



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DU RAFRAICHISSEMENT DE L'AIR PAR UN ECHANGEUR GEOtherMIQUE AIR/SOL

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF AIR REFRESH BY A GEOtherMAL HEAT EXCHANGER AIR / GROUND

*BELLOUFI Y. *, BRIMA A., ATMANI R., MOUMMI N., AISSAOUI F.*

Laboratoire de Génie Mécanique (LGM)
Université de Biskra, BP 145, RP, 07000, Biskra, Algérie.

**yousef_belloufi@yahoo.fr*

RESUME

L'étude que nous présentons dans cet article concerne l'approche numérique et expérimentale du phénomène thermique d'un échangeur de chaleur enterré dans le sol, destiné au rafraîchissement de l'air d'un local. Le problème revient à résoudre l'équation de la chaleur en régime stationnaire dans le sol, ensuite dans l'échangeur air/sol. Le sol est considéré comme un milieu semi-infini homogène et invariant. Une résolution analytique simplifiée est proposée en appliquant le principe de conservation de l'énergie. Les résultats de ce modèle sont validés par les résultats expérimentaux qui sont réalisés sur le site de l'université de Biskra.

Mots clés : Echangeur air/sol, Rafraîchissement, Géothermie, confort thermique.

ABSTRACT

This paper presents an experimental and numerical approach to study the thermal phenomena in an air/soil heat exchanger, used for buildings air refreshment. The problem consists to solve the heat equation in the steady state in both soil and the heat exchanger. The soil is considered as homogeneous and

invariant semi-infinite medium. The simplified analytical resolution is proposed by applying the principle of energy conservation for all parts of the heat exchanger. From the results, it is seen that an air/soil heat exchanger might prove an alternative source for air refreshment of buildings when tools of air conditioning are not available. The results of this model show a good agreement with the experimental results which are realized on the site of Biskra University.

Keywords: Air/Soil Heat Exchanger, Refreshment, Geothermal energy, Thermal comfort.

INTRODUCTION

En Algérie comme ailleurs dans le monde, la demande d'énergie électrique nécessaire à la climatisation est en forte augmentation, notamment pendant la période d'été. Pour baisser cette consommation, on peut mettre en œuvre des mesures architecturales et constructives adéquates (réduction des gains solaire), comme on peut exploiter les techniques de rafraîchissement.

Nous nous intéresserons ici à la technique de rafraîchissement utilisant l'échangeur air/sol (appelé puits canadien ou encore puits provençal). Il s'agit d'un système de ventilation conçu pour préchauffer ou rafraîchir l'air des locaux en utilisant l'inertie thermique du sol. L'air aspiré de l'extérieur transite par une conduite enterrée à une profondeur bien déterminée sur une distance L , récupérant au cours de son trajet l'énergie de la terre (va se réchauffer ou se refroidir), et permettra ainsi un préchauffage ou un refroidissement du local suivant qu'on est en hiver ou en été.

Pour développer les échangeurs air/sol, il existe de nombreuses études théoriques et expérimentales de différents auteurs réalisées à travers les différents laboratoires du monde : (Trombe et al., 1991) ont réalisé leur expérimentation dans le sud de la France sur une maison individuelle, ils ont remarqué que l'air extérieur peut se conditionner même avec les températures très élevées. La recherche expérimentale de (Thanu et al., 1985) sur un échangeur air/sol pour le confort thermique d'un bâtiment, indique que le système fonctionne et possède une grande efficacité pendant la période estivale.

Certains auteurs (Sodha et al., 1985), (Moummi et al., 2010), (Trombe et al., 1994), (Krarti et Kreider, 1996) et (Hollmuller, 2003). Ont développé une étude théorique à l'aide de différents modèles analytiques des échangeurs horizontaux à la surface du sol. Ils ont conclu qu'afin d'augmenter les performances de rafraîchissement de l'air, il faut tenir compte de certains paramètres à savoir :

(1) La longueur et le diamètre du tube. (2) La profondeur d'enfouissement de l'échangeur en sous-sol. (3) les propriétés thermiques du sol à savoir (sa conductivité thermique λ et sa chaleur spécifique C_p)

En outre, des modèles numériques traitent les échangeurs air/sol dans les travaux de (Brum et al., 2013), ont développé une nouvelle approche numérique (nommé modèle réduit) pour obtenir la dynamique des fluides et le comportement thermique de l'échangeur air/sol, leurs résultats sont validés avec les archives littéraires. (Vaz et al., 2011), ont présenté une étude expérimentale pour un cycle annuel réalisé au sud du Brésil. Une solution numérique des équations de conservation est effectuée avec un code de calcul 'FLUENT' basé sur la méthode des volumes finis. (Thiers et al., 2008), considèrent que seul une partie du sol est influencée par l'échangeur, et prennent en compte l'interaction de plusieurs tubes en comparant la distance entre eux et la profondeur de pénétration définie par (P. Hollmuller, 2003).

Nomenclature					
T_{sol}	Température du sol	$^{\circ}C$	φ	Flux de chaleur	$watt$
T_a	Température de l'air à l'intérieur de l'échangeur	$^{\circ}C$	u	Vitesse axiale de l'air à l'intérieur de l'échangeur	$\frac{m}{s}$
T_{ai}	Température de l'air à la sortie de l'échangeur	$^{\circ}C$	r_1	Rayon intérieur de tube enterré	m
T_{a1}	Température de l'air à la sortie de l'échangeur vertical 1	$^{\circ}C$	r_2	Rayon extérieur de tube enterré	m
T_{a2}	Température de l'air à la sortie de l'échangeur horizontal 2	$^{\circ}C$	r_3	Rayon de la couche adiabatique du sol	m
T_i	Température initiale à l'intérieur du sol	$^{\circ}C$	l	Cordonnée longitudinale suivant la direction du tube	m
λ_{soil}	Conductivité thermique du sol	$\frac{W}{m \cdot ^{\circ}C}$	x	Cordonnée horizontale	m
h	Coefficient d'échange moyen de l'air par convection	$\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$	α	Diffusivité thermique ($\lambda/\rho \cdot C_p$)	$\frac{m^2}{s}$
t	Temps	s	z	Cordonnée verticale	m
δ	Profondeur de pénétration de la chaleur dans le sol	m	ρ	Masse volumique	$\frac{kg}{m^3}$
m	Masse d'air	kg	s	Surface d'échange	m^2
c_p	Chaleur spécifique	$\frac{j}{kg \cdot ^{\circ}C}$	R	Résistance thermique	$\frac{m \cdot K}{W}$

Notre contribution dans ce travail est de présenter une étude théorique assez complète, sur les échangeurs verticaux (entrée et sortie) qui sont assemblés à l'échangeur horizontal. Des mesures expérimentales ont été réalisées sur site pour la validation du modèle analytique.

FORMULATION MATHÉMATIQUE

Nous admettons ici les hypothèses suivantes :

- Le sol garde une température constante pendant les échanges thermiques, c'est à dire que l'inertie thermique du sol est grande devant les quantités de chaleur échangées de l'air. A partir d'une certaine profondeur δ les températures restent constantes dans le sol.
- Le coefficient d'échange convectif est constant le long de l'échangeur air/sol.
- L'échange thermique se fait en régime stationnaire et la conduction longitudinale est négligeable.

Divisons l'échangeur en trois tronçons, l'un horizontal et deux verticaux (fig.1).

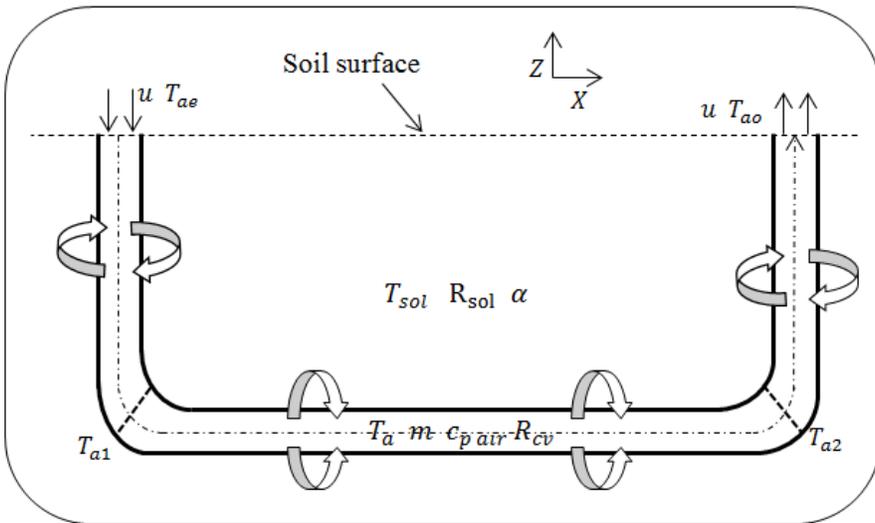


Figure 1 : Schéma descriptif de l'échangeur air/sol.

Tronçon Vertical 1

Température du sol autour de l'échangeur

La température du sol est régie par l'équation de la chaleur

$$\frac{\partial^2 T_{sol}}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_{sol}}{\partial t} \quad (1)$$

Nous nous intéressons d'abord au régime stationnaire, donc le profil de température s'écrit :

$$T_{sol}(z) = a \cdot z + b \quad (2)$$

$$T_{sol}(z = 0) = T_p$$

$$T_{sol}(z = \delta) = T_i$$

δ Etant la profondeur d'enfouissement de l'échangeur, T_i la température initiale du sol et T_p Étant la température à la paroi du sol, où on assure la continuité du flux de chaleur entre le sol et l'air ambiant pour la déterminer.

$$T_p = \frac{\lambda}{\lambda - \delta \cdot h} T_i - \frac{\delta \cdot h}{\lambda - \delta \cdot h} T_{ae} \quad (3)$$

Alors, la température du sol autour de l'échangeur vertical 1 s'écrit :

$$T_{sol}(z) = \frac{T_i - T_p}{\delta} \cdot z + T_p \quad (4)$$

Température de l'air le long de l'échangeur

Le bilan d'énergie entre deux sections du tube distante de Δz **Fig. 2** s'écrit :

$$m \cdot c_{pair} \cdot \frac{DT_a}{Dt} = q_1 - q_2 - q_3 \quad (5)$$

$$m \cdot c_{pair} \cdot \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + u \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) = -\lambda_{air} \cdot s \cdot \frac{\partial T_a}{\partial z} \Big|_z + \lambda_{air} \cdot s \cdot \frac{\partial T_a}{\partial z} \Big|_{z+\Delta z} + \frac{(T_{sol} - T_a)}{R_{totale}}$$

Où u : la vitesse de circulation de l'air à l'intérieur du tube ;

s : la section interne du tube, $s = \pi \cdot r_1^2$.

La résistance thermique totale (R_{totale}) est composée d'une part, de la résistance à la conduction du sol (R_{sol}) et celle du tube (R_{tube}), et d'autre part de la résistance convective de l'air (R_{cv}).

$$\rho \cdot s \cdot c_{pair} \cdot \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + u \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) = \lambda \cdot s \cdot \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} + \frac{(T_{sol} - T_a)}{R_{itotale}} \quad (6)$$

Soit : $R_{itotale}$ est la résistance thermique totale par unité de longueur et r_3 est le rayon de la couche adiabatique du sol, $r_3 = 2r_1$. (Ascione et al., 2011) (Fig. 3).

Tenant compte du fait que le transfert est permanent et la convection domine la conduction, l'équation (6) se réduit à :

$$\rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{pair} \cdot u \frac{dT_a}{dz} = \frac{(T_{sol} - T_a)}{R_{itotale}} \quad (7)$$

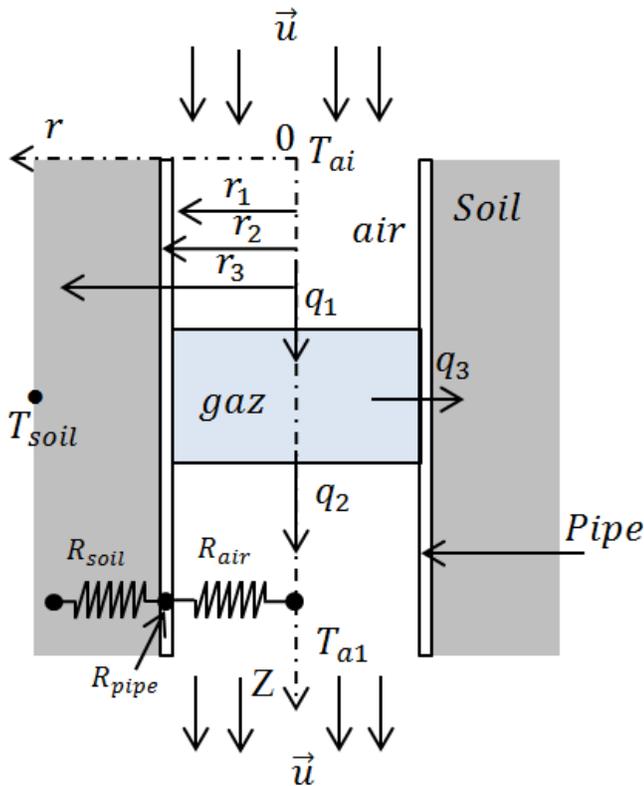


Figure 2 : Schéma descriptif de l'échangeur vertical d'entrée 1.

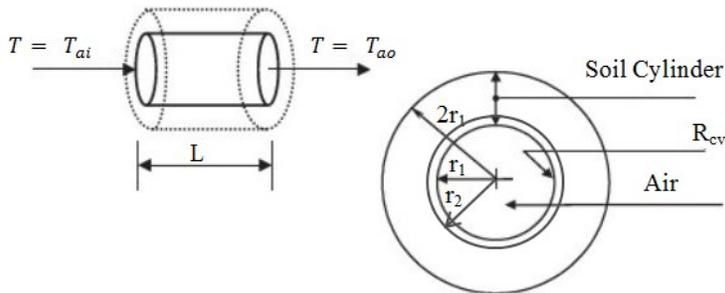


Figure 3 : Schéma représentatif d'un échangeur air/sol en coupe transversale.

$$\rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{pair} \cdot u \cdot R_{itotale} \frac{dT_a}{dz} + T_a = \frac{T_i - T_p}{\delta} \cdot z + T_p \quad (8)$$

$T_a(z = 0) = T_{ae}$ qui est la température ambiante.

La solution générale est la somme des deux solutions homogène T_{ah} et particulière T_{ap} .

$$T_a(z) = \left(T_{ae} - T_p + \beta \cdot \frac{T_i - T_p}{\delta} \right) \exp\left(-\frac{1}{\beta}\right) z + \frac{T_i - T_p}{\delta} \cdot z - \beta \cdot \frac{T_i - T_p}{\delta} + T_p \quad (9)$$

Avec : $\beta = \rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{pair} \cdot u \cdot R_{itotale}$

Tronçon Horizontal 2

L'échangeur horizontal est placé à une profondeur δ suffisamment profonde pour que la température du sol T_{sol} ne varie pas et reste constante égale à T_i .

Le raisonnement fait sur le tronçon vertical 1 reste valable mais ici la température du sol T_{sol} est constante (Fig.4). De l'équation (7) on a :

$$\rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{pair} \cdot u \frac{dT_a}{dx} = \frac{(T_{sol} - T_a)}{R_{itotale}}$$

$T_a(x = 0) = T_{a1}$ qui est la température à la sortie du tronçon vertical 1

La solution qui fournit la température d'un point quelconque de l'air dans l'échangeur horizontal 2, s'écrit :

$$T_a(x) = T_{sol} + (T_{a1} - T_i) \cdot \exp\left[-\frac{1}{\rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{pair} \cdot u \cdot R_{itotale}} x\right] \quad (10)$$

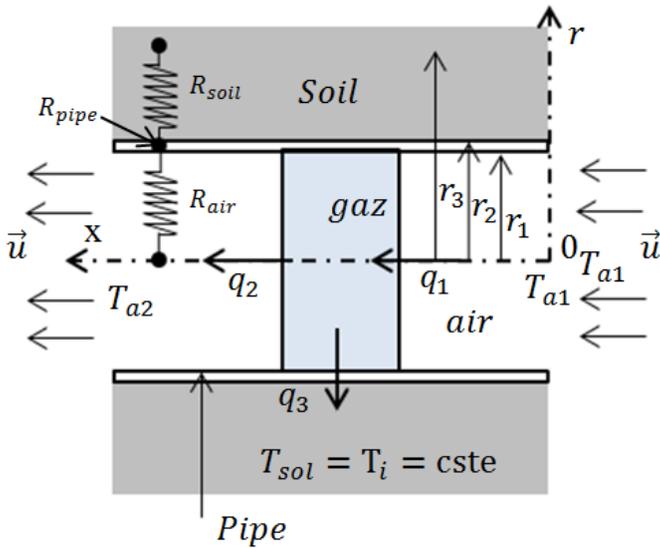


Figure 4 : Schéma descriptif de l'échangeur horizontal 2.

Tronçon Vertical 3

Température du sol autour de l'échangeur

Le profil de température du sol dans le nouveau repère s'écrit :

$$T_{sol}(z) = a_1 \cdot z + b_1 \quad (11)$$

$$T_{sol}(z = 0) = T_i$$

$$T_{sol}(z = \delta) = T_p$$

Tel que T_p : représente la température à la surface du sol.

$$T_{sol}(z) = \frac{T_p - T_i}{\delta} \cdot z + T_i \quad (12)$$

Température de l'air le long de l'échangeur

Le bilan d'énergie pour ce type d'échangeur de sortie (fig.5) avec les hypothèses citées ci-dessus, s'écrit comme suit :

$$\rho \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot c_{pair} \cdot u \frac{dT_a}{dz} = \frac{T_{sol} - T_a}{R_{itotale}} \quad (13)$$

$$T_a(z = 0) = T_{a2}$$

La solution de l'équation (13) après sommation des solutions homogène T_{ah} et particulière T_{ap} s'écrit de la façon suivante :

$$T_a(z) = \left(T_{a2} - T_i + \beta \frac{T_p - T_i}{\delta} \right) \cdot \exp\left(-\frac{1}{\beta} z\right) + \frac{T_p - T_i}{\delta} \cdot z + T_i - \beta \frac{T_p - T_i}{\delta} \quad (14)$$

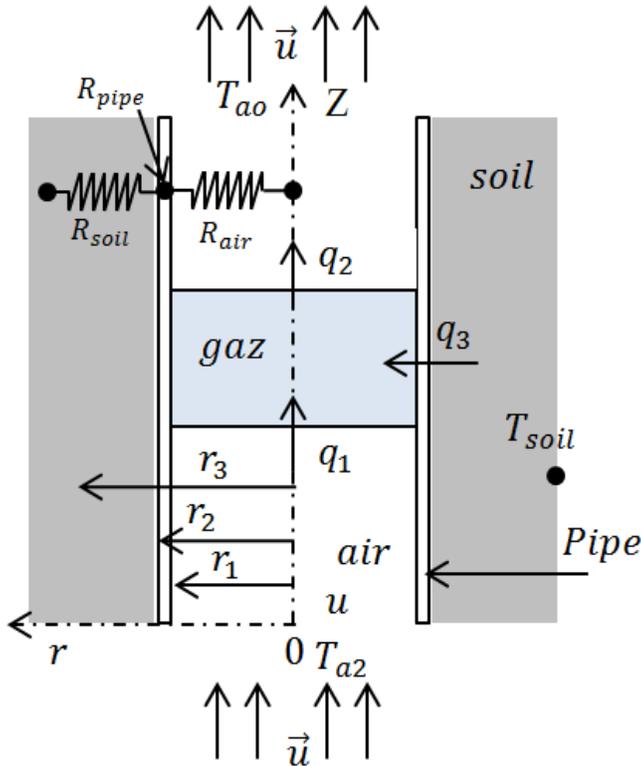


Figure 5 : Schéma descriptif de l'échangeur vertical de sortie 3

Quantité de chaleur échangée avec le sol par unité de longueur

On note q : quantité de chaleur échangée de l'air dans le tube vers le sol.

$$q = \frac{(T_{sol} - T_{a(l)})}{R_{totale}}$$

Donc la quantité de chaleur échangée avec le sol par unité de longueur prendra la forme suivante :

$$q/l = (T_{sol} - T_{a(l)}) / \left(\frac{1}{\lambda_{sol} \cdot 2\pi} \ln \left(\frac{r_3}{r_2} \right) + \frac{1}{\lambda_{gaine} \cdot 2\pi} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{h_{cv} \cdot 2\pi \cdot r} \right) \quad (15)$$

EXPERIMENTATION

La température du sol dépend de plusieurs paramètres tels que : la nature du sol, autrement dit la conductivité thermique (λ), la quantité de chaleur du soleil absorbée par le sol et de la température ambiante. Il est connu qu'à une profondeur de 3 m, la température à l'intérieure du sol reste moins sensible aux conditions climatiques externes au cours de l'année.

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire de Génie Mécanique LGM de l'université de Biskra. Les relevés de sondes de températures ont été pris toutes les 15 min. Les températures de l'air ambiant et celles à la sortie de l'échangeur pour une période de trois jours au mois d'aout 2013 sont présentées dans la figure.6.

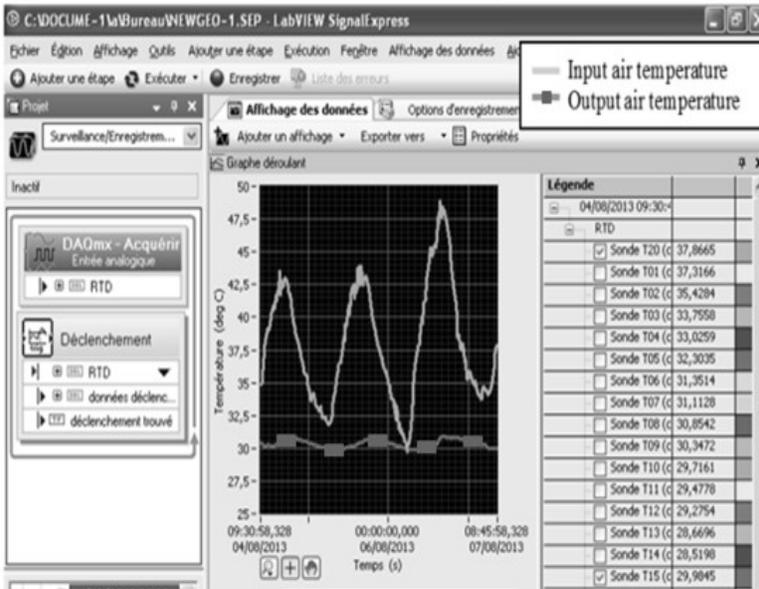


Figure 6 : Valeurs des températures entrantes et sortantes de l'échangeur au cours du temps.

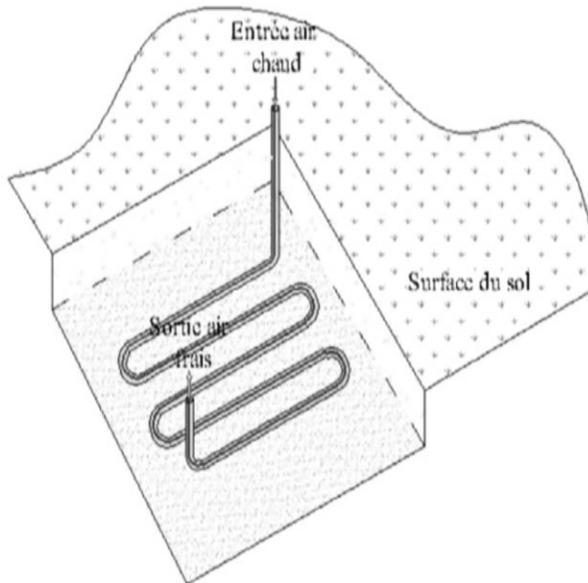


Figure 7 : Schéma d'enfouissement de l'échangeur air / sol enterré

L'échangeur est constitué d'un tube en PVC de 110 mm de diamètre et d'une longueur totale de 53 m, enterré en serpentin **Fig. 7** à 3 m de profondeur dans le sous-sol, avec un entraxe de 2 m sous une pente de 2%. Il occupe une surface de 85 m². Un avaloir d'évacuation des condensats est construit juste à la sortie de l'échangeur. Une centrale d'acquisition fournit par National Instrument, reliée par seize sondes de prélèvement de température le long de l'échangeur enterré. La vitesse de l'écoulement de l'air dans l'échangeur est gérée par un extracteur de débit variable et d'une consommation fiable en énergie électrique (120 W).

La température maximale atteinte expérimentalement servira comme référence pour la validation de nos résultats théoriques.

RESULTATS

On constate que, la température de l'air T_a en écoulement à l'intérieur de l'échangeur d'entrée qu'est enfouie en position vertical à la surface du sol **Fig. 8** diminue quand on pénètre d'avantage dans le sol à cause de la fraîcheur contenue dans le sous-sol. Celle-ci permet à l'air d'échanger sa chaleur vers

l'extérieur, et vice-versa pour la figure (9), la température s'élève lorsqu'il ressortira du sous-sol vers la paroi extérieure.

En général, la température de l'air T_a dépend proportionnellement de la température du sol T_{sol} , plus que le sol est frais, plus qu'il permet à l'air de libérer sa chaleur.

Tableau 1 : Différents paramètres du système

Système	Valeur
Température initiale du sol T_i	26°C
Conductivité thermique du sol λ	2.5 W/(m.°C)
Profondeur de pénétration de la chaleur δ	3 m
Rayon adiabatique du sol $r_3=2r_1$	110 mm
Rayon extérieur du tube r_2	57.5 mm
Rayon intérieur du tube r_1	55 mm
Température ambiante T_{ac}	48.87°C
Conductivité thermique du tube λ_p	0.17 W/(m.°C)
Vitesse d'écoulement de l'air dans l'échangeur u	3.5 m/s
Chaleur spécifique de l'air C_{pair}	1000 J/(Kg.°C)
Masse volumique de l'air ρ	1.2 Kg/m ³
Coefficient d'échange convectif moyen de l'air h	10 W/(m ² .°C)

Afin de faciliter à l'air de transférer sa chaleur vers le sol, il faut augmenter le temps de séjour de l'air à l'intérieur du sol, par l'allongement de l'échangeur. Donc, il est à noter que lorsqu'on augmente la longueur de l'échangeur, l'air a beaucoup de temps de se refroidir. Les courbes représentées sur les figures 10, 11 et 12 clarifient bien ce phénomène.

La figure (13) représente la variation de la quantité de chaleur échangée par unité de longueur entre l'air à l'intérieur de l'échangeur et le sol. Quand ces températures sont égales, la quantité de chaleur échangée est nulle comme à l'entrée du tronçon vertical 1 et à la sortie du tronçon horizontal (à 50 m de longueur). La quantité de chaleur échangée diminue quand l'air perd une énergie vers le sol est vice versa. Elle atteint un maximum de dégagement de la chaleur à l'entrée du tronçon horizontal (à 3 m de longueur), et un maximum de récupération de la chaleur à la sortie du tronçon vertical 3. C'est la différence maximale entre la température de l'air est celle du sol.

Pour des aspects économiques, il est préférable et rentable de limiter l'échange à une certaine longueur où le transfert est établi, parce qu'on n'a pas besoin d'augmenter la longueur de l'échangeur s'il n'y a pas d'échange de la chaleur entre l'air et le sol.

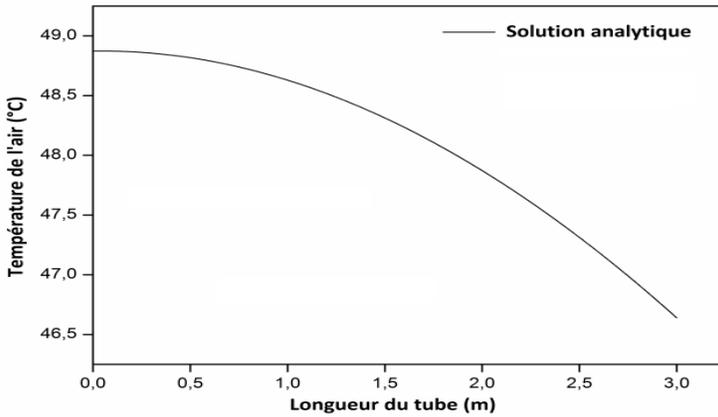


Figure 8 : Variation de la température de l'air à l'intérieur de l'échangeur vertical 1.

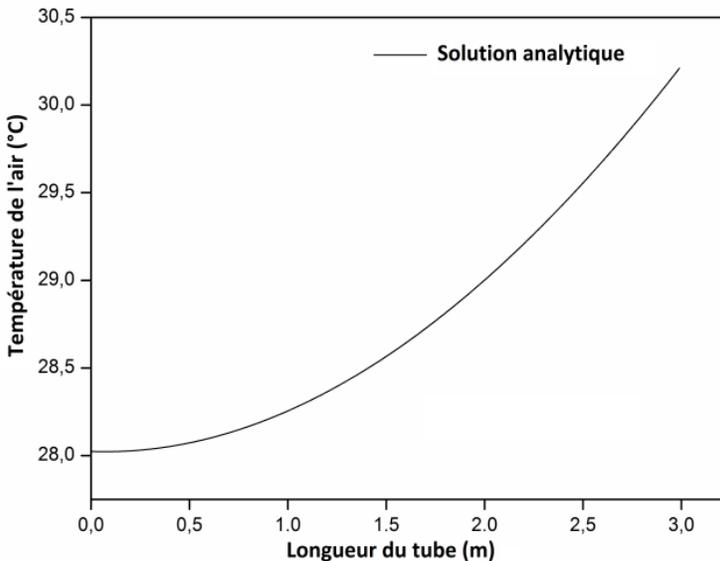


Figure 9 : Variation de la température de l'air à l'intérieur de l'échangeur vertical 3.

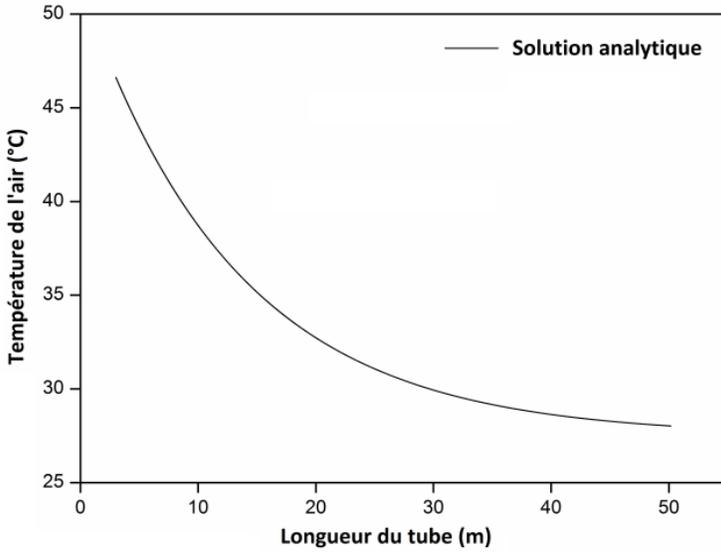


Figure 10 : Variation de la température de l'air le long de l'échangeur horizontal 2.

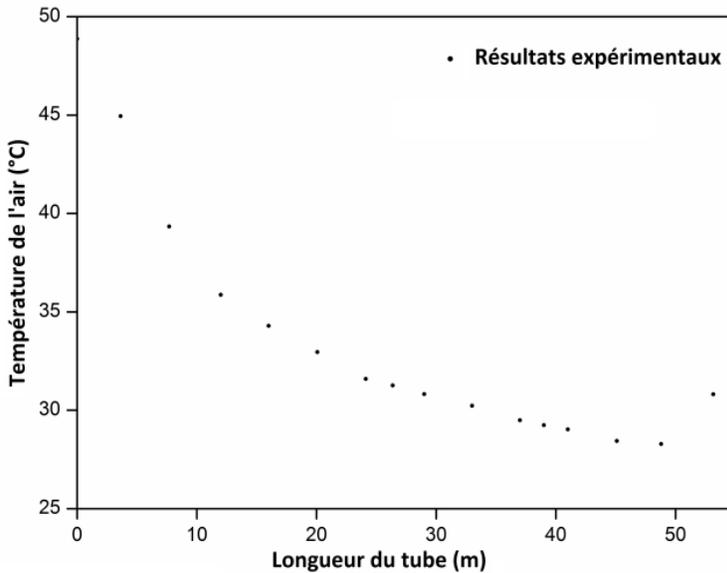


Figure 11 : Variation expérimentale de la température de l'air le long de l'échangeur.

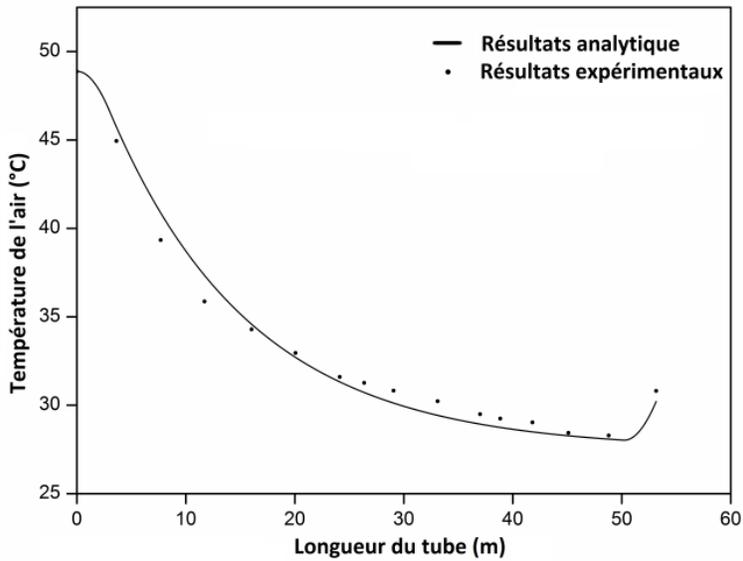


Figure 12 : Validation des résultats analytiques par ceux de l'expérimentale.

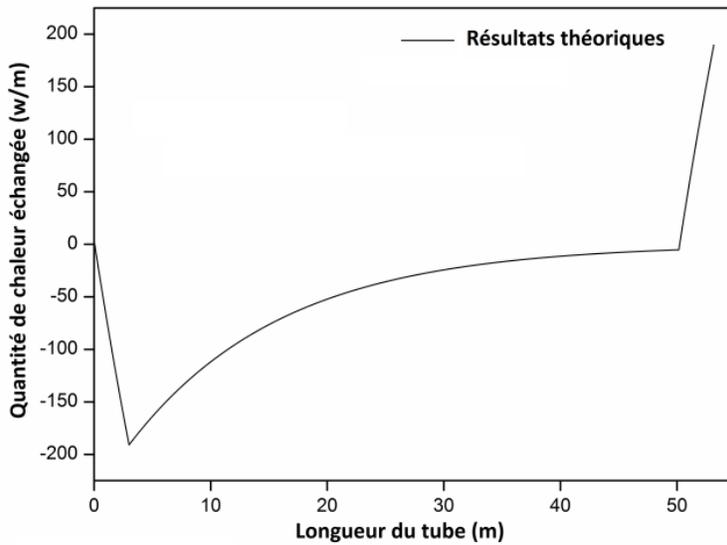


Figure 13 : Courbe de la quantité de chaleur échangée par unité de longueur le long du tube.

CONCLUSION

Dans cette étude, on a présenté d'une façon détaillée le phénomène du refroidissement de l'air par un échangeur air/sol enterré. Un modèle analytique unidimensionnel est proposé pour déterminer l'évolution de la température le long de l'échangeur. Ce modèle a été validé par des mesures expérimentales menées sur site pendant le mois d'Aout 2013. Les résultats analytiques et expérimentaux révèlent une bonne concordance.

De cette étude il en résulte les points suivants :

- La profondeur d'enfouissement de l'échangeur doit être suffisante pour atteindre la température du sol T_i
- L'échangeur air/sol seul peut atteindre le confort thermique de refroidissement, et il peut réduire la consommation d'énergie électrique comme l'utilisation des moyens de climatisation.

Pour que l'air préserve plus que possible sa fraîcheur à la sortie de l'échangeur vertical, il faut assurer suffisamment de conditions d'isolation thermique dans ce tronçon, ou installer un moyen d'accélération du fluide que ce soit actif ou passif.

REFERENCES

- Ascione F., Bellia L., Francesco M. (2011). Earth-to-air heat exchangers for Italian climates, *Renew Energy*, 36, 2177-2188.
- Brum R.S., Vaz J., Rochac L.A.O., dos Santos E.D., Isoldi L.A. (2013). A new computational modeling to predict the behavior of Earth-Air Heat Exchangers, *Energy Build*, 64, 395-402.
- Hollmuller P. (2003). Analytical characterisation of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers, *Int J Heat Mass Transf*, 46, 4303-4317.
- Krarti M., Kreider J.F. (1996). Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel, *Energy Convers Mgmt*, 37(10), 1561-1574.
- Moumimi N., Benfatah H., Hatraf N., Moumimi A., Youcef Ali S. (2010). Le rafraichissement par la géothermie : étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra, *RevEnergRen*, 13(3), 399-406.
- Sodha M.S., Sharma A.K., Singh S.P., Bansal N.K., A. Kumar.(1985). Evaluation of an earth-air tunnel system for cooling/heating hospital complex, *Build environ*, 20, 115-122.

- Thanu N.M., Sawhney R.L., Khare R.N., Buddhi D. (2001). An experimental study of the thermal performance of an earth-air-pipe system in single pass mode, *Sol Energy*, 71 (6), 353–364.
- Thiers S., Peuportier B. (2008). Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in France, *Sol Energy*, 82 (9), 820-830.
- Trombe A., Pettit M., Bourret B. (1991). Air cooling by earth tube heat exchanger: experimental approach, *Renew Energy*, 1 No. 5/6, 699-707.
- Trombe A., Serres L. (1994). Air-earth exchanger study in real site experimentation and simulation, *Energy Build*, 21, 155-162.
- Vaz J., Sattler M.A., dos Santos E.D., Isoldi L.A. (2011). Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger, *Energy Build*, 43, 2476–2482.