

Simulation et caractérisation d'un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments fonctionnant dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie

Mohammed Benhamou^{1*} et Belkacem Draoui^{2†}

¹ Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URER/MS
B.P. 478, Route de Reggane, Adrar, Algérie

² Laboratoire de Physique & Dispositifs à Semi-conducteurs,
Université de Béchar, Algérie

(reçu le 10 Février 2011 – accepté le 28 Juin 2012)

Résumé - La climatisation électrique est très énergivore et l'offre ne peut plus satisfaire à la demande accrue surtout dans les saisons chaudes. L'utilisation des systèmes de rafraîchissement par géothermie constitue une bonne alternative notamment dans la région du sud de l'Algérie où la période estivale est très longue et très chaude. Dans ce travail, nous présentons une étude effectuée sur un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments. Les résultats obtenus sont très encourageants et nous indiquent que cette technique bon marché peut couvrir une bonne partie de nos besoins en matière de climatisations domestiques. Cette étude nous a permis également d'examiner l'influence des paramètres de l'échangeur sur son efficacité moyenne quotidienne et sur la température de l'air refroidi en sortie de l'échangeur.

Abstract - The electric air-conditioning consumes too much energy and the offer cannot satisfy to the increased demand especially in the hot seasons. The utilization of systems of cooling by geothermic constitutes a good alternative notably in the region of the south of Algeria where the summery period is too long and very hot. In this work, we present a study done on an earth-to-air heat exchanger destined to the cooling of the building. The gotten results are very encouraging and indicate us that this low-priced technique can cover an important part of our needs of domestic cooling. This study also permitted us to examine the influence of parameters of the exchanger on its daily average efficiency and on the temperature of air cooled in exit of the exchanger.

Mots clés: Echangeur - géothermie - Air refroidi - Efficacité - Température.

1. INTRODUCTION

La géothermie basse température est une technique qui consiste à extraire les calories emmagasinées à certaine profondeur dans le sol afin de produire du chauffage en périodes de froid et du froid en périodes chaudes.

La température en profondeur du sol est caractérisée par deux paramètres: l'amplitude et le déphasage par rapport au signal thermique en surface. Cette amplitude décroît quand la profondeur augmente. Donc, à quelques mètres au-dessous de la surface du sol, la température est inférieure à celle en surface.

De plus, plus on s'enfonce dans le sol, plus le déphasage augmente. Cela veut dire que pour une certaine profondeur, la température du sol sera plus grande que la température ambiante en saisons de froid, tandis que la température ambiante en saisons

* benhamou71@yahoo.fr

† bdraoui@yahoo.com

chaudes sera plus grande que celle du sol dans la même période. Donc, on peut bénéficier de ce décalage pour se réchauffer dans la période hivernale et se climatiser dans la période estivale.

Un échangeur air-sol est un tube en polyéthylène enfoui à quelques mètres au dessous de la surface du sol et dans lequel on fait circuler de l'air extérieur. Au cours de son passage, l'air perd ou gagne quelques calories en échange avec la paroi interne du tube, selon que sa température est soit élevée ou basse par rapport à celle de la paroi.

Le sud algérien est caractérisé par un climat continental très chaud en été. La période chaude est très longue, et elle s'étale du mois de mai jusqu'au mois d'octobre.

Jadis, les habitants de cette région furent citadins et ils avaient cherché le confort. Ils construisirent ce que l'on appelle 'dahalisse' pour s'offrir de la fraîcheur en été. Dahalisse est une petite chambre bâtie au-dessous du niveau de la maison.

Comme aujourd'hui, cette technique ancestrale n'est plus à la mode, on a recours à la climatisation électrique. Mais vu la croissance démographique et économique de la région, la demande sur l'électricité en été dépasse l'offre, ce qui provoque des problèmes, tels que les coupures de courant électrique, outre qu'on paye une facture d'électricité trop chère.

L'utilisation des techniques de rafraîchissement par géothermie fait une bonne alternative et permet de s'offrir une climatisation bon marché.

Dans ce travail, nous avons mené une étude sur un échangeur thermique air-sol soumis aux conditions climatiques du sud algérien. Cette étude a permis d'examiner les paramètres influençant son fonctionnement, tels que la profondeur d'enfouissement, la température de l'air en entrée d'échangeur, la vitesse moyenne de l'air, la longueur et le diamètre de tube.

2. DESCRIPTION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Il s'agit d'un échangeur géothermique à air constitué d'un tube en polyéthylène enterré à distance 'z' au-dessous de la surface du sol. Grâce à un système de ventilation adéquat, l'air chaud ambiant est mis en circulation dans le tube. Il perd sa chaleur en échange thermique avec la paroi interne du tube et il se refroidit au fur et mesure qu'il circule et enfin il arrive à la sortie de l'échangeur avec une température basse (Fig. 1).

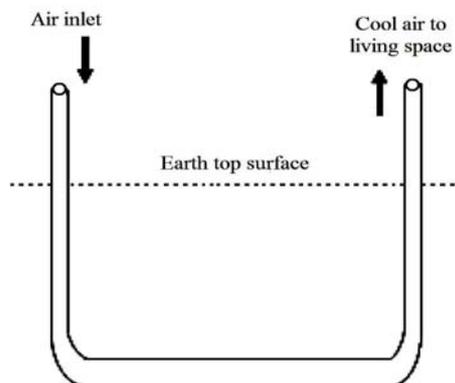


Fig. 1. Représentation de l'échangeur géothermique à air

3. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Le long de cette étude, on considère que:

- Le problème est unidirectionnel et on s'intéresse uniquement à l'évolution de température dans la direction d'écoulement.
- Le gradient radial de température dans le tube est négligeable.
- L'épaisseur de la zone perturbée du sol, qui enveloppe le tube est égale à la profondeur de pénétration journalière du signal thermique (δ_{jr}).
- Les propriétés physiques et thermiques du sol sont homogènes.

4. MODELISATION MATHEMATIQUE

Le sol est considéré comme un massif semi infini soumis à un signal de température sinusoïdal en sa surface. La température à une profondeur z dans le sol est donnée par l'équation suivante ([11, 12], [18]):

$$T_{\text{sol}}(z, t) = \bar{T}_{\text{surf}} + \text{geo} \times z + \sum_{j=1}^{100} A_{\text{surf}}(j) \times e^{-\frac{z}{\delta(j.w)}} \times \sin(j \times w \times t - \varphi_{\text{surf}} - \frac{z}{\delta(j.w)}) \quad (1)$$

La profondeur de pénétration thermique journalière est calculée à partir de l'équation suivante:

$$\delta_{jr} = \sqrt{\frac{\alpha_s}{\pi} \times (24 \times 3600)} \quad (2)$$

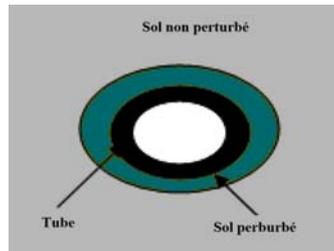


Fig. 2: Représentation d'une coupure transversale

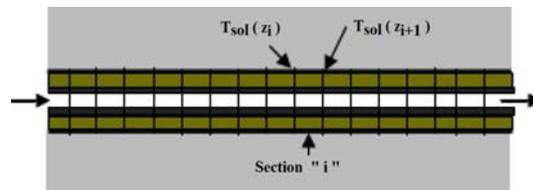


Fig. 3: Représentation d'une coupure longitudinale

La zone perturbée du sol qui entoure le tube est assimilée à un cylindre creux dont les rayons intérieur et extérieur sont respectivement:

$$Ri_s = Ro_t \quad (3.a)$$

$$Ro_s = Ro_t + \delta_{jr} \quad (3.b)$$

Afin d'étudier l'évolution de température de l'échangeur, nous l'avons découpé en sections fictives identiques dans la direction d'écoulement.

Pour tenir compte de l'effet des deux extrémités verticales du tube, on a considéré la température du sol non perturbé comme fonction de z :

$$T_{\text{sol}} = \begin{cases} \frac{T_{\text{sol}}(z_i) + T_{\text{sol}}(z_{i+1})}{2} & z_{i+1} \leq z \\ T_{\text{sol}}(z) & z_i = z_{i+1} = z \end{cases} \quad (4)$$

En tenant compte des hypothèses sus citées, le bilan d'énergie pour une tranche 'j' est établi comme suit:

Au niveau de l'air

$$\dot{m} \times C_{p_a} \times (T_{a_e}(j) - T_{a_s}(j)) = (2\pi \times R_{i_t} \times \Delta z) \times U_{a,t} \times (T_{a_m}(j) - T_t(j)) - q_{\text{fric}} \quad (5)$$

où

$$T_{a_m}(j) = \frac{T_{a_e}(j) + T_{a_s}(j)}{2} \quad (6)$$

Au niveau du tube

$$M_t \times C_{p_t} \times \frac{dT_t(j)}{dt} = (2\pi \times R_{i_t} \times \Delta z) \times U_{a,t} \times (T_{a_m}(j) - T_t(j)) - (2\pi \times R_{i_t} \times \Delta z) \times U_{t,s} \times (T_t(j) - T_s(j)) \quad (7)$$

Au niveau de la zone perturbée du sol

$$M_{ts} \times C_{p_s} \times \frac{dT_s(j)}{dt} = (2\pi \times R_{o_t} \times \Delta z) \times U_{t,s} \times (T_t(j) - T_s(j)) - (2\pi \times R_{o_s} \times \Delta z) \times U_{s,s} \times (T_s(j) - T_{\text{sol}}(j)) \quad (8)$$

Le coefficient d'échange thermique entre l'air et le tube est donné par la relation suivante:

$$\frac{1}{U_{a,t}} = \frac{1}{h_c} + \frac{R_{i_t}}{\lambda_t} \times \ln\left(\frac{R_{i_t} + R_{o_t}}{2 \times R_{i_t}}\right) \quad (9)$$

où h_c est donné par l'équation suivante [7].

$$h_c = 0.023 \text{Re}^{0.8} \times \text{Pr}^{1/3} \times \ln\left(\frac{R_{i_t} + R_{o_t}}{2 \times R_{i_t}}\right) \quad (10)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par conduction entre le tube et la zone perturbée du sol est:

$$\frac{1}{U_{t,s}} = \frac{R_{o_t}}{\lambda_t} \times \ln\left(\frac{2 \times R_{o_t}}{R_{i_t} + R_{o_t}}\right) + \frac{R_{o_t}}{\lambda_s} \times \ln\left(\frac{R_{o_t} + R_{o_s}}{2 \times R_{o_t}}\right) \quad (11)$$

Le coefficient de pertes thermiques par conduction entre la zone perturbée et la zone non perturbée du sol est donné par l'équation suivante:

$$\frac{1}{U_{s,s}} = \frac{Ro_s}{\lambda_s} \times \ln\left(\frac{2 \times Ro_s}{Ro_t + Ro_s}\right) \quad (12)$$

La quantité de chaleur gagnée par l'air due au frottement est évaluée en fonction du coefficient de pertes de charge linéaires f , [3], [5, 6]:

$$q_{\text{fric}} = \dot{m} \times f \times \frac{\Delta z}{D_{i_t}} \times \frac{V_a^2}{2} \quad (13)$$

5. RESULTATS AND DISCUSSIONS

Cette étude est effectuée sur le site d'Adrar. Cette ville située au sud de l'Algérie est caractérisée par un climat continental très chaud en été. Au mois de juillet, les températures maximales s'approchent des 50 °C.

Dans le but d'examiner la faisabilité de se climatiser à l'aide d'un échangeur géothermique à air, nous avons choisi une période allant du mois de juin au mois de septembre de manière que chaque mois soit représenté par sa journée type.

Cet échangeur est construit d'un tube en polyéthylène de longueur de 40 m et de diamètre égal à 16 cm, enfoui à une profondeur de 3 m à partir de la surface du sol. La vitesse moyenne de l'air dans le tube est prise égale à 3.5 m/s.

Dans les figures (4-7), nous avons mis en comparaison la variation pendant une journée de la température ambiante avec celle de l'air en sortie de l'échangeur.

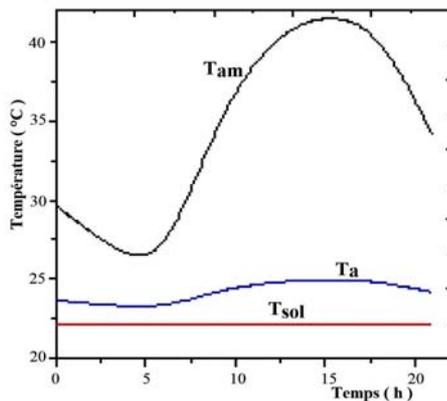


Fig. 4: Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juin

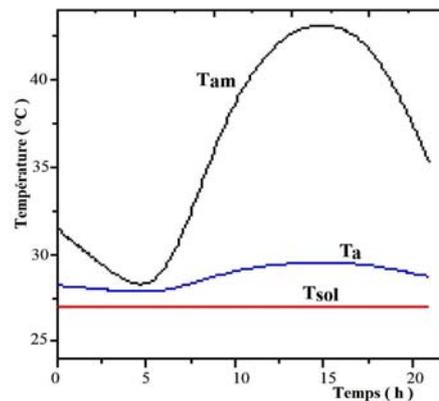


Fig. 5: Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de juillet

La première chose à remarquer est que par suite du déphasage, la température du sol à une profondeur de 3 m est plus basse dans le mois de juin (22 °C) et elle est au voisinage des 38 °C dans le mois de septembre.

La seconde chose à constater est que plus l'écart de température entre l'air ambiant et le sol est grand, plus l'air se refroidit davantage. A titre d'exemple, les écarts de température maximaux entre l'air ambiant et le sol pour les mois de juin et de septembre sont respectivement: 19.5 °C et 10.6 °C.

On trouve que les écarts de température correspondants entre l'air ambiant et l'air refroidi en sortie de l'échangeur sont respectivement: 16.5 °C et 8.8 °C. Cela s'explique par le fait que lorsque la température de l'air ambiant est plus grande que celle du sol, les pertes thermiques vers les parois de tube sont grandes aussi. Ce qui fait que sa température s'abaisse considérablement.

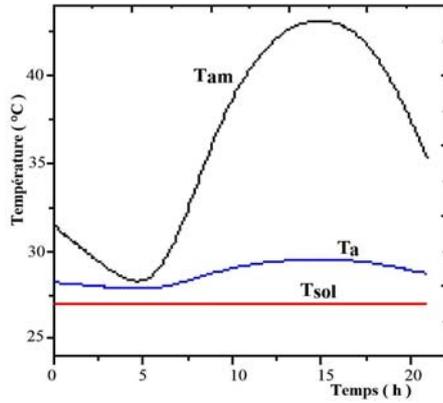


Fig. 6: Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois d'août

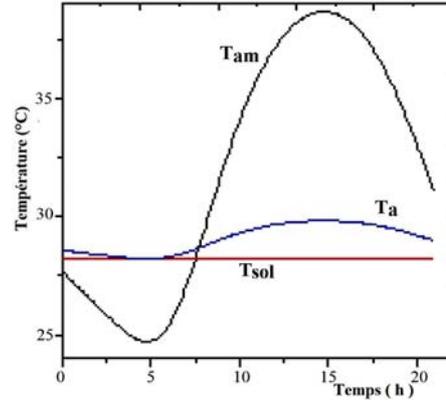


Fig. 7: Variation en fonction du temps de la température de l'air refroidi pour le mois de septembre

La figure 8 nous montre la variation de la température de l'air refroidi à 12h et l'efficacité moyenne journalière en fonction de la profondeur dans le sol. Il est aisé de voir que la température de l'air refroidi décroît quand la profondeur augmente.

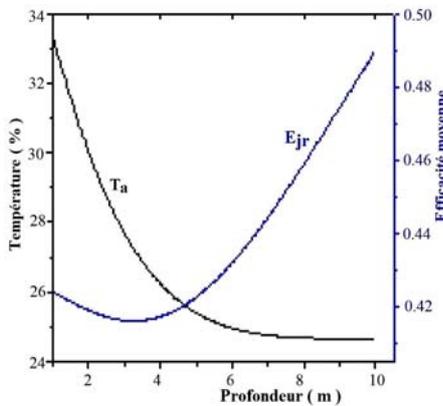


Fig. 8: Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne quotidienne en fonction de la profondeur

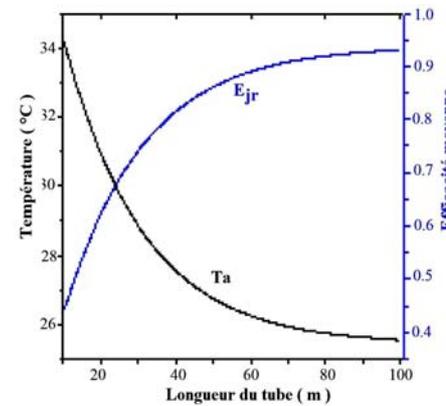


Fig. 9: Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne quotidienne en fonction de la longueur du tube

Pour une profondeur de 3 m, la température de l'air refroidi obtenue à midi est de 27.6 °C. Mais elle est égale à 25°C pour une profondeur de 6m.

En ce qui concerne la variation de l'efficacité moyenne quotidienne en fonction de la profondeur, on constate qu'elle diminue puis elle remonte.

Quant à l'influence de la longueur du tube, la figure 9 illustre que quand la longueur s'accroît, la température de l'air refroidi s'abaisse, tandis que l'efficacité moyenne quotidienne augmente.

Le diamètre du tube influence beaucoup le fonctionnement de l'échangeur (Fig. 10). En effet, la température de l'air refroidi décroît puis elle augmente. Son minimum est obtenu pour un diamètre égal à 10 cm. Cependant, l'efficacité moyenne journalière a l'allure d'une cloche : elle remonte puis elle redescend et elle admet un maximum de 87% correspondant à un diamètre de 10 cm.

Pour ce qui est de l'effet de la vitesse moyenne de l'air sur la température de l'air refroidi, la figure 11 montre que la température de l'air refroidi augmente linéairement en fonction de la vitesse d'écoulement alors que l'efficacité quotidienne diminue linéairement aussi.

La figure 12 fait apparaître l'évolution au fil du temps de l'efficacité instantanée. On constate qu'elle reproduit l'allure de la température ambiante. Elle est minimale au moment où la température ambiante est minimale et vis versa.

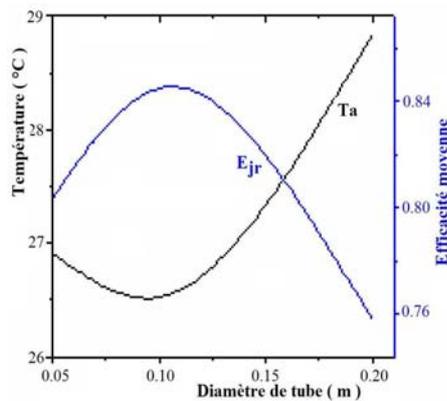


Fig. 10: Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne journalière en fonction du diamètre du tube

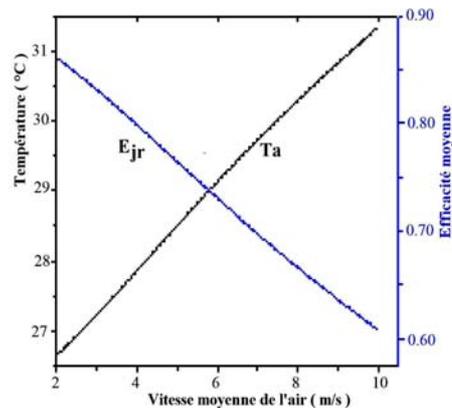


Fig. 11: Variation de la température de l'air refroidi et de l'efficacité moyenne journalière en fonction de la vitesse moyenne de l'air dans le tube

6. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté une étude menée sur un échangeur géothermique à air destiné à la production du froid. Cette étude est effectuée dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie. Les résultats obtenus nous indiquent que cette technique est prometteuse et elle peut être substituée à la climatisation conventionnelle.

En outre, nous avons également examiné l'influence de différents paramètres sur le fonctionnement de l'échangeur air-sol.

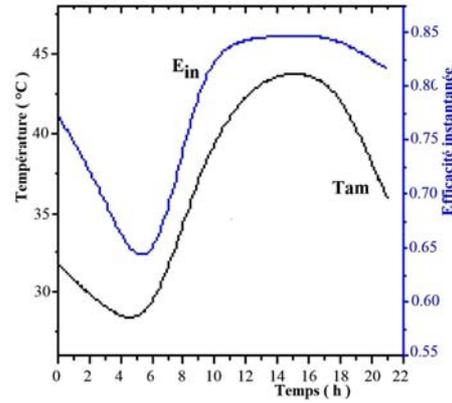


Fig. 12: Comparaison entre l'évolution de l'efficacité instantanée avec celle de la température ambiante pour le mois de juillet

Les résultats sont récapitulés en ce qui suit:

La température de l'air refroidi en sortie de l'échangeur est d'autant plus faible que la profondeur d'enfouissement dans le sol est grande. De même, plus l'échangeur est long, plus la température de l'air refroidi est basse.

La vitesse d'écoulement a un effet aussi important sur le fonctionnement de l'échangeur géothermique. La température de l'air refroidi s'accroît linéairement avec la vitesse de l'air. Donc, il est préférable de choisir une vitesse ni très faible ni très grande.

Concernant le diamètre du tube enfoui, nous avons trouvé qu'il existe une valeur optimale pour laquelle la température de l'air refroidi est minimale et l'efficacité quotidienne de l'échangeur est maximale.

NOMENCLATURE

A : Amplitude	C_p : Capacité calorifique, J/kg°C
E : Efficacité instantanée ou moyenne quotidienne	z : Profondeur dans le sol, m
f : Coefficient de pertes de charge linéaires	géo : gradient géothermique, °C/m
M : Masse, kg	T_a : Température de l'air refroidi en sortie de l'échangeur, K
Pr : Nombre de Prandtl	\dot{m} : Débit massique de l'air, kg/s
Re : Nombre de Reynolds	q_{fric} : Chaleur due au frottement, W
R_o : Rayon extérieur, m	R_i : Rayon intérieur, m
\bar{T} : Température moyenne annuelle, K	T : Température, K
	T_t : Température du tube, K

T_{am} : Température ambiante, K	T_s : Température du sol perturbé, K
T_{sol} : Température du sol non perturbé, K	U : Coefficient d'échange thermique, W/m^2K
V : Vitesse de l'air, m/s	ω : Pulsation, rad/s
a : air; in : instantanée; jr : journalier	m : moyenne; $surf$: surface du sol; s : sol
α : Diffusivité thermique, m^2/s	λ : Conductivité thermique, $W/m.K$
φ : Différence de phase entre la température de l'air ambiant et de la surface du sol, rad	h_c : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'air et les parois internes du tube, $W/m^2.K$
δ : Longueur de pénétration du signal de température, m	

REFERENCES

- [1] D.Y. Goswami and A.S. Dhaliwal, 'Heat Transfer Analysis in Environmental Control Using an Underground Air Tunnel', Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 107, N°2, pp. 141 - 145, 1985.
- [2] D. Claridge, M. Krarti and J. Keider, 'Energy Calculations for Basements, Slabs and Crawl Spaces', Steven Winter Associates Inc, University of Colorado at Boulder, Texas A&M University, Final Report, June. 1993.
- [3] 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.
- [4] U.D.J. Gieseler, W. Bier and F.D. Heidt, 'Cost Efficiency of Ventilation Systems for Low-Energy Buildings with Earth-to-Air Heat Exchanger and Heat Recovery', Proceedings of the International Conference on Passive and Low Energy Architecture, (PLEA), Toulouse, pp. 577 - 582, 2002.
- [5] P. Hollmuller, 'Utilisation des Echangeurs Air-Sol pour le Chauffage et le Rafraîchissement des Bâtiments', Thèse de Doctorat es Sciences, Faculté des Sciences, Université de Genève, Suisse, 2002.
- [6] P. Hollmuller and B. Lachal, 'Buried Pipe Systems with Sensible and Latent Heat Exchange: Validation of Numerical Simulation Against Analytical Solution and Long-Term Monitoring', 9th International IBPSA Conference, Montréal, Canada, pp. 411 - 418, August 15-18, 2005.
- [7] J. Zhang and F. Haghghat, 'Simulation of Earth-to-Air Heat Exchangers in Hybrid Ventilation Systems', 9th International IBPSA Conference, Montréal, Canada, pp. 1417 - 1424, August 15-18, 2005.
- [8] M.K. Ghosal, G.N. Tiwari, D.K. Das and K.P. Pandey, 'Modeling and Comparative Thermal Performance of Ground Air Collector And Earth Air Heat Exchanger For Heating Of Greenhouse', Energy and Buildings, Vol. 37, N°6, pp. 613 - 621, 2005.

- [9] S. Thiers et B. Peuportier, '*Modélisation Thermique d'un Echangeur Air-Sol pour le Rafraîchissement des Bâtiments*', Journée thématique SFT-IBPSA, Froid Solaire et Confort d'Été, Aix les Bains, pp. 96 – 103, 25 avril, 2007.
- [10] K. Ho Lee and R.K. Strand, '*The Cooling and Heating Potential of an Earth Tube System in Buildings*', Energy and Buildings, Vol. 40, N°4, pp. 486-494, 2008.
- [11] S. Thiers and B. Peuportier, '*Thermal and Environmental Assessment of a Passive Building Equipped with an Earth-to-Air Heat Exchanger in France*', Solar Energy, Vol. 28, N°9, pp. 820-831, 2008.
- [12] S. Thiers, '*Bilans Énergétiques et Environnementaux de Bâtiments à Energie Positive*', Thèse de Doctorat, Centre Énergétique et Procédés, ENSMP, 252 p., 2008.
- [13] S.A.M. Said, M.A. Habib, E.M.A. Mokheimer, N. Al-Shayea, and M. Sharqawi, '*Horizontal Ground Heat Exchanger Design For Ground-Coupled Heat Pumps*', Ecologic Vehicles, Renewable Energy, Monaco, 2009.
- [14] A. Chel, and G. N. Tiwari, '*Performance Evaluation and Life Cycle Cost Analysis of Earth to Air Heat Exchanger Integrated With Adobe Building for New Delhi Composite Climate*', Energy and Buildings, Vol. 41, N°1, pp. 56 - 66, 2009.
- [15] M. Moumni, H. Benfatah, A. Moumni 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.
- [16] N. Naili, S. Kooli et A. Farhat, '*Optimisation Analytique et Validation Expérimentale d'un Echangeur Enterré*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 13, N°3, pp. 525 - 535, 2010.
- [17] E.J. Kim, J.J. Roux, G. Rusaouen and F. Kuznik, '*Numerical Modelling of Geothermal Vertical Heat Exchangers for the Short Time Analysis using the State Model Size Reduction Technique*', Applied Thermal Engineering, Vol. 30, N°6-7, pp. 706 – 714, 2010.
- [18] M. Benhammou et B. Draoui, '*Modélisation de la Température en Profondeur du Sol pour la Région d'Adrar - Effet de la Nature du Sol*', Revue des Energies Renouvelables, Vol.14, N°2, pp. 219 – 228, 2011.