

Optimisation analytique et validation expérimentale d'un échangeur enterré

Nabiha Naili*, Sami Kooli et Abdelhamid Farhat

Laboratoire de Maîtrise des Technologies de l'Energie, 'LMTE'
Centre de Recherche des Technologies de l'Energie, 'CRTEN'
B.P. 95, Hammam Lif, 2050 Tunis, Tunisie

(Reçu le 13 Janvier 2010 – Accepté le 25 Septembre 2010)

Résumé - Dans la présente étude, on se propose d'étudier l'opportunité d'exploiter l'inertie thermique du sol pour le chauffage. Une étude analytique est présentée. Elle consiste à évaluer les performances thermiques et à optimiser les paramètres de fonctionnement de l'échangeur de chaleur eau/sol utilisé dans la récupération de l'énergie thermique du sol. Les résultats ont montré que les dimensions du système de récupération affectent la quantité de chaleur récupérée du sol. Une étude expérimentale a été aussi effectuée. Elle nous a permis de déterminer les performances de l'échangeur enterré et de valider les résultats du modèle analytique. Les résultats ont montré une bonne concordance, de l'ordre de 7 %, entre les résultats du modèle analytique et les points expérimentaux.

Abstract - In the present study we propose to study the advisability of exploiting the thermal inertia of ground for heating. An analytical study is presented. It consists in evaluating the thermal performances and optimizing the parameters of operation of the heat exchanger used in the recuperation of the ground thermal energy. The results showed that dimensions of the recovery system affect the quantity of heat recovered from ground. An experimental study was also carried out. It enabled us to determine the performances of the buried exchanger and to validate the results of the analytical model. The results showed a good agreement, about 7 %, between the analytical model results and the experimental points.

Mots clés: Echangeur eau/sol - Optimisation - Température du sol - Perte de charge.

1. INTRODUCTION

Le sol constitue un potentiel thermique très important qui peut être exploité dans la climatisation. La récupération de l'énergie thermique du sol se fait essentiellement à travers un réseau d'échangeurs de chaleur enterré.

Hollmuller *et al.*, 2000, [1] ont opté pour un stockage direct de la chaleur dans le sol de la serre. Ils ont mis au point un système de récupération de l'énergie thermique sous forme de chaleur sensible. Ce système est constitué d'un échangeur eau/air couplé avec des échangeurs en PVC enterrés dans le sol à 30 cm de profondeur. Cette technique permet d'économiser 12 % de l'énergie annuelle destinée au chauffage des serres par des systèmes conventionnels fonctionnant avec le fuel.

De Paepe *et al.*, 2001, [2] ont montré que pour une utilisation optimale du système air/sol et pour éviter l'influence des conditions climatiques externes, les tubes doivent être enterrés à une profondeur de 2,5 m du sol. Le modèle a aussi permis d'optimiser la longueur des tubes pour obtenir des performances maximales.

* Nabiha_naili@yahoo.fr

Dans leurs approches, Öztürk *et al.*, 2004, [3] prévoient de stocker quotidiennement l'énergie solaire en utilisant le sous-sol d'une serre tunnel de 120 m² de superficie et un champ de capteurs solaires de 27 m² de surface. Le stockage de la chaleur se fait à une profondeur de 2 m du sol de la serre. Des analyses d'énergie et d'exergie ont été appliquées afin d'évaluer l'efficacité du système. Les résultats montrent que pendant les périodes de stockage, la quantité moyenne d'énergie thermique stockée est de 2.5 kW/m². Cette énergie est récupérée la nuit pour satisfaire aux besoins des cultures.

Des études ont été effectuées sur les échangeurs enterrés en vue d'une meilleure utilisation dans la récupération de l'énergie. Ces études font intervenir plusieurs considérations (efficacité, dimension, forme, résistance à l'entartrage, résistance à la corrosion, coût, etc.) (Hazami [4], Florides *et al.*, [5] et Omer [6]).

Dans ce contexte, des travaux ont été effectués afin d'étudier l'effet de la variation des propriétés géométriques sur le comportement dynamique d'un échangeur tubulaire soumis à différentes conditions de température, Omar *et al.*, 1999, [7] ont étudié trois différentes formes d'échangeurs tubulaires. L'étude expérimentale a montré que le coefficient d'échange et la puissance thermique échangée dépendent de la longueur des tubes et de leurs diamètres.

Mihalakakou *et al.* [8] ont montré, au cours d'une étude numérique, que l'efficacité thermique de l'échangeur enterré (air/sol) augmente avec sa longueur et son diamètre. Ils ont aussi montré que les performances du système de récupération dépendent aussi de la profondeur d'enterrement de l'échangeur. Toutefois il existe une profondeur optimale au-delà de laquelle le système de récupération de l'énergie thermique du sol atteint une valeur maximale qui dépend de la nature même du sol.

L'effet du niveau d'enfouissement d'un échangeur eau/sol a été aussi étudié par Esen et al. [9, 10], qui ont testé expérimentalement la performance d'un système de climatisation forme par une pompe à chaleur couplée à des échangeurs enterrés disposés à deux profondeurs différentes: 1 m et 2 m. Leur expérience a montré que la performance des échangeurs enterrés augmente avec l'augmentation de la profondeur (2,5 pour 1 m et 2,8 pour 2 m).

Dans ce contexte, on se propose d'étudier, au Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie (CRTEn) à Borj Cedria, les performances d'un système de récupération de l'énergie thermique du sol utilisant un réseau d'échangeur de chaleur tubulaire en polyéthylène de 25 m de longueur et de 16 10⁻³ m de diamètre interne enterré à 1 m de profondeur du sol. Cet échangeur est couplé à une pompe à chaleur qui fournit une eau de température et de débit réglable. Deux approches ont été suivies:

- une approche analytique qui consiste à évaluer les paramètres de fonctionnement de l'échangeur tubulaire enterré (débit de l'eau caloporteur, pertes de charges, longueur de l'échangeur) et d'évaluer la puissance maximale récupérée du sol.
- une approche expérimentale qui consiste à valider les résultats du modèle analytique et à évaluer les performances du système de récupération de l'énergie thermique du sol.

2. ETUDE ANALYTIQUE

Lors de la caractérisation d'un échangeur de chaleur, on cherche souvent à déterminer le coefficient d'échange en fonction des paramètres de fonctionnement de l'échangeur (surface d'échange et débit caloporteur). Cette détermination reste une

tâche assez délicate à réaliser, car ce coefficient est étroitement lié à la configuration géométrique de l'échangeur (longueur et diamètre de l'échangeur) et aux phénomènes de pertes de charges (Haught *et al.*, [11]; Ttorikoshi *et al.*, [12]; Batasani *et al.*, [13]).

L'objectif de l'étude théorique est de chercher à obtenir une puissance d'échange donnée avec la plus faible surface d'échange et le meilleur débit caloporteur, autrement dit, au meilleur coût d'investissement et d'exploitation.

2.1 Etude thermique

Pour étudier l'échangeur eau/sol analytiquement, on a considéré les hypothèses suivantes:

- le régime permanent est établi,
- l'analyse est unidimensionnelle,
- le débit de l'eau dans l'échangeur reste constant le long d'un tube (hypothèse de l'écoulement 'piston').

L'échange de chaleur à l'intérieur d'un tube où circule l'eau caloporteur se fait par convection forcée (Fig. 1).

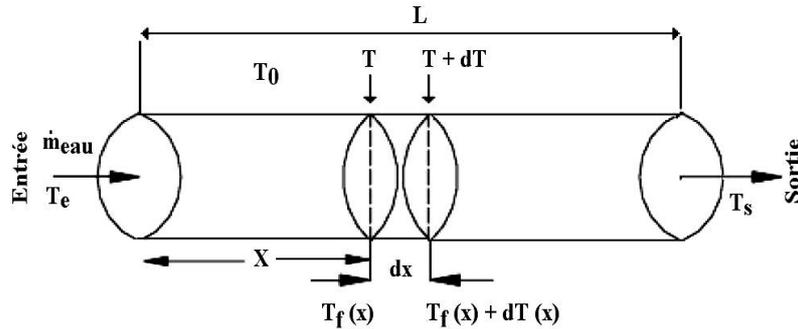


Fig. 1: Tranche du tube de l'échangeur tubulaire eau/sol placé dans le sol

Le flux de chaleur local échangé à travers l'élément de surface d'échange dS de la section de longueur dx du tube s'écrit:

$$dQ_p = U(x) \times (T_f(x) - T_0) \times dS \quad (1)$$

La température de l'eau caloporteur à chaque section d'abscisse x du tube est donnée par la formule suivante:

$$T_f(x) = T_0 + (T_e - T_0) \exp \left\{ - \left(\frac{U(x) \times 2\pi r x}{\dot{m} \times C_p} \right) \right\} \quad (2)$$

Le flux thermique total, Q_p , récupéré par l'échangeur de chaleur enterré est donné par l'expression suivante:

$$Q_p = \dot{m} C_p \times (T_s - T_e) = \dot{m} C_p \times \left[1 - \exp \left\{ - \frac{\pi D L U}{\dot{m} C_p} \right\} \right] \times (T_0 - T_s) \quad (3)$$

2.2 Etude aéraulique

Les phénomènes de pertes de charges affectent sévèrement les performances thermiques de l'échangeur eau/sol. Il est donc indispensable d'évaluer les pertes de charges se produisant à l'intérieur du tube au cours de l'écoulement de l'eau caloporteur. Dans notre cas, on distingue deux types de pertes de charges: linéique et singulière.

2.2.1 Perte de charge linéique

La perte de charge linéique pour un écoulement dans une conduite rectiligne se détermine de la manière suivante:

$$\Delta p = \frac{\lambda \rho V^2}{D} L \quad (4)$$

En régime turbulent, le coefficient de perte de charge, λ , est donné par la relation de Blasius:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (5)$$

2.2.2 Perte de charge singulière

La perte de charge singulière est calculée à travers l'expression:

$$\Delta p = \xi \rho \frac{V^2}{2} \quad (6)$$

Le coefficient de perte de charge, ξ , est donné par la relation suivante [14]:

$$\xi = 0.0175 \lambda \times \frac{R_0}{D_H} \times \delta^0 \quad (7)$$

3. EXPLOITATION DU MODELE

Le modèle analytique nous a permis d'évaluer l'effet des paramètres de fonctionnement (débit caloporteur, pertes de charges, longueur et diamètre de l'échangeur) sur la puissance thermique récupérée du sol.

Sur la figure 2, nous avons présenté l'effet du débit d'eau caloporteur sur la puissance échangée Q_p . Les résultats montrent que Q_p , augmente en fonction du débit. Néanmoins cette augmentation n'est pas linéaire.

Elle est freinée par les pertes de charge, qui sont proportionnelles au débit (Fig. 3) (Zella *et al.*, [15]). La puissance échangée Q_p maximale atteinte, est de l'ordre de 700 W.

L'échangeur eau/sol atteint les valeurs maximales de la puissance échangée pour un débit de l'ordre de 0.12 kg/s. L'utilisation de l'échangeur tubulaire avec un débit plus faible réduit notablement la puissance échangée de l'échangeur.

L'effet de la variation de la longueur de l'échangeur tubulaire sur l'énergie récupérée du sol, est mis en évidence à travers la figure 4.

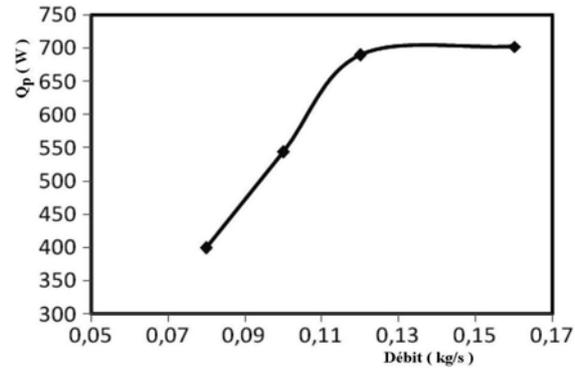


Fig. 2: Variation du flux récupéré du sol en fonction du débit pour un échangeur de longueur 25 m et de diamètre 16 mm

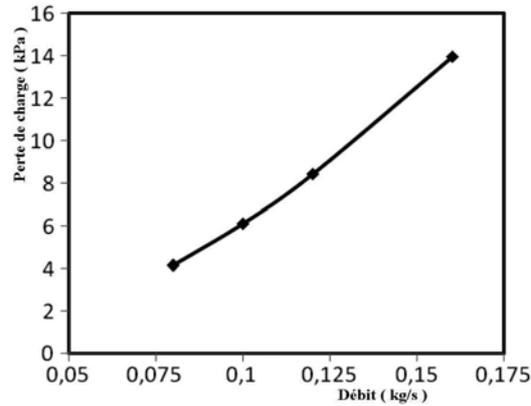


Fig. 3: Variation de la perte de charge en fonction du débit pour un échangeur de longueur 25 m et de diamètre 16 mm

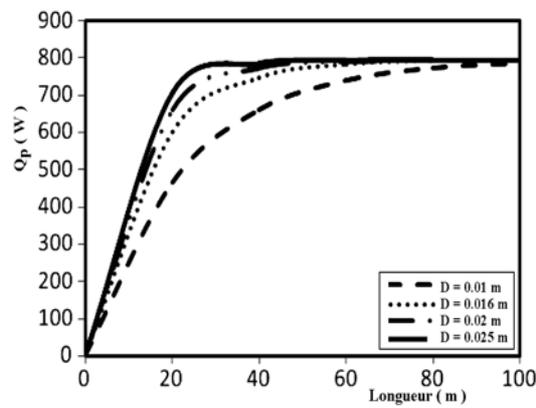


Fig. 4: Variation du flux récupéré du sol en fonction de la longueur pour différents diamètres pour un débit égal à 0.12 kg/s

Le modèle analytique montre que, pour le débit optimal de l'eau caloporteur, 0.12 kg/s, la valeur maximale de l'énergie récupérée du sol dépend à la fois de la longueur et du diamètre de l'échangeur enterré.

Le modèle analytique montre que les pertes de charges sont inversement proportionnelles au diamètre de l'échangeur {Eq. (4)}. Les résultats montrent que pour le diamètre 20 mm, les pertes de charges sont notablement réduites (Fig. 5).

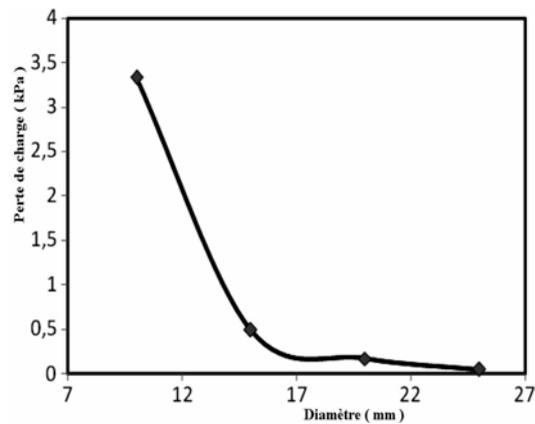


Fig. 5: Variation de la perte de charge en fonction du diamètre pour un débit égal à 0.12 kg/s

Ceci se traduit par la diminution du temps de réponse du système de récupération. Cependant, plus la longueur de l'échangeur est importante, plus l'effet de la variation du diamètre est moins important.

A la fin, pour une longueur de l'ordre de 80 m, l'effet de la variation du diamètre de l'échangeur enterré n'affecte plus la valeur maximale de la puissance récupérée du sol.

3. VALIDATION EXPERIMENTALE

3.1 Dispositif expérimental

En vue de valider le modèle analytique, une étude expérimentale a été menée au Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie, CRTEn, à Borj Cedria. Le dispositif conçu comprend essentiellement (Fig. 6):

- Un échangeur en polyéthylène de longueur 25 m enterré au sol. Les caractéristiques de l'échangeur sont présentées sur le **tableau 1**.
- Une pompe à chaleur de type 'Clivet', capable de fournir une température comprise entre -12 °C et 50 °C.
- Un système de tuyauteries calorifugées, permettant de coupler la pompe à chaleur à l'échangeur enterré.
- Un débitmètre à flotteur, inséré dans le système pour mesurer le débit d'eau caloporteur à l'intérieur du circuit hydraulique.
- Un ensemble de thermocouples de types K, placés respectivement à l'entrée, à la sortie de l'échangeur enterré et dans le sol. Ces thermocouples sont connectés à une chaîne d'acquisition de type HP.

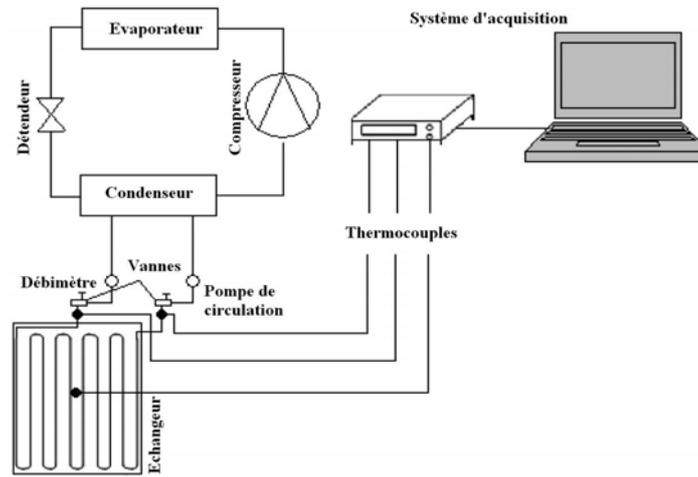


Fig. 6: Schéma du dispositif expérimental

Un test préliminaire a été effectué en vue de déterminer la profondeur optimale dans laquelle l'échangeur sera enterré. Ainsi, un réseau de 7 thermocouples de type K a été implanté dans le sol tous les 20 cm sur une profondeur de 1.2 m. Les valeurs moyennes de la température journalière sont représentées sur la figure 7.

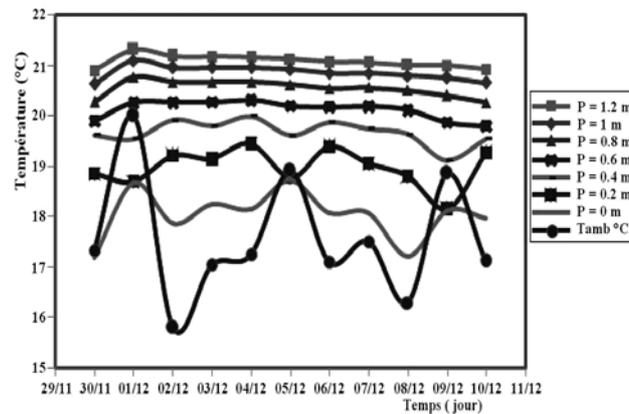


Fig. 7: Variation de la température en fonction de la profondeur

Le profil des températures dans le sol montre que les fluctuations des températures diminuent lorsque l'on s'éloigne de la surface du sol. En effet, à un mètre de profondeur, la température est presque constante, elle n'est pas affectée par le climat extérieur, ceci est dû à la grande inertie thermique du sol. Ainsi l'échangeur tubulaire est enterré à un mètre de profondeur.

L'approche expérimentale consiste à fixer les températures et le débit de l'eau à l'entrée de l'échangeur, à l'aide de la pompe à chaleur, ensuite suivre, à l'aide du système d'acquisition, l'évolution de la température à la sortie de l'échangeur. Une fois que la température à la sortie de l'échangeur se stabilise (régime permanent), on détermine la puissance thermique échangée.

Tableau 1: Caractéristique de l'échangeur

| | |
|---------------------------------|-------------------|
| Configuration | Horizontale |
| Matériau | Polyéthylène PEBD |
| Longueur (m) | 25 |
| Diamètre interne | 0.016 |
| Diamètre externe | 0.02 |
| Profondeur (m) | 1 |
| Distance entre tubes (m) | 0.3 |
| Conductivité thermique (W/m.°C) | 0.48 |

3.2 Résultats et discussions

Sur la figure 8, sont représentées les courbes de variation, analytiques et expérimentales, de la puissance échangée (Q_p), en fonction du débit d'eau caloporteur traversant l'échangeur tubulaire de longueur 25 m. Les résultats expérimentaux et analytiques montrent que la puissance thermique récupérée du sol à travers l'échangeur eau/sol dépend du débit de l'eau caloporteur traversant l'échangeur tubulaire.

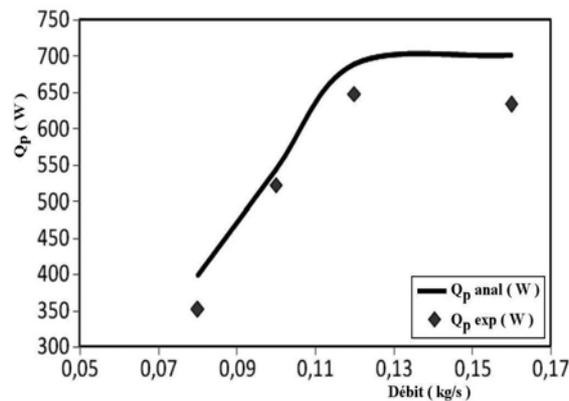


Fig. 8: Variation du flux récupéré du sol en fonction du débit pour $T_e = 35\text{ °C}$

Pour une longueur fixée, l'échangeur eau/sol atteint son efficacité maximale pour un débit de l'ordre de 0.12 kg/s. Toute augmentation du débit de l'eau caloporteur au delà de cette, n'affecte pas la puissance thermique extraite du sol.

Nous constatons une bonne concordance, de l'ordre de 7 %, entre les résultats du modèle analytique et les points expérimentaux. Cet écart est probablement dû à la complexité de l'échange thermique au niveau du sol, notamment les phénomènes de conductivité thermique et de diffusivité de la chaleur qui dépendent de l'humidité du sol.

Une autre campagne de mesures a été effectuée, elle consiste à régler les températures et le débit de l'eau à l'entrée de l'échangeur, de longueur 25 m, aux valeurs respectives 35 °C et 0.12 kg/s, ensuite suivre, l'évolution au cours du temps de la température à la sortie de l'échangeur. Les résultats de l'évolution de l'écart de

température à travers l'échangeur tubulaire enterré nous a permis de déterminer la puissance thermique échangée (Fig. 9).

La figure 9 montre que la quantité de chaleur fluctue autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 650 W.

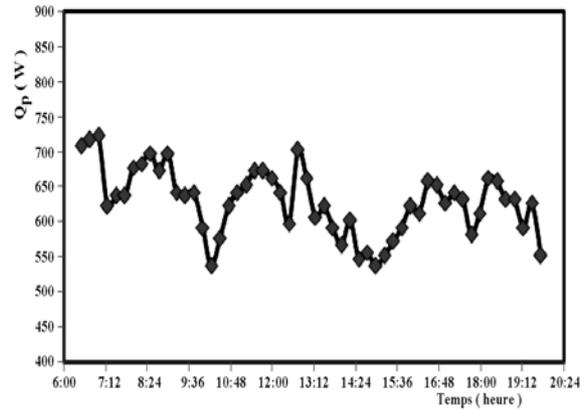


Fig. 9: Variation de la quantité de chaleur récupérée du sol en fonction du temps pour un débit 0.12 kg/s et une température d'entrée égale à 35 °C

4. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté une étude des performances d'un système de récupération de l'énergie thermique du sol utilisant un réseau d'échangeur de chaleur tubulaire en polyéthylène de 25 m de longueur et de $16 \cdot 10^{-3}$ m de diamètre interne enterré à un mètre de profondeur du sol. Au cours de cette étude, deux approches ont été suivies:

(i) une approche analytique qui nous a permis d'évaluer l'effet des paramètres de fonctionnement (débit caloporteur, pertes de charges, longueur et diamètre de l'échangeur) sur la puissance thermique, Q_p , récupérée du sol. Les résultats ont montré que Q_p , augmente en fonction du débit pour atteindre une valeur maximale de l'ordre de 700 W obtenue pour un débit optimal de l'ordre de 0,12 kg/s

L'utilisation de l'échangeur tubulaire avec un débit plus faible réduit notablement la puissance échangée de l'échangeur. L'étude analytique a aussi montré que, pour le débit optimal de l'eau caloporteur, 0.12 kg/s, la valeur maximale de l'énergie récupérée du sol dépend à la fois de la longueur et du diamètre de l'échangeur enterré.

Cependant il existe une valeur optimale de la longueur et du diamètre pour lesquelles l'énergie récupérée atteint la valeur maximale de 700 W avec les moindres pertes de charges possible.

(ii) une approche expérimentale a été menée au Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie, CRTEn, à Borj Cedria, vise, principalement, la validation des résultats du modèle analytique.

Les résultats de validation ont montré qu'il y a une bonne concordance, de l'ordre de 7 %, entre les résultats du modèle analytique et les points expérimentaux. Cet écart est probablement dû à la complexité de l'échange thermique au niveau du sol notamment

les phénomènes de conductivité thermique et de diffusivité de la chaleur qui dépendent de l'humidité du sol.

NOMENCLATURE

| | | | |
|-----------|---|------------|--|
| \dot{m} | Débit d'eau à l'intérieur du tube, kg/s | S_x | $2 \pi r x$ - Surface d'échange |
| C_p | Capacité thermique de l'eau, J/kgK | r | Rayon du tube de l'échangeur, |
| T_s | Température de l'eau à la sortie de l'échangeur, °C | Δp | Perte de charge, Pa |
| T_e | Température de l'eau à l'entrée de l'échangeur, °C | λ | Coefficient de pertes de charges linéiques |
| U | Coefficient d'échange global, W/m ² °C | ρ | Masse volumique de l'eau, kg/m ³ |
| T_0 | Température du sol au voisinage de l'échangeur, °C | ξ | Coefficient de pertes de charges singulières |
| T_f | Température de l'eau à la section d'abscisse x , °C | δ^0 | Angle d'inclinaison du coude |
| Re | Nombre de Reynolds | D | Diamètre interne du tube, m |
| L | Longueur du tube, m | D_H | Diamètre hydraulique |

REFERENCES

- [1] P. Hollmuler, B. Lachal et C. Soutter, '*Serre avec Stockage de Chaleur par Tubes Enterrés: Analyse Energétique*', Rapport Interne, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Université de Genève, 2000.
- [2] M. De Paepe and N. Willems, '*3D Unstructured Modelling Technique for Ground-Coupled Air Heat Exchanger*', Proceedings of Clima 2000, World Congress, Napoli, Italy, pp. 15 – 18, 2001.
- [3] H.H. Öztürk and A. Bascetincelik, '*Energy and Exergy Efficiency of a Packed-bed Heat Storage Unit for Greenhouse Heating*', Biosystems Engineering, Vol. 86, N°2, pp. 231 – 245, 2003.
- [4] M. Hazami, '*Etude Expérimentale et Numérique du Phénomène de Stockage et de Déstockage de l'Energie Thermique en Utilisant un Echangeur Capillaire en Polypropylène*', Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences, Tunis, 2008.
- [5] G. Florides and S. Kalogirou, '*Ground Heat Exchangers - A Review of Systems, Models and Applications*', Renewable Energy, Vol. 32, N°15, pp. 2461 – 2478, 2007
- [6] A.M. Omer, '*Ground-Source Heat Pumps Systems and Applications*', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, N°2, pp. 344 – 371, 2008.
- [7] A. Omera et S. Aboudi, '*Influence des Propriétés Physiques et Géométries sur le Comportement Dynamique d'un Echangeur de Chaleur de Géométrie Cylindrique Soumis à Différentes Conditions de Flux: Applications au Problème d'une Ailette*', JITH'99, 9^{ème} Journées Internationales de Thermique, Belgique, 1999.

- [8] G. Mihalakakou, J.O. Lewis and M. Santamouris, '*On the Heating Potential of Buried Pipes Techniques - Application In Ireland*', Energy and Buildings, Vol. 24, N°1, pp. 19 - 25, 1996.
- [9] H. Esen, M. Inalli, M. Esen and K. Pihtili, '*Energy and Exergy Analysis of a Ground-Coupled Heat Pump System With Two Horizontal Ground Heat Exchangers*', Building and Environment, Vol. 42, N°10, pp. 3606 - 3615, 2007.
- [10] H. Esen, M. Inalli and M. Esen, '*A Techno-Economic Comparison of Ground-Coupled and Air-Coupled Heat Pump System for Space Cooling*', Building and Environment, Vol. 42, N°5, pp. 1955 - 1965, 2007.
- [11] A. Haught and M.S. Englemann, '*Numerical and Experimental Simulation for Airflow and Heating in Tube Fin Heat Exchanger*', Heat Transfer in Gas Turbine Engines and Three Dimensional Flows HTD-Vol. 103, pp. 107 - 113, 1988.
- [12] K. Ttorikoshi, G. Xi, Y. Nakazawa and H. Asano, '*Flow and Heat Transfer Performance of Plate Fin and Tube Heat Exchanger, First Report; Effect of Fin Pitch*', Proceedings of the Tenth International Heat Transfer Conference, pp. 411 - 416, 1997.
- [13] A. Batasani, M. Feibig et N. K. Mitra, '*Numerical studies of a compact fin tube heat exchanger - Design and Operation of Heat Exchangers*', Springer-Verlag, pp 154-163, Berlin, 1992,
- [14] I.E. Idel'Cik, '*Mémento des Pertes de Charges: Coefficients de Pertes de Charges Singulières et des Pertes de Charge par Frottement*', Traduit par M. Meury, Editions Eyrolles, Saint-Germain, Paris, 496 p., 1986.
- [15] L. Zella et D. Smadhi, '*L'Intérêt du Calcul des Pertes de Charge en Micro Irrigation*', Larhyss Journal, N°4, pp. 51 - 68, Juin 2005.