

Analyses expérimentale et numérique des performances énergétiques d'un puits canadien

Geoffroy CHARDOME^{1*}, Véronique FELDHEIM¹

¹UMONS – Faculté Polytechnique – Service Thermique et Combustion

Rue de l'Épargne, 56 – 7000 Mons – Belgique

* (auteur correspondant : geoffroy.chardome@heh.be)

Résumé - Le puits canadien ou EarthHeatExchanger (EHX) est une technique qui consiste à faire passer l'air nécessaire à la ventilation hygiénique d'un bâtiment au sein d'un ou plusieurs tuyaux enterrés dans le sol. Pour pouvoir analyser le potentiel de cette technique, différentes simulations numériques ont été réalisées et les résultats ont été comparés au monitoring d'une installation existante afin de valider les modèles. Pour limiter le temps de calcul du à la configuration 3D instationnaire du problème, un modèle 2D a été utilisé afin de déterminer le champ de température et les flux échangés dans un plan normal à l'axe des tubes.

Nomenclature

c	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	φ	densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$
ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$	h	coefficient de convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	ε	émissivité
a	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$	Re	nombre de Reynolds
T	Température, $^{\circ}C$	Pr	nombre de Prandtl
z	profondeur, m	Nu	nombre de Nusselt
t	temps, s	f	facteur de friction
T_0	température moyenne à la surface, $^{\circ}C$	Φ	flux de chaleur, W
δ	profondeur de pénétration de l'onde de chaleur, m	S	surface, m^2
ω	pulsation de l'onde de chaleur, $rad.s^{-1}$	q	débit massique, $kg.s^{-1}$
		ϵ_a	erreur absolue, K

1. Introduction

Le sol pouvant être assimilé à un milieu homogène semi-infini, la variation périodique de sa température sera amortie et déphasée par rapport à la variation de même période de la température en surface. Pour bénéficier de cet amortissement et de ce déphasage, l'air nécessaire à la ventilation hygiénique d'un bâtiment passe au sein d'un ou plusieurs tuyaux enterrés dans le sol, permettant de diminuer la consommation d'un bâtiment aussi bien en période hivernale qu'en période estivale. Ce principe a déjà fait l'objet de plusieurs études dont la première [1] fait office de référence.

Nous proposons un modèle numérique d'un puits canadien, réalisé à l'aide d'un logiciel de simulation aux éléments finis (COMSOL), qui permet de prendre en compte différents paramètres, comme la nature du sol et les transferts thermiques à la surface de celui-ci. Pour limiter le temps de calcul, la modélisation se fait en 2D en discrétisant les tubes sur leur longueur. Les résultats de ce modèle sont comparés avec ceux obtenus à l'aide du monitoring d'une installation existante réalisé en continu.

Cette étude a pour but de réaliser un modèle numérique simulant le fonctionnement d'un puits canadien. La suite de l'étude s'intéressera à l'apparition naturelle de condensat au sein du puits en fin de période estivale. Le modèle numérique permettra de connaître la quantité de condensat produit et la température de ceux-ci, afin d'estimer le risque sanitaire lié à la

contamination de l'air par les bactéries et moisissures se développant dans les condensats. Ce risque n'a pas pour l'instant fait l'objet de simulation, mais différentes études et relevés [2] [3] ont prouvé qu'il était bien réel, bien que limité par la présence des filtres à l'entrée du groupe de pulsion.

2. Dispositif expérimental et résultats

2.1. Installation étudiée

L'installation est située sur le site du Campus Technique de la Haute École en Hainaut (HEH) à Mons en Belgique.

Le puits canadien est réalisé en PEHD (Polyéthylène Haute Densité) et se compose d'un élément d'aspiration associé à un puits vertical d'un diamètre de 400mm qui s'enfonce dans le sol jusqu'à une profondeur de 1,25 m. Il est ensuite divisé en deux tuyaux ayant chacun un diamètre extérieur de 140 mm et formant un angle afin de s'assurer d'une distance de 1 m entre eux et ainsi éviter qu'un tuyau n'influence la température du sol situé autour du second. Une pente de 3% assure l'évacuation des condensats.

Étant donnée l'implantation du puits, les tuyaux forment un angle de 90° avant de se rejoindre dans un puits vertical de sortie ayant une profondeur de 2 m, un diamètre de 400 mm et dans lequel les condensats sont éliminés à l'aide d'une pompe vide cave. L'air, une fois sorti de ce puits vertical, pénètre dans le vide sanitaire du bâtiment à l'aide d'une canalisation entièrement isolée (afin de limiter les échanges thermiques) et est ensuite aspiré par une ventilation mécanique contrôlée avec récupérateur de chaleur qui pulse cet air dans un local témoin.

Il est à noter que la profondeur de l'installation n'est pas optimale. Le puits canadien devrait normalement avoir une profondeur moyenne de l'ordre de 2,25 m alors que l'installation a été réalisée à une profondeur moyenne de 1,625 m. La température du sol varie donc plus au cours de l'année et le potentiel de rafraîchissement en été et de préchauffage en hiver est réduit. C'est la présence de la nappe phréatique qui a imposé la limitation de la profondeur du puits, car bien que l'étanchéité à l'eau et au radon de celui-ci soit assurée par des manchons thermorétractables, il était techniquement difficile de terrasser sous le niveau de la nappe phréatique. La présence de cette dernière apporte néanmoins un effet positif, car elle favorise les échanges entre le puits canadien et le sol.

2.2. Système de prise de mesures

L'installation est pourvue de thermocouples étanches et blindés afin d'éviter toute erreur de mesure liée à la condensation sur le thermocouple. Ils sont de type "T" sous gaine inox 6 x 150 mm avec bornier étanche et tête PVC. Le raccord est de type "M20" et se fait par presse-étoupe PVC adapté. Le câble de compensation est également de type "T" 2 x 1,34 mm² isolé PVC avec feuillard interne de faradisation en aluminium. Il est possible de relever la température du sol, de l'air extérieur, en différents endroits du puits et bien évidemment à la sortie de celui-ci.

Un thermocouple de type "T" est composé de cuivre et de constantan (alliage de cuivre et de nickel). Sa précision est très importante et l'erreur standard est comprise entre 0,75% et 1%.

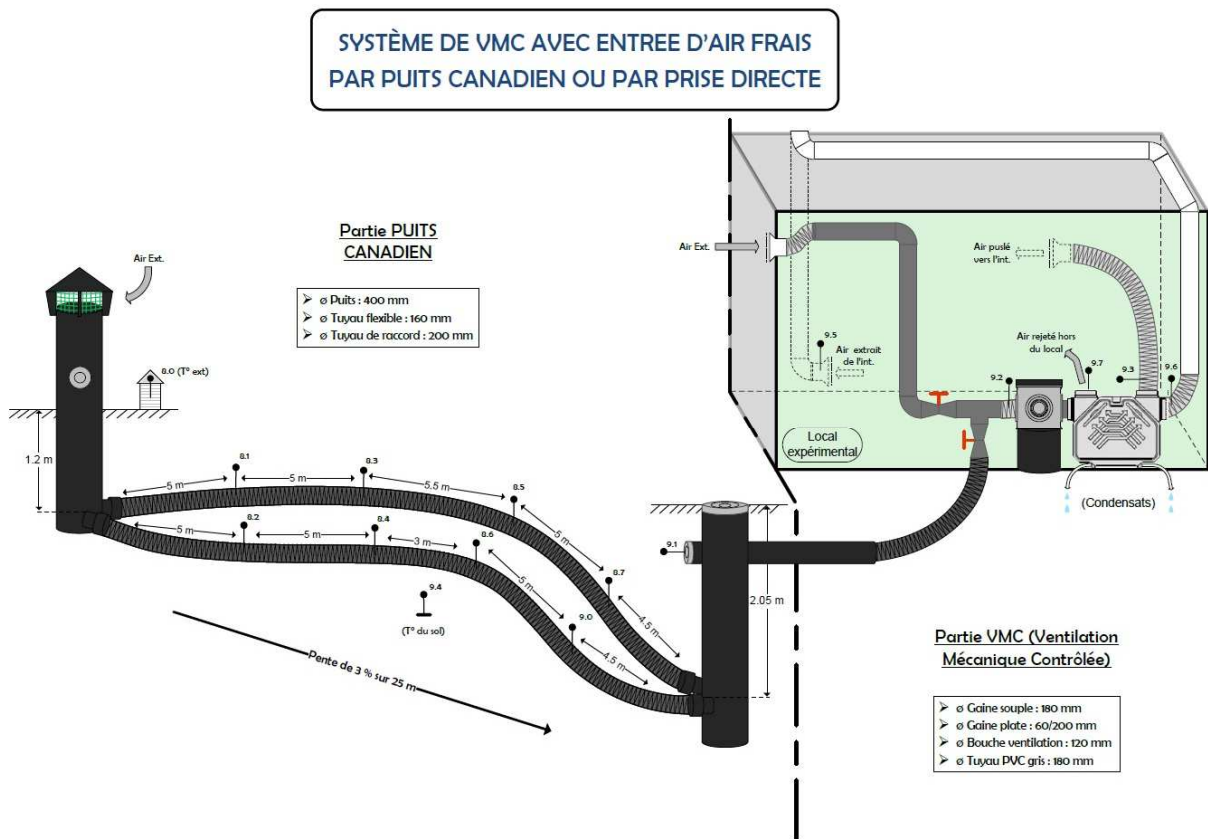


Figure 1 : Schéma de l'installation monitorée et emplacement des thermocouples.

2.3. Type de sol étudié

Étant donnée la réalisation d'une campagne géotechnique, due à des travaux liés à la canalisation d'une rivière toute proche, la profondeur de la nappe phréatique et la composition du sol au niveau du puits canadien sont connues, bien qu'il soit composé de remblai pour des raisons historiques.

La nappe phréatique se situe à une profondeur de 2,5m et la nature du sol est de type remblai sablo-caillouteux brunâtre non plastique dont les caractéristiques sont les suivantes :

	c	ρ	λ	a	ε
	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	$kg.m^{-3}$	$W.m^{-1}.K^{-1}$	$m^2.s^{-1}$	
Sol	1000	1800	0,58	$3,222.10^{-7}$	0,95

Tableau 1 : Caractéristiques physiques du sol

2.4. Résultats expérimentaux

Le monitoring relève toutes les 15 minutes, la température extérieure, la température du sol à 2m de profondeur, les températures dans chacun des tuyaux tous les 5m et la température en sortie du puits. Pour limiter les données de simulation, une moyenne des mesures a été réalisée pour disposer de valeurs horaires.

L'année de référence est l'année 2015 et afin de limiter l'impact du choix des valeurs initiales dans les modèles numériques, les relevés commencent le 01 décembre 2014 à 01 :00h du matin, ce qui correspond à l'heure -743. Le 01 janvier 2015 à 00 :00h est prise comme référence à 0h et le 01 janvier 2016 à 00 :00 h correspond à l'heure 8760.

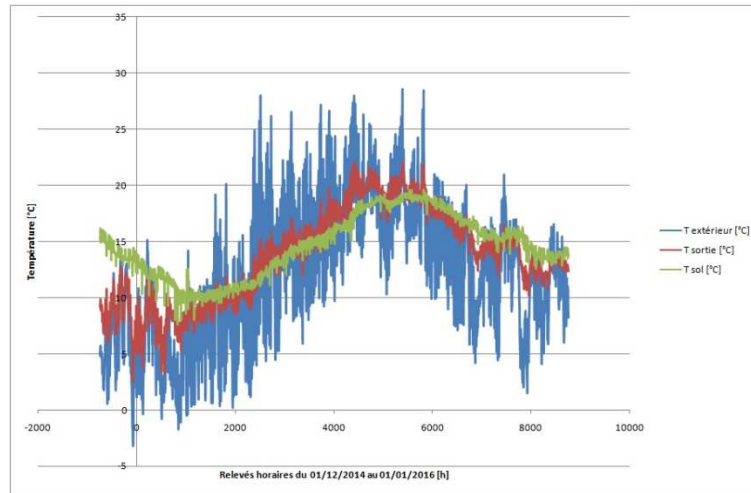


Figure 2 : Relevés des températures du sol à 2m de profondeur et des températures d'entrée et de sortie du puits du 01/12/2014 au 01/01/2016.

2.5. Débit et vitesse de l'air au sein du puits

Étant donné que l'installation est en réalité composée de deux tuyaux, il est intéressant d'observer l'évolution de la température à l'intérieur de chacun d'eux. Pour cela, nous avons comparé les températures au niveau des sondes 8.3 et 8.4, placées toutes deux à une distance de 11,20m de l'entrée du puits.

Les températures au niveau de ces deux sondes sont fort proches et on peut donc en conclure que les échanges sont identiques au sein de chacun des tuyaux. La vitesse à l'intérieur des tuyaux étant la seule inconnue influençant l'échange de chaleur, elle doit avoir une valeur assez proche dans les deux tuyaux et nous pouvons affirmer que le débit se répartit de manière homogène à l'intérieur des tuyaux.

Le débit d'air circulant dans le puits est de 250 m³/h, nous considérons donc qu'un débit d'air de 125 m³/h circule à l'intérieur de chacun des tuyaux.

3. Modèle numérique

La simulation du problème 3D instationnaire exigeant des temps de calcul assez importants, nous simplifions l'analyse en étudiant un modèle 2D. Nous discrétisons les tubes sur leur longueur et intégrons le transfert de chaleur sur la longueur en supposant constant, sur un tronçon, le flux de chaleur calculé dans la section 2D.

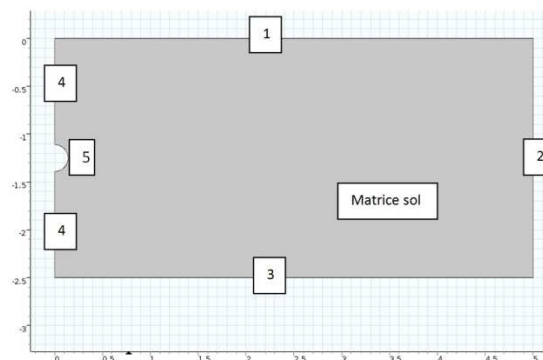


Figure 3 : Modèle 2D pour les simulations numériques.

Différents modes de transfert de chaleur ont lieu au sein du sol. La conduction, l'évaporation, la transpiration, la convection et le rayonnement. Pour une approche simplifiée du champ des températures dans le sol, une modélisation suivant un modèle conductif pur est acceptable. En effet, les échanges radiatifs sont assez faibles au vu des petites différences de températures. L'évaporation et la convection peuvent également être négligées comme le démontre une étude sur les transferts de chaleur en milieu poreux [4].

3.1. Conditions initiales

La température moyenne à proximité de la surface du sol est généralement fort proche de la température moyenne annuelle extérieure. La modélisation du champ de température dans un sol ayant déjà été analysée dans de nombreuses études, nous reprendrons ici la résolution analytique de l'équation de Fourier - Kirchhoff à diffusivité thermique constante pour un milieu homogène semi-infini dont la surface est soumise à une variation sinusoïdale de température autour de la température moyenne annuelle.

$$T(z, t) = T_0 + dT_0 \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \cdot \cos\left(\omega(t - t_0) - \frac{z}{\delta}\right) \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} \quad (2)$$

La température de la matrice sol a été définie comme étant égale à la température du sol à une profondeur de 1m le 01 décembre 2014, date de début de simulation. Elle vaut donc 15,2 °C.

3.2. Conditions limites du modèle 2D

Les différentes conditions limites du modèle 2D sont identifiées sur la figure 3.

3.2.1. Frontière 1

La frontière 1 représente l'interface entre le sol et l'ambiance extérieure. La conservation de l'énergie s'y exprime sous la forme :

$$\vec{n} \cdot (\lambda \cdot \vec{\nabla} T) = \varphi_0 + h \cdot (T_{\text{ext}} - T) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{amb}}^4 - T^4) \quad (3)$$

Pour simplifier le modèle, la température T_{amb} est assimilée à la température T_{ext}

3.2.2. Frontière 2

Cette frontière est considérée comme étant adiabatique, il n'y aura pas d'échange de chaleur.

3.2.3. Frontière 3

La frontière 3 représente la nappe phréatique, c'est une condition de Dirichlet et la température y a été définie comme étant la moyenne arithmétique des températures extérieures de l'année 2015, soit : 12,5 °C

3.2.4. Frontière 4

Cette frontière est le plan de symétrie du modèle et sera donc considérée comme étant adiabatique.

3.2.5. Frontière 5

La frontière 5 représente l'intérieur du tube et seuls les échanges par convection seront considérés, c'est donc une condition de Fourier. La conservation de l'énergie s'y exprime sous la forme :

$$\vec{n} \cdot (\lambda \cdot \vec{\nabla} T) = h \cdot (T_{\text{air}} - T_{\text{paroi}}) \quad (3)$$

Ayant connaissance de la température de l'air et de sa vitesse, nous pouvons calculer le Re, le Pr et le Nu pour déterminer le coefficient de convection exacte entre l'air situé dans le tronçon et la paroi intérieure du tuyau.

Le Nu et le f ont été calculés suivant la formule de Gnielinski [2] :

$$f = (0,790 \cdot \ln Re - 1,64)^{-2} \quad \text{applicable pour des tubes lisses} \quad (4)$$

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad \text{applicable pour} \quad \left[\begin{array}{l} 0,5 < Pr < 2000 \\ 2300 < Re < 5 \cdot 10^6 \end{array} \right] \quad (5)$$

Les nombres de Prandtl et de Reynolds sont respectivement de l'ordre de 0,716 et de $22 \cdot 10^3$ au sein du puits.

Le coefficient de convection h a été considéré comme constant et sa valeur est de $9,26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, soit le h obtenu pour la température moyenne de l'année : $12,5^\circ\text{C}$.

3.3. Intégration le long du tube

Le résultat de la simulation 2D nous permet de déterminer le flux de chaleur échangé entre la surface interne du tuyau et l'air qui circule à l'intérieur (on considère la température moyenne au droit de la paroi pour chaque heure).

$$\Phi = h \cdot (T_{\text{paroi,m}} - T_{\text{air,in}}) \cdot S_{\text{tronçon}} \quad (6)$$

Nous déterminons ensuite, pour le tronçon considéré, la température de l'air à sa sortie en faisant l'hypothèse de la constance de ce flux sur tout le tronçon :

$$\Phi = q_{\text{air}} c_{\text{air}} (T_{\text{air,out}} - T_{\text{air,in}}) \quad (7)$$

4. Résultats des simulations numériques

Plusieurs simulations numériques ont été réalisées en discrétisant le puits en différentes longueurs dans un premier temps et en modifiant ensuite la profondeur du puits pour tenir compte de la pente de 3% de celui-ci qui rapproche les derniers tronçons de la nappe phréatique.

Le maillage 2D choisi comporte 528 éléments triangulaires, 66 éléments d'arêtes et 7 éléments ponctuels. La simulation numérique d'un tronçon résout 1123 degrés de liberté (voir figure 4).

Une étude d'indépendance de maillage a été effectuée sur la simulation de 1 tronçon de 25m. Le premier maillage de 1162 éléments triangulaires, 102 éléments d'arêtes et 7 éléments ponctuels, donne une erreur absolue de 0,31 K plus faible que celle du maillage de référence. Le deuxième maillage de 3455 éléments, 167 éléments d'arêtes et 7 éléments ponctuels, donne une erreur absolue de 0,21 K plus élevée que celle du maillage de référence. Les erreurs absolues ont été calculées à l'aide de l'équation (8).

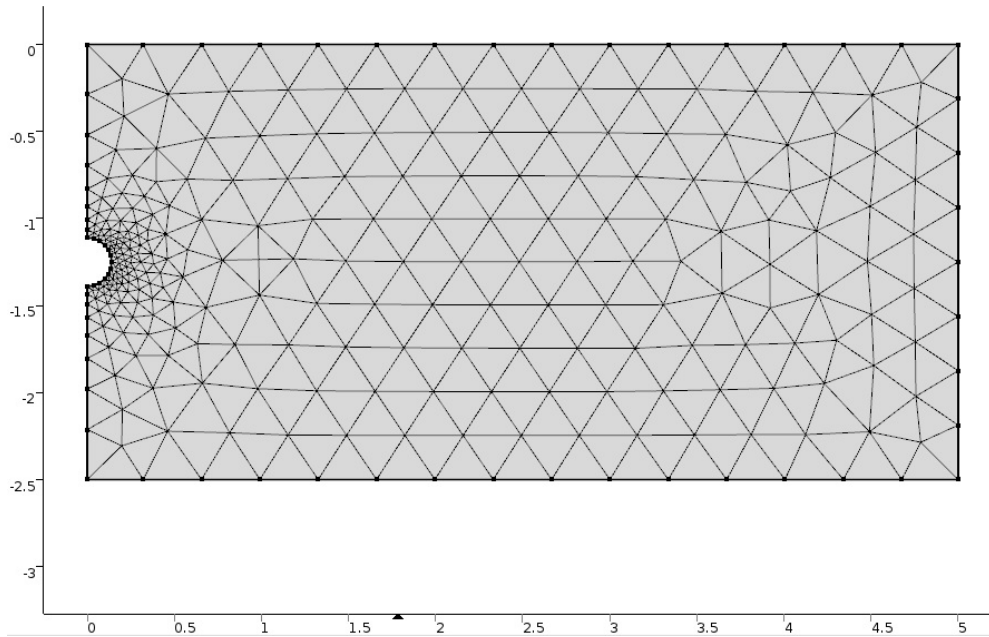


Figure 4 : Maillage de référence choisi pour la résolution d'une section 2D.

Afin de comparer la précision des différentes simulations, nous avons calculé la différence de température entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées pour l'ensemble de l'année 2015. Nous avons ensuite calculé une moyenne des erreurs absolues suivant la formule :

$$\epsilon_a = \frac{\sum_{i=1}^{8760} |T_{\text{mesurée } i} - T_{\text{simulée } i}|}{8760} \quad (8)$$

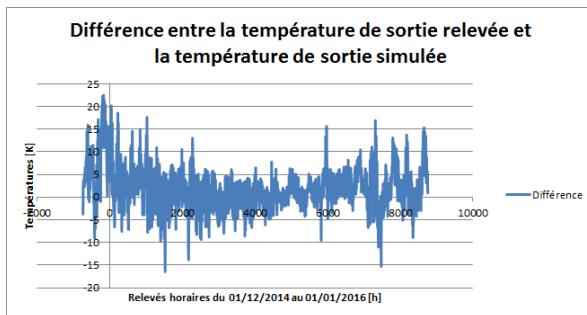


Figure 5 : 1 tronçon de 25m à une profondeur de 1,25m

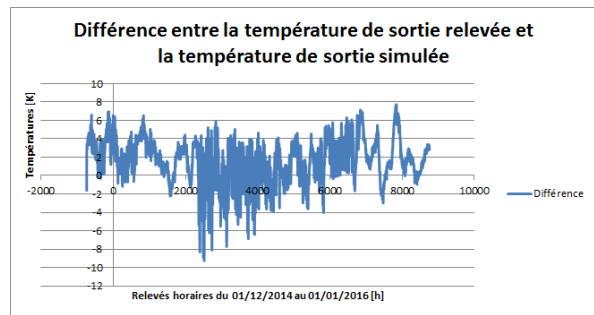


Figure 6 : 5 tronçons de 5m à une profondeur de 1,25m

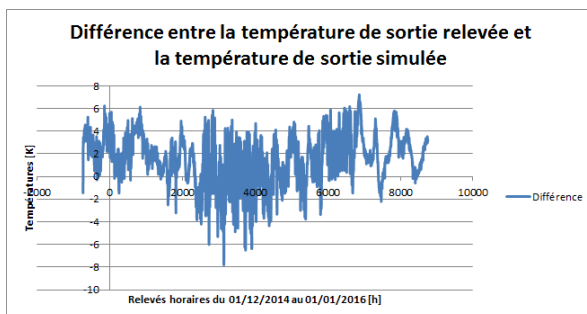


Figure 7 : 10 tronçons de 2,5m à une profondeur de 1,25m

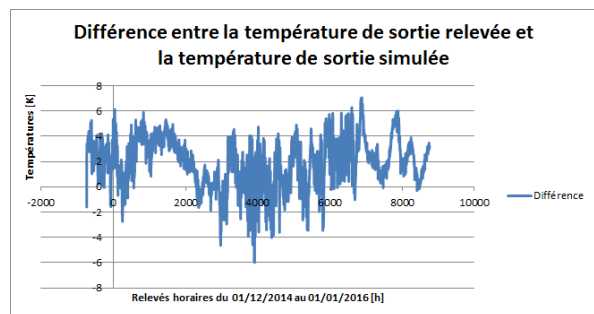


Figure 8 : 5 tronçons de 5m à des profondeurs variables (« pente » de 3%)

	<i>Simulation 1</i>	<i>Simulation 2</i>	<i>Simulation 3</i>	<i>Simulation 4</i>
ϵ_a	3,0724	2,218	2,122	2,231

Tableau 2 : *Moyenne des erreurs absolues en Kelvin des différentes simulations par rapport aux relevés*

Les résultats des différentes simulations montrent l'importance d'une discrétisation en des tronçons de petites longueurs au vu du gain en précision. En analysant uniquement les erreurs absolues obtenues pour les simulations 2 et 4, nous pourrions conclure que la prise en compte de la pente de 3% dans les simulations n'apporte pas de précision supplémentaire. Toutefois, un examen plus précis des graphiques de ces deux simulations montre que les résultats de la simulation 4 donnent des écarts maximum moins élevés que les résultats de la simulation 2.

Nous pouvons également constater que les températures simulées sont globalement moins élevées que les températures mesurées, ce qui pourrait s'expliquer par la nature du sol considérée comme homogène alors que celui-ci est composé de remblai et donc hétérogène.

5. Conclusion

Le but de cette étude était la réalisation d'un modèle numérique simulant le fonctionnement d'un puits canadien. Au vu des résultats obtenus, nous avons pu montrer le gain en précision obtenu par une discrétisation plus importante des tuyaux du puits canadien et l'intérêt de prendre en compte la dénivellation entre l'entrée et la sortie de la partie horizontale du puits.

Bien que les simulations donnent des résultats intéressants, plusieurs améliorations sont envisagées comme affiner le modèle pour se rapprocher des valeurs mesurées et développer une routine pour informatiser le processus de modélisation en 2D. L'étude d'indépendance du maillage doit également être complétée pour les autres discrétisations longitudinales.

Il serait également intéressant de réaliser une modélisation 3D du puits canadien pour vérifier que les valeurs obtenues sont proches de celles mesurées et ainsi cautionner les hypothèses de modélisation choisies comme la nature du sol, l'abstraction de certains transferts de chaleur au sein de la matrice sol ou à l'interface avec l'environnement extérieur.

Un autre phénomène actuellement étudié [6] pourrait également expliquer les différences entre les valeurs mesurées et simulées. En effet, les caractéristiques physiques du sol sont considérées comme constantes tout au long de l'année, alors que son humidité varie au cours du temps et modifie ses caractéristiques physiques.

Références

- [1] P. Hollmuller, *Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments*. Thèse de doctorat à la Faculté des Sciences - Université de Genève (2002)
- [2] S. Déoux, *Mission d'évaluation sanitaire du puits canadien - Siège social du Groupe Millet, Medieco* (2011)
- [3] M. Barbat, *Nettoyabilité des puits climatiques*, Costic (2012)
- [4] P. Burton, *Analyse et simulation numérique des performances du stockage géothermique de l'énergie solaire pour chauffer des bâtiments*. Master's thesis, Faculté Polytechnique de Mons (2006).
- [5] A.F. Mills, *Heat Transfer*, McGraw-Hill Inc.,US (1992)
- [6] Projet Effipuits, *Performance énergétique de puits canadien : impact du retour d'expérience sur les données d'entrée de la simulation*, Université de Toulouse (2012)