

Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar

B. Mebarki¹, B. Draoui¹, S. Abdessemed²
A. Keboucha¹, S. Drici¹ et A. Sahli¹

¹ Laboratoire d'Energétique en Zones Arides, 'ENERGARID'

Faculté des Sciences et Technologie, Département de Technologie,
Université de Béchar, B.P. 417, Route de Kenadza, Béchar, Algérie

² Laboratoire d'Etudes des Systèmes Energétiques Industriels, 'L.E.S.E.I.'

Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département de Mécanique,
Université Hadj Lakhdar, Avenue Chahid Med El Hadi Boukhlof, Batna, Algérie

(reçu le 28 Août 2011 - accepté le 30 Octobre 2012)

Résumé – Dans le contexte énergétique actuel, les systèmes géothermiques sont fortement développés dans le secteur du bâtiment. Parmi ces systèmes intéressants sur le plan énergétique, on trouve notamment les échangeurs air-sol appelé communément 'puits canadien', technologie adaptée d'un système déjà employé par nos ancêtres. Dans le présent travail, une étude des performances d'un échangeur air-sol a été entreprise par voie de modélisation analytique. Nous avons premièrement validé le modèle de la température de sol et la température de l'air dans l'échangeur, puis nous avons analysé l'influence de quelques paramètres, à savoir: la profondeur, le diamètre et la longueur du tube sur la température intérieure de l'échangeur.

Abstract – In the context of current energy, geothermal systems are highly developed in the construction sector. Among these interesting systems on energy there are, in particular air-ground heat exchangers commonly called 'Canadian well' which is an appropriate technology system already used by our ancestors. In this work, a study of the performance of an air-ground was undertaken with a view to perform an analytical modeling. We first validated the model of soil temperature and air temperature in the heat exchanger, and then we analyzed the influence of several parameters, namely depth, diameter and length of the tube on the temperature interior of the exchanger.

Mots clés: Echangeur air-sol - Puits canadien - Géothermie – Climatisation.

1. INTRODUCTION

Les études démographiques indiquent que la population des pays en développement va croître très vite et leurs besoins d'énergie seront très importants, A l'horizon 2050, la terre sera peuplée de 8 à 10 milliards de personnes. Selon les statistiques de l'année 2006, un américain consomme 8 fois plus d'énergie qu'un européen et 16 fois plus qu'un africain.

Aujourd'hui, l'épuisement annoncé des ressources d'énergie d'origine fossile qui représentent actuellement 90 % de la consommation mondiale d'énergie qui affecte l'environnement (pollution+effet de serre).

Le secteur du bâtiment très énergivore représente une part très importante des consommations d'énergie (30 %) et des émissions de gaz à effet de serre. La réduction des consommations d'énergie est urgente, non seulement pour des raisons écologiques, mais aussi pour des raisons économiques. Nous devons alors construire des maintenant

un avenir énergétique différent dans le secteur du bâtiment pour se faire les spécialistes nous disent qu'il faut aujourd'hui réduire radicalement la facture énergétique en insistant sur les deux principes suivants:

- Construire en respectant l'architecture bioclimatique;
- L'implication des énergies renouvelable.

Dans ce contexte, nous avons entrepris une étude de modélisation analytique d'un échangeur air-sol (puits canadien) qui utilise comme source de chaleur l'inertie du sol (géothermie à très basse température). Ce dernier est destiné pour le chauffage et le rafraîchissement dans les zones arides, cas de la ville de Béchar.

La recherche sur les échangeurs air-sol semble avoir démarré après le pic pétrolier de 1979 et s'être arrêtée temporairement après le contre-choc de 1985 (Tzaferis *et al.*, 1992 [1]). Ce n'est que depuis 1995 que quelques chercheurs ont repris des études sur les questions des performances des échangeurs air-sol, de leur comportement thermique et de leur intégration au bâtiment comme un système de pré-conditionnement de l'air [2].

Au moins une quinzaine d'études abordent la technologie des échangeurs air-sol,

Soit en tant que sujet principal (Mihalakakou *et al.*, 1994 [3]; Benkert *et al.*, 1997 [4]; Bojić *et al.*, 1997 [5]; Benkert *et al.*, 2000 [6]; Kunetz *et al.*, 2001 [7]; Hollmuller 2002 [8]; De Paepe *et al.*, 2003[9]; Dibowski, 2003 [10]; Zweifel, 2004 [11]; Al Ajmi *et al.*, 2005 [12]; Dibowski, 2005a, 2005b [13, 14]; Ghosal *et al.*, 2006 [15]; Badescu, 2007 [16]);

Soit en tant que qu'élément d'une étude plus vaste sur le rafraîchissement de bâtiments (Serres *et al.*, 1996 [17]; Bojić, 2000 [18]; Badescu *et al.*, 2003 [19]).

Les structures à rafraîchir sont soit des bâtiments, soit des serres (Gauthier *et al.*, 1997 [20]; Hollmuller *et al.*, 2001 [21]; Ghosal *et al.*, 2006 [22]) [2].

2. PRESENTATION DU SYSTEME ETUDIE

Il s'agit d'un échangeur air-sol monotube qui va être utilisé dans la ville de Béchar (Fig. 1).

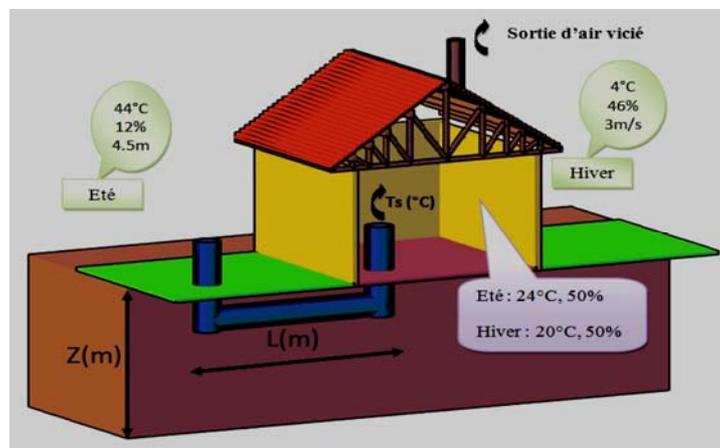


Fig. 1: Géométrie de l'échangeur Air-Sol étudié

3. MODELISATION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR

a- Hypothèses géométriques

Le puits canadien, qui va être modélisé ici, possède les caractéristiques suivantes:

- Une entrée d'air verticale située entre la surface du sol ($z = 0$) et le niveau d'enfouissement du puits ($z = +Z$);
- Une canalisation disposée horizontalement sous la terre à la profondeur $z = +Z$;
- Une sortie d'air verticale située entre le niveau d'enfouissement du puits ($z = +Z$) et la surface du sol ($z = 0$).

b- Hypothèses thermiques

Le modèle géométrique présenté ci-dessus peut être encore simplifié comme suit:

- Le débit d'air à l'intérieur est identique;
- Les dimensions et propriétés physiques sont identiques;
- Le sol environnant présente des propriétés thermiques homogènes et identiques.

3.1 Description Mathématique

Le modèle consiste à trouver à partir des équations de bilan énergétique, en considérant la température du sol constante, l'expression analytique qui traduit l'évolution de la température de l'air, le long de l'échangeur en fonction des paramètres suivants:

- La température extérieure (ambiante);
- La température du sol à la profondeur considérée;
- Les caractéristiques thermo physiques du sol;
- La géométrie et la nature du conduit;
- Le débit d'air.

3.1.1 Modélisation de la température du sol

Le modèle de la température du sol peut se modéliser par l'équation 'équation (1)' de chaleur dans le cas de la conduction dans un milieu semi-infini en régime variable unidirectionnel et sans source interne. Dans ces conditions, l'équation de conduction avec les conditions aux limites est donnée par:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\alpha_{\text{sol}}} \times \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \\ T(0, t) = T_m + T_0 \times \cos \omega t \\ T(\infty, t) = T_m \end{array} \right. \quad (1)$$

La résolution de cette équation est faite par la méthode des changements de variables, d'où la température du sol est calculée selon l'équation suivante:

$$T(z, t) = T_m - T_0 \times \cos \left[\omega \times (24 \times t - t_0) - \frac{z}{d} \right] \times e^{-z/d} \quad (2)$$

$$\text{où, } \omega = 2\pi/p, \quad d = \sqrt{2a/\omega}, \quad a_{\text{sol}} = \lambda / \rho \times c \times p \quad (3)$$

3.1.2 Température de l'air le long de l'échangeur

Le puits canadien est représenté par un tube rectiligne d'une longueur L égale à la longueur totale du puits canadien. On suppose que la température du sol n'est plus perturbée par le débit d'air et qu'elle varie seulement selon l'équation. Prenons un élément de tube, entre x et $x + dz$, 'Fig. 2'.

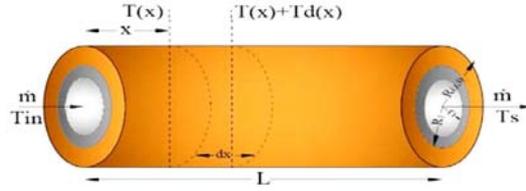


Fig. 2: Tube enterré

Le bilan thermique pour ce tube est:

$$\dot{m} \times C_{\text{air}} \times (T(x) + dT(x) - T(x)) = \frac{dx}{R_{\text{conv}} + R_{\text{tube}} + R_{\text{sol}}} \times (T(z, t) - T(x)) \quad (4)$$

La figure suivante montre les différentes résistances thermiques

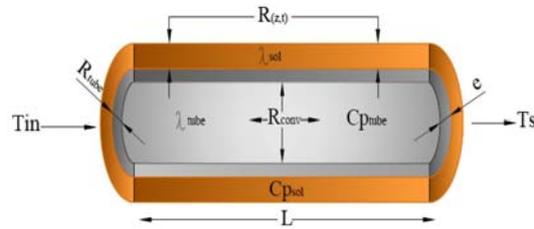


Fig. 3: Résistances thermiques dans le tube enterré

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{h_{\text{conv}} \times 2 \times \pi \times r_1} \quad (5)$$

$$R_{\text{tube}} = \frac{1}{2 \times \pi \times \lambda_{\text{tube}}} \times \ln \times [R_1 / r_1] \quad (6)$$

$$R_{\text{sol}} = \frac{1}{2 \times \pi \times \lambda_{\text{sol}}} \times \ln \times [R(z, t) / R_1] \quad (7)$$

$$U = \frac{1}{R_{\text{conv}} + R_{\text{tube}} + R_{\text{sol}}} \quad (8)$$

3.1.3 Evaluation du coefficient d'échange convectif

Le coefficient d'échange convectif est défini par :

$$h_{\text{conv}} = \frac{\text{Nu} \times \lambda_{\text{sol}}}{D} \quad (9)$$

Le nombre de Nusselt est calculé à l'aide de la relation de Colburn:

$$Nu = 0.214 \times (Re^{0.8} - 100) \times Pr^{0.4} \quad (10)$$

où, $Re = \frac{V_{air} \times D}{\nu_{air}}$ (11)

$$Pr = \frac{\nu_{air} \times \rho_{air} \times C_{p_{air}}}{\lambda_{air}} \quad (12)$$

L'équation (4) devient alors:

$$\frac{dT(x)}{T(z, t) + T(x)} = \frac{U}{\dot{m} \times C_{p_{air}}} \times dx \quad (13)$$

L'intégrale de l'équation (13) nous donne:

$$-\ln(T(z, t) - T(x)) = \frac{U}{\dot{m} \times C_{p_{air}}} \times x + c^{te} \quad (14)$$

$$T(0) = T_{in} \Rightarrow c^{te} = -\ln(T(z, t) - T_{in}) \quad (15)$$

En remplaçant la cte dans (15) par sa valeur dans (14), on obtient:

$$\ln\left(\frac{T(x) - T(z, t)}{T_{in} - T(z, t)}\right) = \frac{-U}{\dot{m} \times C_{p_{air}}} \times x \quad (16)$$

Par suite:

$$T(x) = T(z, t) + (T_{in} - T(z, t)) \times e^{\frac{-U}{\dot{m} \times C_{p_{air}}} \times x} \quad (17)$$

Pour $x = L$

$$T(x) = T(z, t) + (T_{in} - T(z, t)) \times e^{\frac{-U \times L}{\dot{m} \times C_{p_{air}}}} \quad (18)$$

L'efficacité du tube enterré sera alors déterminée à l'aide de l'équation (19):

$$\varepsilon = \frac{T_s - T_{in}}{T(z, t) - T_{in}} = 1 - e^{\frac{-U \times L}{\dot{m} \times C_{p_{air}}}} \quad (19)$$

Les équations (18) et (19) donnent 'l'équation (20)':

$$\varepsilon = 1 - e^{\frac{-U \times L}{\dot{m} \times C_{p_{air}}}} \quad (20)$$

Ainsi,

$$T_s = T_{in} + (T(z, t) - T_{in}) \times \varepsilon = T_{in} + (T(z, t) - T_{in}) \times \left(1 - e^{\frac{-U \times L}{m \times C_{pair}}} \right) \quad (21)$$

C'est l'équation qui décrit la température de l'air le long de l'échangeur.

3.2 Validation

3.2.1 Température du sol

Avant de présenter les résultats du modèle analytique développé de la température de sortie de l'échangeur, nous avons jugé nécessaire de valider premièrement le modèle de la température du sol.

Les figures 4 et 5 montrent un exemple de validation de cette dernière. Les valeurs qui ont servi à cette comparaison sont les valeurs expérimentales et analytiques de Al Ajmi *et al.*, 2006 [17]. La comparaison montre une très bonne concordance avec une erreur de 1 %, c'est-à-dire un écart de 1°.

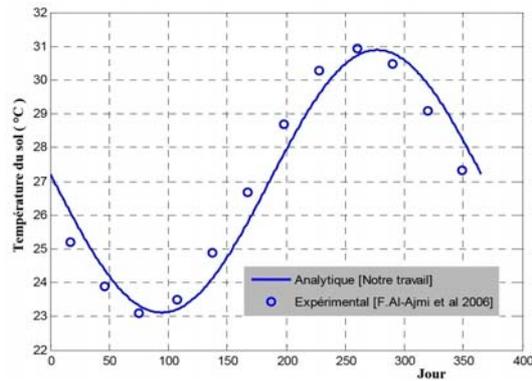


Fig. 4: Variation de la température du sol durant toute l'année

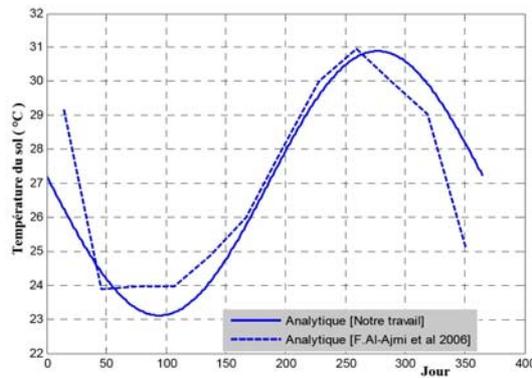


Fig. 5: Variation de la température du sol durant toute l'année

a- Effet de la diffusivité thermique

Pour mieux choisir le type de sol, la figure 6 illustre la variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes diffusivités thermiques. On constate une variation sinusoïdale pour toutes les diffusivités testées, on remarque aussi qu'au fur et à mesure que la diffusivité augmente, la température du sol augmente.

Néanmoins et pour ne pas reprendre l'influence du type de sol sur la température de sortie de l'échangeur, nous avons choisi le sable pour notre cas d'étude, puisqu'il assure les performances thermiques qui permettent d'atteindre la température du sol.

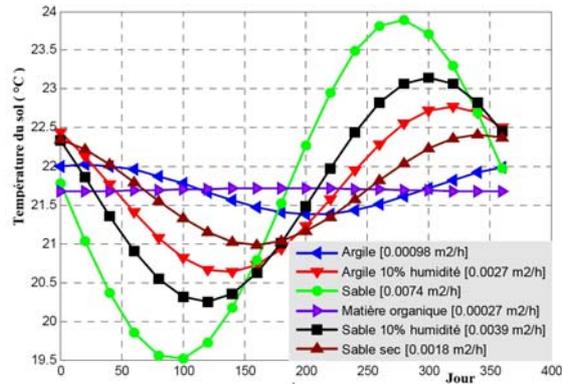


Fig. 6: Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes diffusivité thermique

b- Effet de la profondeur

La figure 7 montre la variation de la température du sol en fonction des jours de l'année pour différentes profondeurs. Il est clair que la température du sol suit une variation sinusoïdale. On constate qu'en pénétrant au sol la température diminue.

Ce qui est en parfait accord avec la logique car les atténuations sont beaucoup plus grandes au fur et à mesure que la profondeur augmente (Les variations de température sont d'autant plus faibles que la profondeur du système est importante). Dans ces conditions, la profondeur qui servira à notre étude est 5 m.

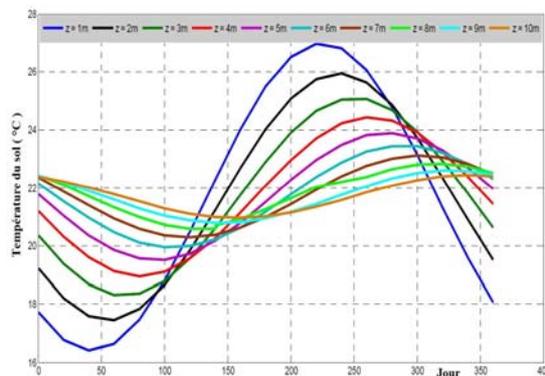


Fig. 7: Variation de la température du sol durant toute l'année pour différentes profondeurs

3.2.2 Température de l'air le long de l'échangeur

Pour tester la fiabilité du modèle, nous avons validé nos résultats concernant la température de l'air dans l'échangeur pour les deux cas de fonctionnement; période hivernale (chauffage) et période estivale (refroidissement).

Cependant, on s'intéresse qu'au rafraîchissement. En été, on a validé le modèle analytique du puits avec les travaux expérimentaux de (Moummi *et al.*, 2010 [19]).

Les figures 8 et 9 montrent deux exemples de comparaison pour les débits suivant $q = 130 \text{ m}^3/\text{h}$ et $q = 155.43 \text{ m}^3/\text{h}$ respectivement une bonne survie de courbe a été observée avec une erreur moyenne de l'ordre de 10 % ($L > 25$), c'est-à-dire un écart de 1°C , et une erreur de 4 % (pour $L < 25$).

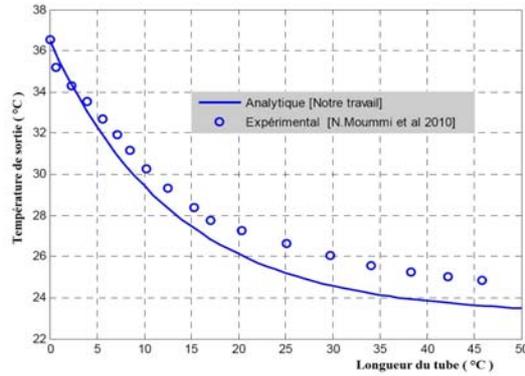


Fig. 8: Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour $q = 130 \text{ m}^3/\text{h}$

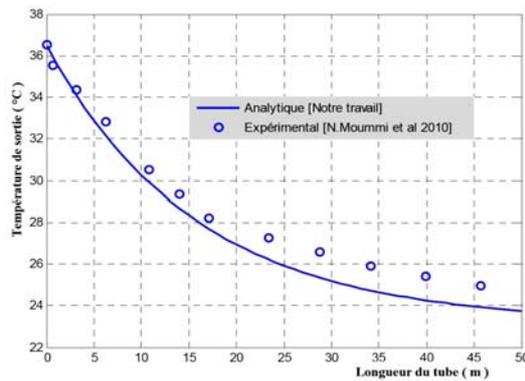


Fig. 9: Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour $q = 155.43 \text{ m}^3/\text{h}$

3.2.3 Fonctionnement en période estivale (cas d'étude)

a- Effet de la profondeur

La figure 10 représente la variation de la température de sortie en fonction de longueur du tube pour différentes profondeurs de l'entrée de l'échangeur jusqu'à la sortie.

On remarque que pour toutes les profondeurs étudiées, la température de l'air décroît à l'entrée correspondant à la température de base extérieure de la ville de Béchar (44°C) jusqu'à ce que cette dernière atteigne la valeur de la température du sol (21.7 °C). Il est aussi à noter que la température de sortie du puits à une valeur constante au delà d'une longueur $L=25$ m.

Cependant on constate qu'à partir d'une profondeur $Z = 1$ m, nous n'avons pas une influence de la profondeur ($Z = 2, 3, 4$ et 5 m) sont confondues.

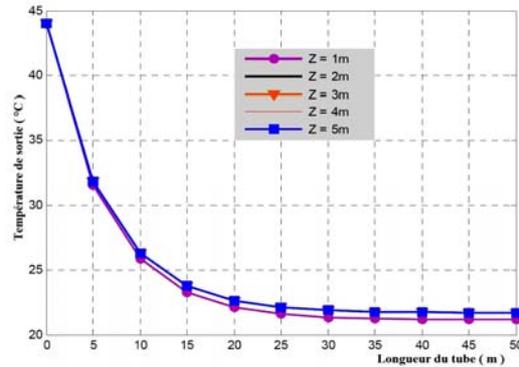


Fig. 10: Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour différentes profondeurs

b- Effet du diamètre

Pour juger l'influence de diamètre sur la température de sortie, nous présentons dans la figure 11, l'évolution de la température pour différents diamètres. On constate la même allure qu'auparavant, c'est-à-dire une décroissance exponentielle de la température de l'air pour tous les différents diamètres étudiés.

On remarque aussi, que la température de l'air croit au fur et mesure en augmentant le diamètre, elle atteint une valeur de 32 °C pour un diamètre de 400 mm. La valeur minimale (température du sol) est atteinte pour un diamètre de 75 mm et elle correspond à un débit de l'ordre de $q = 5.51 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{h}$.

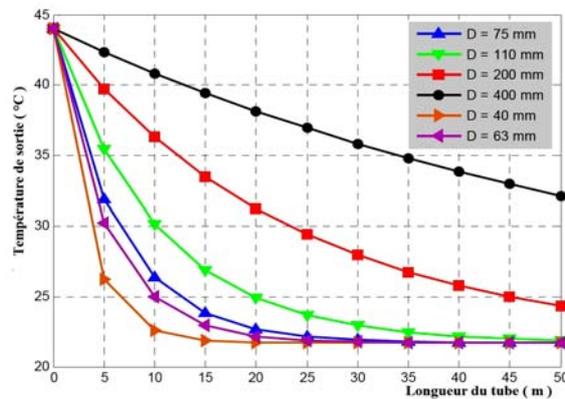


Fig. 11: Variation de la température de sortie en fonction de la longueur du tube pour différents diamètres ($Z = 5$ m)

Cette situation est expliquée par le fait que pour des grandes valeurs du diamètre le débit devient maximale sachant que la vitesse de l'air extérieure est toujours fixe et ayant la valeur de la température de base (été) 4.5 m/s, et donc l'air n'a pas suffisamment assez de temps pour absorber la chaleur stockée au niveau du sol.

Pour des raisons économiques, nous avons simulé des diamètres inférieurs à 75 mm et donc on a constaté qu'avec ces derniers, on peut toujours atteindre la valeur de la température du sol, tout en gagnant la longueur du tube comme c'est le cas du diamètre 40 mm à 10 m, la température du sol est atteinte.

c- Effet de la longueur

La figure 12 illustre l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur en fonction de la profondeur pour différentes longueurs. On constate une décroissance de température pour toutes les configurations simulées. La valeur de la température du sol est atteinte à des moments où la longueur aura une valeur plus de 40 m.

Ainsi qu'au-delà d'une profondeur de 2 m, aucune variation de la température n'a été constatée. On peut conclure, que la température varie proportionnellement avec la longueur, ce qui signifie que pour une longueur prolongée, l'air dans l'échangeur a largement du temps et de surface d'échange qui lui permettent d'échanger beaucoup plus de la chaleur emmagasinée dans le sol.

On peut conclure que la longueur du puits doit être comprise entre 25 et 40 mètres. En dessous de 25 mètres, le puits canadien ne permet pas d'obtenir une température de sortie proche de celle du sol, car le rendement de l'échange est moyen. En revanche, au delà de 40 mètres, le rendement n'augmente plus de manière significative.

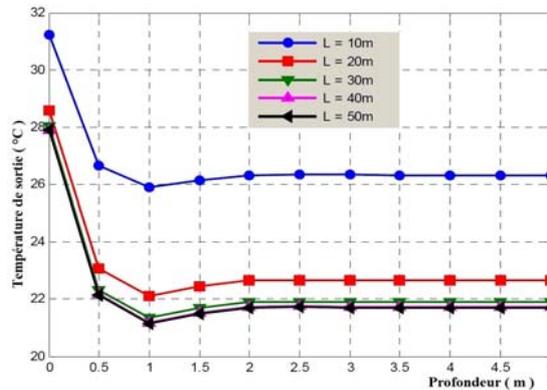


Fig. 12: Variation de la température de sortie en fonction de la profondeur pour différentes longueurs de tube

d- Efficacité de l'échangeur

La figure 13 représente l'évolution de l'efficacité de l'échangeur en fonction de sa longueur.

On constate que l'efficacité augmente d'une manière logarithmique avec la longueur.

A partir de 30 m, elle devient maximale et demeure constante. Le phénomène est le même, été comme en hiver. Ces résultats traduisent le bon fonctionnement du puits.

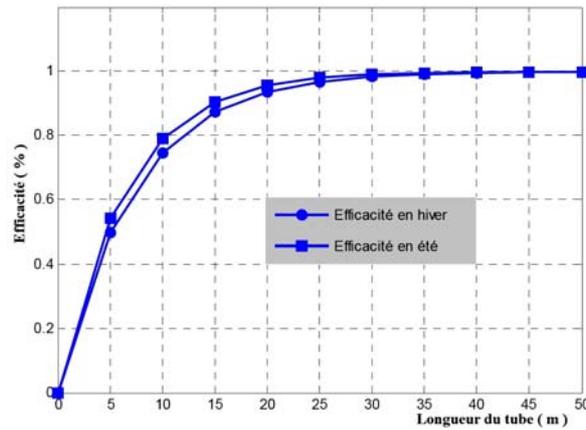


Fig. 13: Variation de l'efficacité en fonction de la longueur du tube durant toute l'année

5. CONCLUSION

L'intérêt de l'échangeur thermique air-sol est majeur, puisqu'il améliore tout au long de l'année, les conditions thermiques recherchées. Qu'il soit utilisé en mode réchauffement en hiver ou refroidissement en été, il intervient de manière efficace sur l'amortissement des amplitudes thermiques.

Ce système favorise un confort d'ambiance pour les individus en limitant les contraintes thermiques. La rentabilité de l'échangeur peut être atteinte, s'il permet d'avoir une ambiance plus homogène en termes de température permet effectivement de gagner en croissance et en indice de consommation.

Les résultats obtenus permettent de bien comprendre le fonctionnement de l'échangeur air-sol au cours des saisons et donc on peut tirer les conclusions suivantes:

- Un sol sablonneux sera plus inerte que les autres types de sol simulés et donc beaucoup plus performant en terme d'échange thermique, car il nous permet d'atteindre la température de sol.

On peut éventuellement prévoir des drains de manière à pouvoir humidifier le sol, la capacité d'accumulation de chaleur et la conductivité thermique étant plus élevées dans les sols humides. Cette hypothèse a été validée par Van Caenegem *et al.*, 2006 [20].

- Les tubes doivent être choisis avec un diamètre de 75 mm et moins. En effet, lorsque le diamètre d'un tuyau est doublé, la surface d'échange double également, tandis que le débit d'air quadruple pour une même vitesse d'air. Ce qui se répercute par une perte de rendement des échanges.
- Les tubes doivent être rigides, longs de 25 m et positionnés à une seule profondeur (3 m) car cette profondeur permettra d'avoir une température de consigne acceptable (20°C) qui est la température de confort pour la période hivernale.
- La vitesse de l'air dans la ville de Béchar, soit pour l'hiver, soit pour l'été favorise une durée suffisante d'échange avec le sol.

NOMENCLATURE

<p>$C_{p_{sol}}$: Capacité calorifique du sol, J/kg.K</p> <p>d : Profondeur de pénétration, m</p> <p>Nu : Nombre de Nusselt</p> <p>Pr : Nombre de Prandtl</p> <p>r_1 : Rayon intérieur du tube enterré, m</p> <p>R_{conv} : Résistance thermique correspondant à l'échange convectif entre l'air et le tube, m.K/W</p> <p>R_{tube} : Résistance thermique du tube enterré, m.K/W</p> <p>$T(z, t)$: Température de sol, °C</p> <p>T_m : Température moyenne annuelle, °C, donnée par la station météorologique de Béchar</p> <p>$R(z, t)$: Rayon de la couche adiabatique</p> <p>U : Résistance thermique totale entre l'air et le sol, W/m.K</p> <p>z : Profondeur, m</p> <p>α_{sol} : Diffusivité thermique du sol, m²/jour</p> <p>λ_{tube} : Conductivité thermique du tube enterré, W/m.K</p> <p>λ_{air} : Conductivité thermique de l'air, W/m.K</p> <p>ρ_{air} : Masse volumique de l'air, kg/m³</p> <p>t_0 : Le jour de l'année [1,...,365] correspondant à la température de surface maximale, dans notre cas, on a pris le 17 juillet ($t_0 = 198$ jour)</p>	<p>\dot{m} : Débit d'air, kg/s</p> <p>$C_{p_{air}}$: Chaleur massique de l'air, J/kg.K</p> <p>D : Diamètre du tube, m</p> <p>Re : Nombre de Reynolds</p> <p>R_1 : Rayon extérieur du tube enterré, m</p> <p>T_0 : Amplitude de la température de surface (Température maximale de l'air – Température minimale de l'air).</p> <p>R_{sol} : Résistance thermique entre le tube et la surface adiabatique cylindrique, m.K/W</p> <p>V_{air} : Vitesse de l'air, m/s</p> <p>T_0 : Amplitude de la température de surface (Température maximale de l'air – Température minimale de l'air)</p> <p>t : Jour de l'année [1;..., 365]</p> <p>ω : Fréquence de température annuelle, rad/jour</p> <p>ρ_{sol} : Masse volumique du sol, kg/m³</p> <p>λ_{sol} : Conductivité thermique du sol, W/m.K</p> <p>λ_{sol} : Conductivité thermique du sol, W/m.K</p> <p>ν_{air} : Viscosité cinématique de l'air, m²/s</p>
---	---

REFERENCES

- [1] A. Tzaferis, D. Liparakis, M. Santamouris and A. Argiriou, 'Analysis of the Accuracy and Sensitivity of Eight Models to Predict the Performance of Earth-To-Air Heat Exchangers', Energy and buildings, Vol. 8, N°1, pp. 35 - 43, 1992.
- [2] S. Thiers, 'Bilans Energétiques et Environnementaux de Bâtiments à Energie Positive', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Novembre 2008.
- [3] G. Mihalakakou, M. Santamouris and D. Asimakopoulos, 'Modelling the Thermal Performance of Earth-To-Air Heat Exchangers', Solar Energy, Vol 53, N°3, pp. 301 – 305, 1995.

- [4] S. Benkert, F.D. Heidt and D. Schöler, 'Calculation Tool for Earth Heat Exchangers GAEA', Proceedings 'Building Simulation'97, Fifth International IBPSA Conference, Prague, September 8th – 10th, Vol. II, pp. 9-16, 1997.
- [5] M. Bojić, N. Trifunović, G. Papadakis and S. Kyritsis, 'Numerical Simulation, Technical and Economic Evaluation of Air-To-Earth Heat Exchanger Coupled to a Building', Energy, Vol. 22, N°12, pp. 1151 - 1158, 1997.
- [6] S. Benkert and F.D. Heidt, 'Abschlussbericht zum Projekt: Validierung des Programms 'Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern GAEA' mit Hilfe von Messdaten im Rahmen des Verbundprojekts 'Luft-/Erdwärme Tauscher' der AG Solar NRW, FG Bauphysik & Solarenergie, Universität Siegen, 89 p., 2000.
- [7] J. Kunetz et L. Lefebvre, 'Les Puits Provençaux. Etude et Méthode de Dimensionnement', Rapport de projet tutoré de 5^{ème} année. INSA de Toulouse, 54 p., Janvier 2004.
- [8] P. Hollmuller, 'Utilisation des Echangeurs Air-Sol pour le Chauffage et le Rafrâichissement des Bâtiments', Thèse de doctorat. Faculté des sciences de l'Université de Genève. 125 p., 2002.
- [9] M. De Paepe and A. Janssens, 'Thermo-Hydraulic Design of Earth-Air Heat Exchangers', Energy and Buildings, Vol. 35, N°4, pp. 389 – 397, 2003.
- [10] H.G. Dibowski, 'Auf Basis Umfangreicher Messdatensätze Experimentell und Numerisch Validierte Regeln zur Optimierten Auslegung Von Luft-Erdwärmetauschern', Thèse de Doctorat, Universität Kassel, Kassel, 225 p., 2003.
- [11] G. Zweifel, 'A Simplified Model of a Ground to Air Heat Exchanger', Hochschule für Technik+Architektur Luzern (HTA Luzern). Horw. 6 p., 2004.
- [12] F. Al-Ajmi, D.L. Loveday and V.I. Hanby, 'The Cooling Potential of Earth–Air Heat Exchangers for Domestic Buildings in a Desert Climate', Building and Environment, Vol. 41, N°3, pp. 235 – 244, 2006.
- [13] H.G. Dibowski, 'Luft-Erdwärmetauscher L-EWT Planungsleitfaden Teil 2: Testanlagen im Verbundprojekt', Report AG Solar, Köln, 102 p., 2005.
- [14] H.G. Dibowski, 'Luft-Erdwärmetauscher L-EWT Planungsleitfaden Teil 2: Technische Planung', Report AG Solar, Köln, 62 p., 2005.
- [15] M.D. Ghosal and G.N. Tiwari, 'Modeling and Parametric Studies for Thermal Performance of an Earth to Air Heat Exchanger Integrated with a Greenhouse', Energy Conversion and Management, Vol. 47, N°13-14, pp. 1779 - 1798, 2006.
- [16] V. Badescu, 'Simple and Accurate Model for the Ground Heat Exchanger of a Passive House', Renewable energy. Vol. 32, N°5, pp. 845 - 855, (2007).
- [17] L. Serres, A. Trombe and J.H. Conilh, 'Study of Coupled Energy Saving Systems Sensitivity Factor Analysis', Building and Environment, Vol. 32, N°2, pp. 137 - 148, 1997.
- [18] M. Bojic, 'Optimization of Heating and Cooling of a Building by Employing Refuse and Renewable Energy', Renewable Energy, Vol. 20, N°4, pp. 453 - 465, 2000.
- [19] V. Badescu and B. Sicre, 'Renewable Energy for Passive House Heating: II. Model', Energy and Buildings, Vol. 35, N°11, pp. 1085 - 1096, 2003.
- [20] C. Gauthier, M. Lacroix and H. Bernier, 'Numerical Simulation of Soil Heat Exchanger storage Systems for Greenhouses', Solar Energy, Vol. 60, N°6, pp. 333 - 346, 1997.
- [21] P. Hollmuller and B. Lachal, 'Cooling and Preheating with Buried Pipe Systems: Monitoring, Simulation and Economic Aspects', Energy and Buildings. Vol. 33, N°5, pp. 509 – 518, 2001.

- [22] Y. Kartachi, '*Evaluation Numérique des Systèmes de Chauffage et de Rafraîchissement à l'Aide de l'Outil de Simulation Dynamique SIMBAD*', Projet de Fin d'Etude, Master Pro., Université de la Rochelle, Août 2006.
- [23] N. Moummi, H. Benfatah, N. Hatraf, A. Moummi et S. Youcef Ali, '*Le Rafraîchissement par la Géothermie: Etude Théorique et Expérimentale dans le Site de Biskra*', Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3 pp. 399 – 406, 2010.
- [24] I. Van Caenegem et D. Deglin, Tānikon, '*Echangeur de Chaleur Souterrain pour Porcheries*', Rapport FAT N°504, 1997.