

Modélisations numériques 2D/3D d'un échangeur air-sol validées par des relevés expérimentaux.

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 – L'échangeur air-sol ou puits canadien est une technologie utilisée dans la construction pour réaliser un préchauffage de l'air de ventilation en hiver et un rafraîchissement passif en été. Elle utilise la capacité thermique de la terre, pour amortir et déphaser la variation périodique de la température extérieure. Un modèle numérique pseudo-3D a été réalisé afin de simuler le fonctionnement de cet échangeur. Les résultats obtenus ont été comparés, à la fois à des relevés expérimentaux réalisés sur une installation existante durant une année, et également à ceux obtenus avec des simulations réalisées sur base d'un modèle 3D.

Nomenclature

c	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	h	coefficient de convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$
ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$	ε	émissivité
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	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, $kg.s^{-1}$
φ	densité de flux de chaleur solaire, $W.m^{-2}$	ϵ_a	erreur absolue, K
		v	vitesse, $m.s^{-1}$

1. Introduction

La présente étude a pour but de réaliser un modèle numérique permettant la simulation d'un échangeur air-sol afin de quantifier les condensats produits durant certaines périodes de l'année. En effet, les condensats stagnants dans un échangeur air-sol peuvent être à l'origine de développement de moisissures et de bactéries représentant un risque sanitaire. La présence de filtres au niveau du système de ventilation semble être une mesure suffisante pour éviter ce risque sanitaire, comme le démontrent les études [1] et [2]. Toutefois, une étude détaillée de ce risque s'avère nécessaire, une rupture du système de filtration ne pouvant être exclue. Cet article traite de la réalisation du modèle numérique simulant le fonctionnement d'un échangeur air-sol. Il fait suite à un précédent article [3] qui reprend les données détaillées de l'installation témoin, monitorée en continu, et dont les relevés permettent la validation des modèles numériques. Nous proposons une analyse systématique de modèles numériques dans laquelle les résultats des modèles pseudo 3D seront comparés à des modèles 3D ainsi qu'aux données récoltées sur l'installation existante. Les modélisations pseudo 3D discrétisent les tuyaux sur leur longueur en différents tronçons au sein desquels le flux de chaleur est supposé constant. La modélisation 2D d'un tronçon est réalisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics et une interface MATLAB permet la réalisation d'une routine pour traiter les résultats en sortie de tronçon et définir les caractéristiques physiques de l'air à l'entrée du tronçon suivant. Les modélisations sont réalisées pour une année complète avec un pas de

temps restreint d'une heure pour pouvoir étudier les effets de l'échangeur sur la variation périodique annuelle ou journalière des températures. Les échanges par convection dus au vent sur la surface du sol sont intégrés aux modèles et peuvent être paramétrés, tout comme la nature du sol ou la profondeur de la nappe phréatique.

2. Dispositif expérimental

L'installation est située sur le site du Campus Technique de la Haute École en Hainaut (HEH) à Mons en Belgique. Le puits est directement relié au système de ventilation du bâtiment : la totalité de l'air pulsé dans le bâtiment passe dans ce puits. 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. Le débit d'air circulant dans le puits est de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, nous considérons donc qu'un débit d'air de $125 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ circule à l'intérieur de chacun des tuyaux. 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", donc composés de cuivre et de constantan (alliage de cuivre et de nickel). La précision est très importante et l'erreur absolue est de l'ordre de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

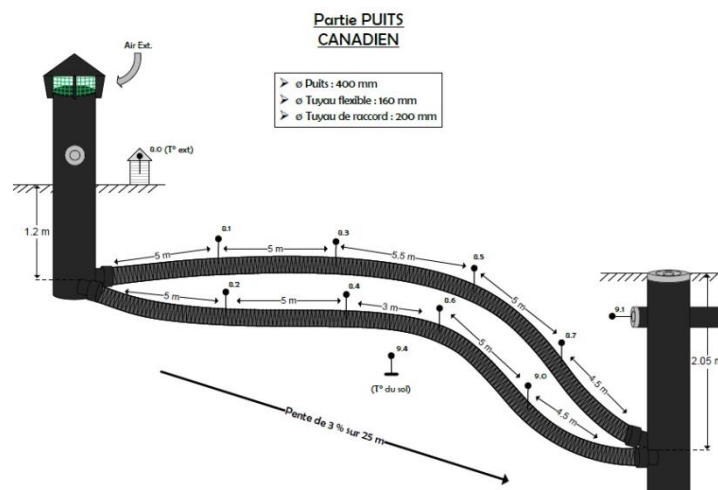


Figure 1 : Schéma de l'installation monitorée et emplacement des thermocouples.

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	ε
	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
Sol	1000	1800	0,58	0,95

Tableau 1 : Caractéristiques physiques du sol

3. Modèles numériques.

Dans le modèle pseudo 3D, le puits est discrétisé sur sa longueur en différentes parties appelées tronçons. Le flux de chaleur échangé entre le sol et l'air intérieur du puits, et calculé dans la section 2D, est considéré comme constant au sein de chaque tronçon.

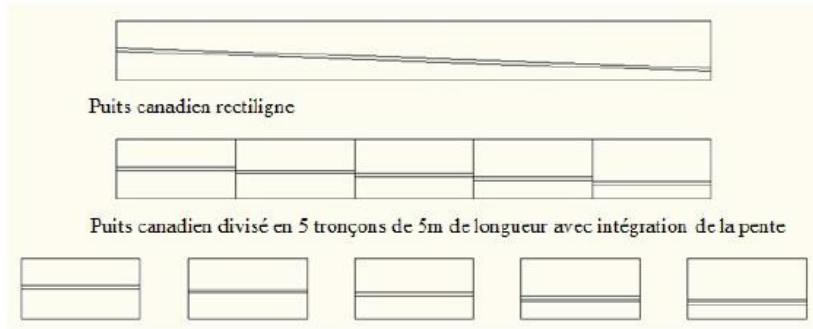


Figure 3 : Modélisation pseudo 3D, discrétisation du puits en différents tronçons.

Bien que différents modes de transfert de chaleur aient lieu au sein du sol, un modèle conductif pur est acceptable comme le démontre [4]. C'est généralement cette modélisation qui est rencontrée dans la littérature comme dans l'étude [5] faisant référence en la matière. Après modélisations et analyses, il a été déterminé que les parties verticales du puits, ayant un diamètre intérieur important de 400 mm, ont un impact très limité sur les échanges de chaleur. Elles ne sont donc pas intégrées aux différents modèles.

3.1. Conditions initiales

La température de la matrice sol a été définie 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 4.

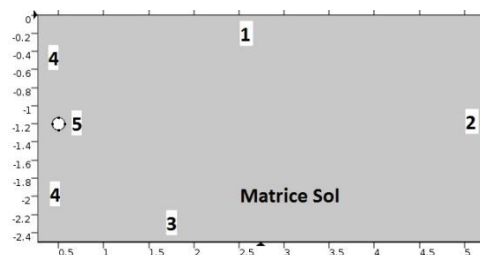


Figure 4 : Conditions limites du modèle 2D.

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

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

Pour simplifier le modèle, la température T_{amb} est assimilée à la température T_{ext} . La frontière 2 est considérée comme étant adiabatique. La frontière 3 représente la nappe phréatique, c'est une condition de Dirichlet. La température y a été définie comme étant la moyenne arithmétique des températures extérieures de l'année 2015, soit : 12,5 °C. La frontière 4 est le plan de symétrie du modèle et sera donc considérée comme étant adiabatique. 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 :

$$\vec{n} \cdot (\lambda \cdot \vec{\nabla} T) = h_{\text{tube}} \cdot (T_{\text{air}} - T_{\text{paroi}}) \quad (4)$$

T_{paroi} varie en fonction du nœud considéré, raison pour laquelle une valeur moyenne $T_{\text{paroi,m}}$ est calculée. Cette valeur renvoyée par le modèle permet, ayant connaissance de la

température de l'air et de sa vitesse, de calculer le Re, le Pr et le Nu pour déterminer le coefficient de convection 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 [6] :

$$f = (0,790 \cdot \ln Re - 1,64)^{-2} \quad \text{applicable pour des tubes lisses} \quad (5)$$

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

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.

3.3. Conditions limites du modèle 3D

Le modèle 3D utilise la physique « transfert de chaleur dans les solides » pour modéliser le comportement thermique du sol et la physique « transfert de chaleur en conduite » pour la modélisation du puits. Ces physiques sont des modules directement intégrés au logiciel COMSOL. Les conditions limites du modèle 3D sont identiques à celles du modèle 2D décrites au point précédent à l'exception de la frontière 5 du modèle 2D remplacée par la physique « transfert de chaleur en conduite » qui prend en compte une résistance de film interne forfaitaire de 3,66 Nusselt (calcul de la sous-couche visqueuse) pour les sections circulaires et un transfert de chaleur par conduction au sein du matériau composant le tuyau. L'épaisseur du tuyau est de 1 mm et son λ est estimé à $0,49 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

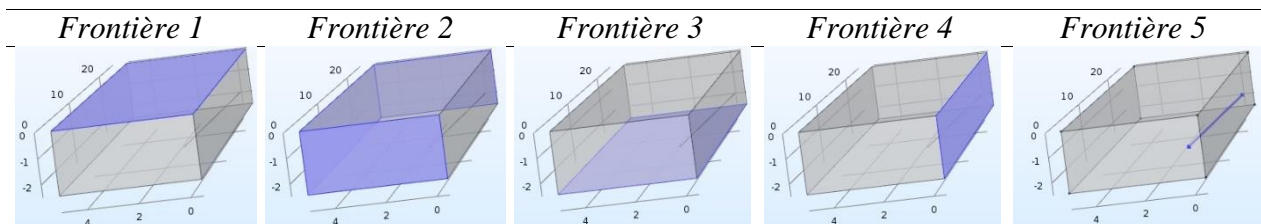


Tableau 2 : Conditions limites du modèle 3D

3.4. Intégration le long du tube pour le modèle pseudo 3D

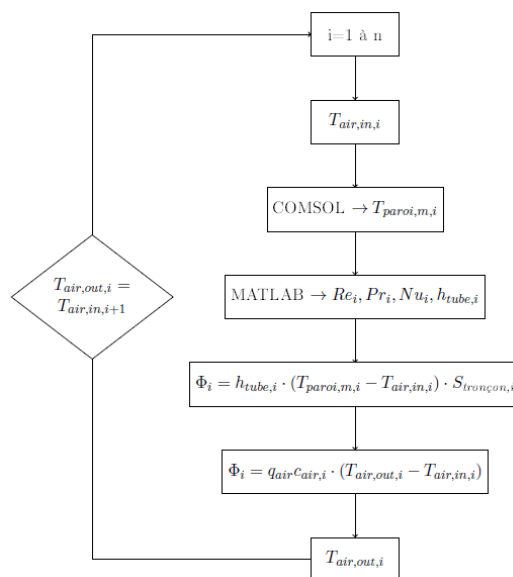


Figure 5 : Algorithme de résolution d'un problème 3D instationnaire à l'aide d'un modèle 2D

Le résultat de la simulation 2D (COMSOL – voir figure 5) 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).

$$\Phi = h_{\text{tube}} \cdot (T_{\text{paroi,m}} - T_{\text{air,in}}) \cdot S_{\text{tronçon}} \quad (7)$$

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 :

$$\Phi = q_{\text{air}} c_{\text{air}} (T_{\text{air,out}} - T_{\text{air,in}}) \quad (8)$$

La température de l'air à la sortie du tronçon considéré est alors renvoyée dans le modèle 2D comme étant la température de l'air à l'entrée du tronçon suivant.

3.5. Paramètres d'entrée pour l'étude de sensibilité des résultats

3.5.1. Discrétisation du puits – uniquement pour le modèle pseudo 3D

Chaque partie horizontale du puits fait 25 m de longueur et les conditions de circulation de l'air sont identiques dans chacun des deux tuyaux constituant le puits. Plusieurs simulations numériques ont été réalisées en discrétisant le puits en différentes longueurs, 1 x 25 m, 5 x 5 m, 10 x 2,5 m et 25 x 1 m.

3.5.2. Pente du puits

La profondeur des parties « horizontales » du puits est de 1,2 m en entrée et de 1,95 m en sortie étant donné la pente de 3% permettant l'écoulement des condensats. Il est possible de prendre en compte cette pente en donnant à chaque tronçon du puits sa profondeur moyenne réelle.

3.5.3. Caractéristiques du sol

La masse volumique du sol a pu être mesurée et déterminée et ne sera donc pas modifiée. En ce qui concerne la capacité thermique et la conductivité thermique du sol, elles ont été choisies en se basant sur les valeurs usuelles pour le type de sol considéré reprises dans le tableau 1. Toutefois, de par la nature hétérogène du sol, différentes simulations ont été réalisées en prenant une c de 1000 ou de 900 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et un λ de 0,58, 0,85 ou 1 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

3.5.4. Profondeur et température de la nappe phréatique

La profondeur de la nappe phréatique a été estimée à 2,5 m en se basant sur un rapport d'analyse de sol. La profondeur de la nappe phréatique pouvant varier dans le temps, des simulations pour des profondeurs de 2,05 m, 2,5 m, 3 m, 4 m, 10 m et 50 m ont été réalisées.

La température de la nappe phréatique est la frontière 3 du modèle numérique comme indiqué sur la figure 4. Elle a été initialement prise égale à 12,5 °C, mais disposant des températures du sol à une profondeur de 2 m pour l'ensemble de l'année 2015, cette température de nappe a pu être considérée comme étant égale à la température du sol à 2 m de profondeur ou comme étant la moyenne de ces températures, soit 13,4 °C.

3.5.5. Coefficient de convection au niveau de la paroi du tube – Uniquement pour le modèle 2D

Ce coefficient h_{tube} a, pour les premières simulations, été considéré comme constant et égal à une valeur de 9,26 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, soit le h obtenu pour la température moyenne de l'année, 12,5 °C.

Dans un deuxième temps, ce coefficient a été considéré comme une variable dans les simulations et calculé à chaque pas de temps et pour chaque tronçon en fonction des caractéristiques thermiques et mécaniques de l'air suivant les formules 5 et 6 au niveau de la frontière 5. Sa valeur varie entre $9,05 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $9,49 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

3.5.6. Coefficient de convection au niveau de la surface du sol

Pour les premières simulations, ce coefficient h_{surface} a été considéré comme constant et valant $23 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Dans un deuxième temps, ce coefficient a été considéré comme une variable dans les simulations et calculé à chaque pas de temps en fonction des caractéristiques thermiques de l'air et de la vitesse du vent. Pour calculer ce coefficient, deux méthodes ont été utilisées.

Pour la première méthode, l'écoulement est considéré comme un écoulement longitudinal parallèle à une plaque plane de longueur d . Cette longueur d a été initialement considérée comme étant égale à 10 m pour être ensuite modifiée en tenant compte de l'implantation du puits et en faisant varier la valeur de d par pas de 5 m de 10 m à 55 m.

Les formules empiriques reprises dans [6] permettant le calcul de ce coefficient de convection sont :

$$\text{Nu} = 0,664 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \quad \text{applicable pour } \text{Re} < 4 \cdot 10^5 \quad (9)$$

$$\text{Nu} = 0,037 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \quad \text{applicable pour } \text{Re} \geq 4 \cdot 10^5 \quad (10)$$

Le nombre de Reynolds est calculé sur base de la vitesse du vent et de la dimension caractéristique d choisie. Les valeurs de h_{surface} obtenues pour un d égal à 10 m sont comprises entre $0 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $42,53 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, alors que pour un d égal à 55 m, elles oscillent entre $0 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $30,24 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

La deuxième méthode se base sur une équation empirique reprise dans les ouvrages et articles [7], [8] et [9], liant le coefficient de convection h_{surface} et la vitesse du vent. Cette équation vaut :

$$h_{\text{surface}} = 0,5 + 1,2 \cdot \sqrt{v_{\text{vent}}} \quad (11)$$

3.6. Maillage du modèle 2D et du modèle 3D

Plusieurs simulations ont été réalisées à l'aide de différents maillages afin de s'assurer de l'indépendance du choix du maillage. Le logiciel COMSOL permet un choix de maillage semi-automatique dont les caractéristiques pour une nappe phréatique située à 2,5m sont reprises dans le tableau 3.

	<i>Maillage normal</i>	<i>Maillage plus fin</i>	<i>Maillage extrêmement fin</i>	<i>Maillage 3D</i>
Points du maillage	483	798	6727	414
Éléments triangles	892	1484	13130	546
Éléments d'arêtes	74	112	324	124
Éléments ponctuels	8	8	8	10
Temps de simulation	218 s	353 s	2657 s	1794 s
ϵ_a – Erreur absolue moyenne	0,98 K	0,98 K	0,98 K	1,04 K
ϵ_{max} – Erreur maximum	3,19 K	3,19 K	3,19 K	3,50 K

Illustrations

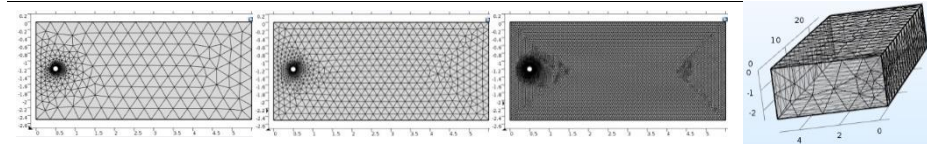


Tableau 3 : Caractéristiques des différents maillages étudiés

4. Résultats des simulations numériques

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 valeurs absolues des erreurs suivant la formule :

$$\epsilon_a = \frac{\sum_{i=1}^{8760} |T_{\text{mesurée } i} - T_{\text{simulée } i}|}{8760} \quad (12)$$

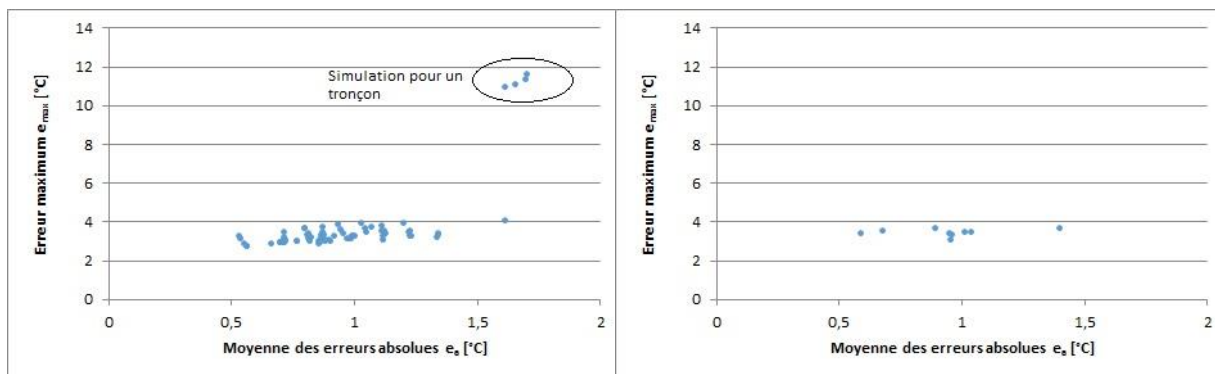


Figure 6 : Comparaison entre les relevés et les simulations du modèle pseudo 3D.

Figure 7 : Comparaison entre les relevés et les simulations du modèle 3D.

Nous pouvons constater dans la figure 6 que les simulations numériques permettent d'obtenir des résultats intéressants. Une erreur absolue moyenne de l'ordre de 0,7 °C et une erreur maximum inférieure à 3 °C sont possibles avec le modèle pseudo 3D. L'ensemble des simulations tend également à prouver que la discrétisation du puits, dans le modèle pseudo 3D, en un grand nombre de tronçons n'apporte pas d'amélioration sur la précision des résultats. Toutefois, la comparaison des résultats aux simulations réalisées pour un tronçon unique, met en avance l'importance d'une discrétisation minimale de la longueur du puits comme le montre la figure 6.

La prise en compte de la pente du puits aurait un effet néfaste sur les résultats, mais ce phénomène pourrait être lié à la présence de la nappe phréatique affleurant au puits. En effet, plus la profondeur de la nappe phréatique est importante, plus la prise en compte de la pente du puits dans les simulations donne des résultats proches des relevés expérimentaux par rapport au fait de prendre une profondeur de puits constante. Un maillage dit "Normal" permet d'obtenir des résultats suffisamment précis et il n'est donc pas nécessaire de choisir des maillages plus fins augmentant inutilement le temps de calcul, ce qui est illustré dans le tableau 3.

Les propriétés physiques du sol ont un impact sur les résultats des simulations. Quand la conductivité passe de 0,58 à 0,85 W.m⁻¹.K⁻¹, les résultats sont plus précis par rapport aux relevés expérimentaux si la variation de profondeur du puits est prise en compte. Dans le cas d'une profondeur fixe de 1,2 m, son impact est très faible. Le fait de prendre une c de 900 au lieu de 1000 J.kg⁻¹.K⁻¹, ou de modifier le λ de 0,85 à 1 W.m⁻¹.K⁻¹, n'influence pas les résultats

des simulations de manière significative. La deuxième méthode de calcul du h_{surface} donne des résultats de simulations supérieurs de $0,45\text{ °C}$ en ϵ_a par rapport aux résultats obtenus avec la première méthode de calcul et un d de 10 m . En augmentant la distance d de 10 m à 55 m , le h_{surface} sera augmenté et les résultats des simulations gagneront en précision de l'ordre de $0,07\text{ °C}$ en ϵ_a . Le choix d'effectuer un calcul du h_{tube} pour chaque pas de temps et pour chaque tronçon n influence pas réellement les résultats des simulations par rapport à la valeur choisie de $9,26\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Les résultats obtenus à l'aide du modèle 3D ne sont pas plus précis que ceux obtenus en utilisant le modèle pseudo 3D mais permettent de valider ce dernier. Le temps de calcul est limité grâce à ce modèle pseudo 3D et il pourra donc être utilisé dans la suite de l'étude pour la modélisation de l'apparition de condensats au sein de puits.

5. Conclusion

Nous pouvons conclure que l'écart entre le résultat des simulations et la prise de mesure est assez faible. Un modèle numérique concluant a été développé et peut servir de base pour la suite des études bien que certains paramètres pourraient encore nécessiter une analyse complémentaire. Le puits sera discrétisé en cinq tronçons, la pente du puits sera prise en compte et la profondeur de chaque tronçon sera donc différente. ρ sera de 1800 kg.m^{-3} , c de $1000\text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et λ de $0,58\text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. La profondeur de la nappe phréatique étant variable tout au long de l'année, une profondeur de $2,5\text{ m}$ sera retenue. Les coefficients de convection au niveau de la paroi du tube et du sol seront considérés comme variables et calculés pour chaque pas de temps et chaque tronçon. Le coefficient de convection au niveau de la surface du sol sera calculé suivant la première méthode et avec une longueur d de 55 m . Enfin, le maillage sera choisi de manière semi-automatique et défini par le logiciel comme étant "Normal". Le résultat de ce modèle donne une erreur absolue de $0,7\text{ °C}$ et une erreur maximum de $2,95\text{ °C}$. Les simulations réalisées avec une température de nappe phréatique plus proche de la réalité donnent des résultats plus proches des relevés que le modèle retenu, mais la température du sol à une profondeur de 2 m est une donnée rarement disponible. Il conviendra donc de se questionner sur l'intérêt de réaliser un modèle numérique prédictif nécessitant des données d'entrées difficilement accessibles.

Références

- [1] S. Déoux, *Mission d'évaluation sanitaire du puits canadien - Siège social du Groupe Millet*, Medieco (2011)
- [2] M. Barbat, *Nettoyabilité des puits climatiques*, Costic (2012)
- [3] G. Chardome, V. Feldheim, *Analyses expérimentale et numérique des performances énergétiques d'un puits canadien*. Congrès Français de Thermique (Toulouse - Mai 2016)
- [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] 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)
- [6] A.F. Mills, *Heat Transfer*, McGraw-Hill Inc. ,US (1992)
- [7] *Solar Energy*, Elsevier Science Ltd (1997)
- [8] Stephane Thiers, *Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraichissement de bâtiments*, Technical report, Journée thématique SFT - IBPSA (2007)
- [9] B. Givoni, M. Mostrel, *Windscreens in radiant cooling*, Passive Solar J. , (1982)