parallèle avec un fluide à la même température. Dans ce cas, les résultats montrent que la température de sortie des puits ne sera pas la même pour le puits central et ceux situés aux extrémités.

RÉFÉRENCES

- Bernier, M.A., Pinel, P., Labib, R. Paillot, R. (2004), 'A Multiple Load Aggregation Algorithm for Annual Hourly Simulations of GCHP Systems', *Int. J. of HVAC&R Research*, 10(4), 471-488.
- Bernier, M.A., Kummert, M., Bertagnolio, S. (2007), 'Development and application of test cases for comparing vertical ground heat exchangers', 10th International IBPSA conference, Beijing, 1462-1468.
- Bose, J.E., Parker, J.D., McQuiston, F.C. (1985). *Design/Data Manual for Closed Loop Ground-Coupled Heat Pump Systems*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- Eskilson, P. (1987), *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*, Doctoral Thesis. Lund Institute of Technology, Sweden.
- Hellström, G. (1989). *Ground Heat Storage: Duct Ground Heat Storage Model. Manual for Computer Code*, University of Lund, Sweden.
- Klein, S.A., et 18 autres auteurs (2004), *TRNSYS Manual: A transient system simulation program, Version 16 for Windows*, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin.
- Klein, S.A. (2006). *Engineering Equation Solver (EES). f-chart software*. Madison, Wisconsin.
- Lamarche, L. Beauchamp, B. (2007), 'A New Contribution to the Finite Line-Source Model for Geothermal Boreholes', *Energy and Buildings*, 39(2), 188-198.

Pinel, P. (2003), *Amélioration, validation et implémentation d'un algorithme de calcul pour évaluer le transfert thermique dans les puits verticaux de systèmes de pompes à chaleur géothermiques*, M.Sc.A., Département de Génie Mécanique. Ecole Polytechnique de Montréal, Québec, Canada.

Sheriff, F. (2007), *Génération de facteurs de réponse pour champs de puits géothermiques verticaux*, M.Sc.A., Département de Génie Mécanique. École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada.

Shonder, J.A., Baxter, V.D., Hughes, P.J. (2000), 'A Comparison of Vertical Ground Heat Exchanger Design Software for Commercial Applications', *ASHRAE Transactions*, 106(1), 831-842.

Zeng, H.Y., Diao, N.R., Fang, Z.H. (2002), 'A Finite Line-Source Model for Boreholes in Geothermal Heat Exchangers', *Heat Transfer-Asian Research*, 31(7), 558-567.

Nomenclature

α	diffusivité thermique du sol (m^2/s)
B	distance entre deux puits (m)
C_p	chaleur spécifique du fluide ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$)
D	profondeur isolée thermiquement (m)
F_o	nombre de Fourier (at/H^2)
H	profondeur du puits (m)
k	conductivité thermique du sol ($\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)
\dot{m}	débit massique du fluide (kg/s)
n_b	nombre de puits dans le champ
N_h	nombre d'heures de l'historique thermique récent (h)
N_d	nombre d'heures de la période « quotidienne » (h)
N_w	nombre d'heures de la période « hebdomadaire » (h)
N_m	nombre d'heures de la période « mensuelle » (h)
N_y	nombre d'heures de la période « annuelle » (h)
\underline{Q}	taux de transfert de chaleur puisé ou rejeté dans le sol par unité de longueur (W/m)
R	rayon adimensionnel (r/H)
r	distance à partir du centre du puits (m)
r_b	rayon du puits (m)
t	temps (s)
t_s	temps caractéristique ($=H^2/9\alpha$) (s)
T	température du sol à une distance r du centre du puits ($^\circ\text{C}$)
T_b	température à la paroi du puits ($^\circ\text{C}$)
T_{in}	température du fluide caloporteur à l'entrée du puits ($^\circ\text{C}$)
T_{moy}	température moyenne du fluide caloporteur ($^\circ\text{C}$)
T_{out}	température du fluide caloporteur à la sortie du puits ($^\circ\text{C}$)
T_0	température du sol non perturbé ($^\circ\text{C}$)
T_p	pénalité de température ($^\circ\text{C}$)
θ	différence entre la température du sol non perturbé et la température à la paroi du puits de façon dimensionnelle ($^\circ\text{C}$)
Θ	différence entre la température du sol non perturbé et la température à la paroi du puits de façon adimensionnelle
z	coordonnée verticale (m)
Z	coordonnée verticale adimensionnelle (z/H)