

# Echangeur Géothermique de Type Panier Intégré dans Un Système Energétique Sous Le Climat Tunisien

Hassen Boughanmi <sup>#1</sup>, Mariem Lazaar<sup>#2</sup>, Abdelhamid Farhat <sup>#3</sup>

<sup>#</sup>Laboratoire des Procédés Thermiques (LPT),  
Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie (CRTE),  
BP 95 Hammam Lif 2050, Tél: 21 643 621 /Fax: 79 325 934

<sup>1</sup> boughanmihassen@hotmail.fr

**Abstract**— Le système de corbeille géothermique est une nouvelle technologie d'échangeurs enroulés sous forme conique utilisée afin d'exploiter le potentiel thermique du sol pour le chauffage et le refroidissement des locaux et des serres.

Au sein du Laboratoire des Procédés Thermiques du Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie de Borj Cédria, un système géothermal de conditionnement de serre agricole a été installé.

Ce système est constitué d'un échangeur en polyéthylène de type corbeille enterré à 3 m de profondeur dans un puits de diamètre 150 cm, d'une serre de type Chapel de superficie 3 m<sup>2</sup> et d'une pompe à chaleur réversible eau/eau de puissance frigorifique 16 kW.

L'objectif de cette étude est d'optimiser les échanges thermiques entre ce type de capteur et le sol, d'évaluer l'impact de différents paramètres (géométrie, matériaux...) et de valoriser le système entier (échangeur enterré sous forme conique, pompe à chaleur géothermique et serre agricole), notamment dans l'exploitation des dynamiques de charge et de décharge et de tester l'efficacité de cet échangeur pour différentes profondeurs.

Les résultats ont montré que l'écart de température entre l'entrée et la sortie de la corbeille en cycle de refroidissement durant 6 heures, peut atteindre 30°C. Quant à la puissance maximale récupérée par cette corbeille, elle atteint 8 kW.

**Keywords**— Pompe à chaleur géothermique, échangeurs eau/sol sous forme corbeille conique, température du sol, serre

## I. INTRODUCTION

Le sol est considéré comme 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 enterrés.

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.) Nelli et Esen (2003) [1] ont testé expérimentalement une Pompe à chaleur à système géothermique couplé à des capteurs horizontaux enterrés dans le sol pour étudier les effets de différents paramètres (profondeur, débit,...). E.Kondili et al [2] ont étudié une

application prometteuse présentant l'utilisation de l'énergie géothermique pour le chauffage de serres agricoles.

Huseyin Benli et Aydın Durmus [3] en 2011 ont développé un système de pompe à chaleur géothermique muni d'un stockage de chaleur latent (matériau à changement de phase) pour le contrôle de la température de l'air sous serre.

Huseyin Benli et Aydın Durmus [4] en 2013 ont démontré la praticabilité technique et ils ont présenté une conception d'employer des systèmes de pompe à chaleur géothermiques dans les applications douces de climat pour faire chauffer une serre.

Onder Ozgener et Arif Hepbasli [5] en 2005 ont étudié un système constitué d'une pompe à chaleur géothermique couplée à un capteur solaire et ils l'ont utilisé pour le refroidissement à une base de 22°C. Ahmet.Y et al [6] ont développé un système contenant un échangeur de chaleur sol-air (EAHE) pour le refroidissement d'une serre agricole.

Hollmuller et al., 2000, [7] 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.

## II. CONCEPTION DE LA CORBEILLE GEOTHERMALE

Ce nouveau échangeur sous forme de corbeille conique spirale fonctionne avec le même principe que l'échangeur horizontal et vertical. Cette nouvelle géométrie présente un certain nombre d'avantages. Il nous permet de faire une économie au niveau de la surface (comparé à un échangeur horizontal et au niveau de la profondeur (comparé à un échangeur vertical) En effet, pour qu'il y ait un échange thermique avec le sous-sol moyennant cette nouvelle géométrie de l'échangeur, nous n'avons pas à dépasser une superficie de 10 m<sup>2</sup> et une profondeur de 8 m. Une réduction du coût de la perforation du terrain qui représente environ 50% du coût total d'une installation géothermique est ainsi réalisée. D'autre part, sa géométrie en forme de spire conique permet d'assurer le maximum d'échange thermique entre le sol

et le fluide circulant dans l'échangeur et par la suite d'augmenter le coefficient de performance du système tout entier.

La corbeille géothermique, installée au Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie (CRTE) à une profondeur de 3 m. (figure 1) et les caractéristiques de l'échangeur sont présentées sur le Tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques de la corbeille

|                                |                   |
|--------------------------------|-------------------|
| Configuration                  | verticale         |
| Profondeur (m)                 | 3                 |
| Matériau                       | Polyéthylène PEHD |
| Conductivité thermique (W/m.K) | 0,48              |
| Longueur (m)                   | 100               |
| Diamètre externe (m)           | 0.025             |
| Epaisseur (m)                  | 0.0023            |
| Pas d'enroulement (m)          | 0.08              |



Fig. Réalisation de l'échangeur sous forme corbeille

### III. ETUDE ANALYTIQUE ET ENERGETIQUE

#### III.1.ETUDE ANALYTIQUE

Dans cette étude, nous considérons que la corbeille est élaborée comme une conduite cylindrique (fig.2), l'échange thermique se fait en régime stationnaire et le sol est considéré homogène.

Les caractéristiques de l'eau et du sol (masse volumique, conductivité thermique, chaleur massique...) sont considérées constantes.

Les transferts des chaleurs ne s'effectuent que par conduction (car il ne tient pas compte de la circulation de fluide dans le sol).

Le flux de chaleur local est échangé à travers l'élément de surface d'échange  $ds$  et de l'élément de longueur  $dz$  du cylindre. Il s'écrit comme suit :

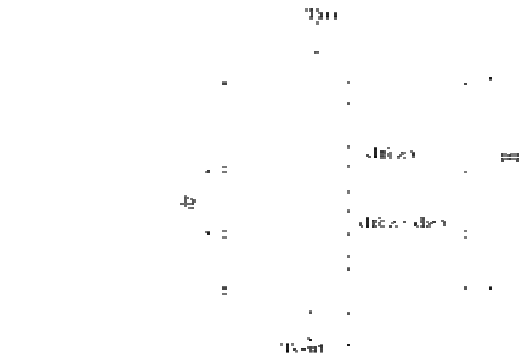


Fig 2 Tranche de l'échangeur eau/sol placé dans le sol

$$dQ = U(T_{sol} - T_s)ds \quad (1)$$

$$dQ = \dot{m} c_p dT_{out} = \dot{m} C_p (T_{out}(z + dz) - T_{out}(z))$$

On suppose qu'on n'a pas de changement de phase,

$$dQ = \dot{m} C_p dT_s \quad (2)$$

En égalisant les expressions (1) et (2)

$$dQ = U(T_{sol} - T_s)ds = \dot{m} C_p dT_s \quad (3)$$

$$\frac{dT_s}{T_{sol} - T_s} = \frac{U}{\dot{m} C_p} ds \quad (4)$$

$$-\frac{dT_s}{T_s - T_{sol}} = \frac{U}{\dot{m} C_p} ds \quad (5)$$

Et par intégration de l'expression (5) de  $T_e$  à  $T_s$  de l'eau

$$\int_{T_e}^{T_s} \frac{dT_s}{T_s - T_{sol}} = -\frac{U}{\dot{m} C_p} \int_0^z ds \quad (6)$$

$$\ln[(T_s - T_{sol})]_{T_e}^{T_s} = -\frac{U}{\dot{m} C_p} ds \quad (7)$$

$$\ln \frac{T_s - T_{sol}}{T_e - T_{sol}} = -\frac{U}{\dot{m} C_p} ds \quad (8)$$

$$\frac{T_s - T_{sol}}{T_e - T_{sol}} = \exp\left(-\frac{U}{m\dot{C}_p} ds\right) \quad (9)$$

D'où, la température de sortie à l'échangeur

$$T_s = (T_e - T_{sol}) \exp\left(-\frac{h}{m\dot{C}_p} S\right) + T_{sol} \quad (10)$$

Avec le coefficient d'échange convectif est donné par [8] ;

$$h = \frac{kN_u}{er}$$

$$N_u = 0.023R_e^{0.8} P_r^n$$

$$n=0,3 \quad \text{si } T_f > T_{sol}$$

$$\text{Ou bien } n=0,4 \quad \text{si } T_f < T_{sol}$$

$$P_r = \frac{C_p \mu}{\lambda}$$

$$R_e = \frac{\rho U_m D}{\mu}$$

Pour  $R_e > 5000$  et  $0.6 < P_r < 100$

la résistance thermique du fluide est  $R_f = \frac{1}{2\pi rh}$

### III.2. ANALYSE ENERGÉTIQUE

La quantité de chaleur extraite par l'échangeur de chaleur enterré  $Q_{GHE}$  s'écrit comme suit :

$$Q_{GHE} = \dot{m} C_p (T_{out,s} - T_{in,s})$$

### IV. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Une étude expérimentale a été menée au Centre de Recherches et des Technologies de l'Énergie, CRTEn, à Borj Cedria. (fig.3). Le dispositif conçu comprend essentiellement

- une serre chapelle en polycarbonate de superficie 3 m<sup>2</sup> (1.5 m de largeur, 2.5 m de longueur et 2 m de hauteur)
- deux échangeurs géothermiques sous forme de corbeilles en polyéthylène haute densité PEHD de longueur 100 m et dans lequel l'eau circule avec un débit de 0.08 kg/s.
- Une pompe à chaleur géothermale réversible eau/eau de Puissance frigorifique 16 kW et de Puissance calorifique 16 kW

- Un débitmètre à flotteur, inséré dans le système pour mesurer le débit d'eau caloporteur à l'entrée de la corbeille
- Un ensemble de thermocouples de types K, placés respectivement à l'entrée, à la sortie de la corbeille et dans le sol avec un espacement entre eux de 50 cm. Ces thermocouples sont connectés à une chaîne d'acquisition de type HP.

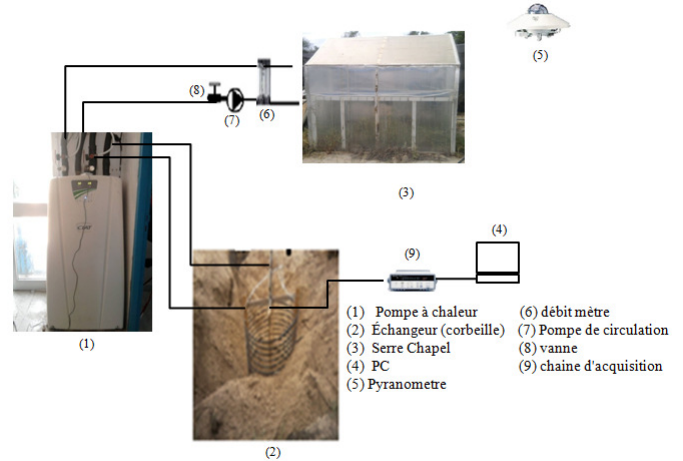


Fig 3 Dispositif expérimental

### V. RESULTAT

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 50 cm sur une profondeur de 3 m. Les valeurs moyennes de la température journalière sont représentées sur la figure 4. 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 3 m de profondeur, la température est presque constante. Elle est de l'ordre 20°C. Elle n'est pas affectée par le climat extérieur, ceci est dû à la grande inertie thermique du sol.

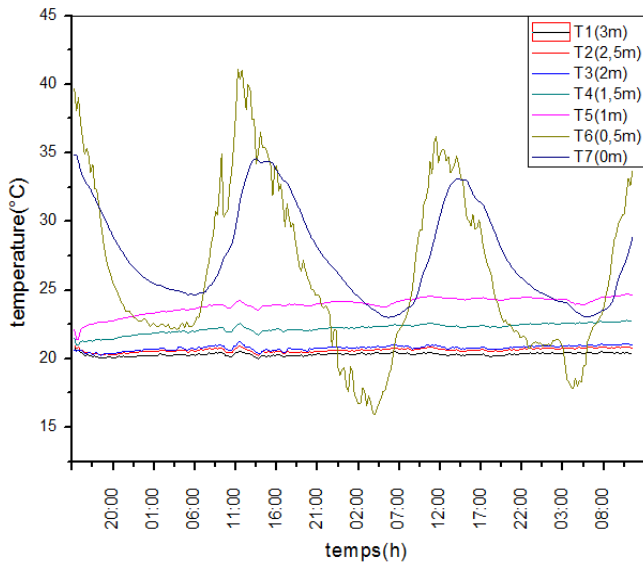


Fig 4 Evolution de la température du sol à différentes profondeurs

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 géothermale 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), nous déterminons la puissance thermique échangée.

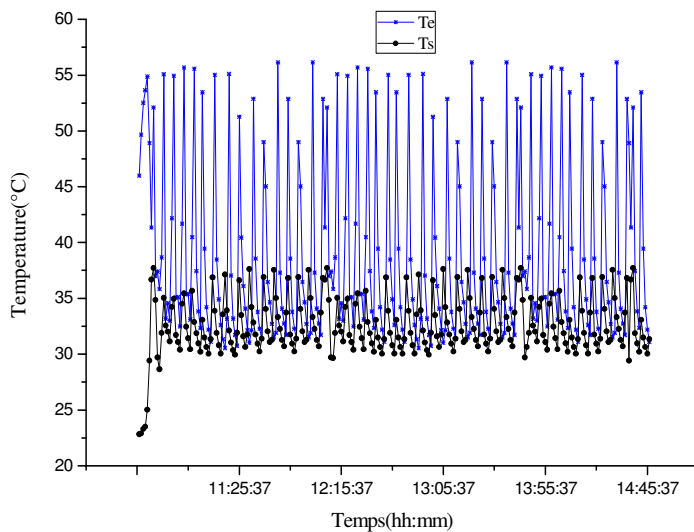


Fig 5 Variation expérimentale de la température d'entrée et de sortie du fluide en fonction du temps pour un débit du fluide de 0.08kg/s

La température d'entrée de l'échangeur enterré (Te) atteint une valeur maximale de 55°C, qui correspond à la température du condenseur de la PACG. Tandis que la température de sortie de l'échangeur enterré (Ts) atteint une valeur de 30°C. Le gain en termes de différence de température obtenu est de

l'ordre de 25°C, ce qui reflète l'importance de la dissipation de l'énergie dans le sol.

La validation du modèle analytique est limitée à l'efficacité énergétique pour l'échangeur de forme conique de longueur 100 m enterré à 3 m de profondeur.

D'après le fig. 6 la variation analytique suit la même tendance que celle mesurées avec un accord acceptable, de l'ordre de 3%.

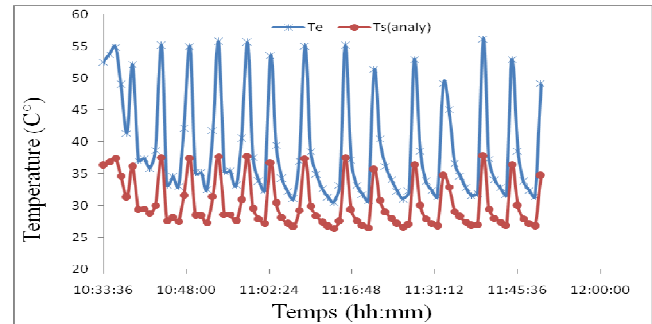


Fig 6 Variation analytique de la température d'entrée et de sortie du fluide en fonction du temps pour un débit du fluide de 0.08kg/s

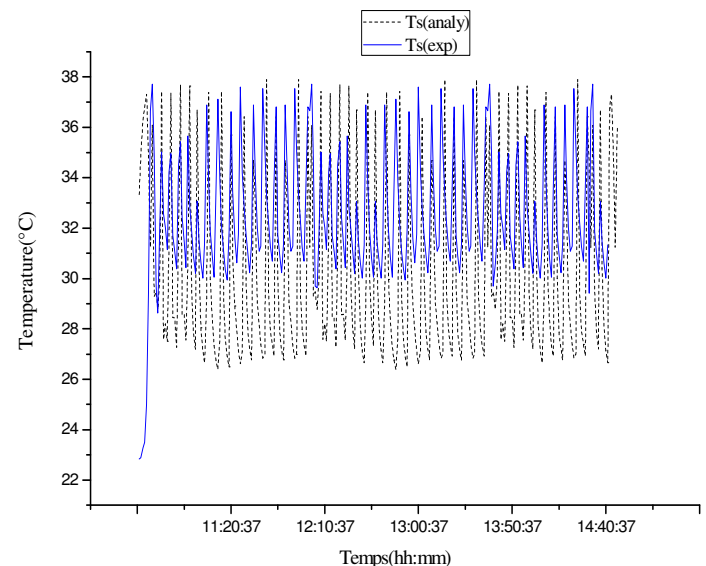


Fig 7 Evolution analytique et expérimentale des températures de sortie du fluide en fonction du temps pour différentes températures d'entrée et pour un débit de 0.08kg/s

La figure 7 représente les températures mesurée et celle calculée théoriquement à la sortie de la corbeille. La valeur moyenne de la température mesurée est de 34°C alors que celle de la température calculée est de 32°C. L'écart entre les deux températures moyennes est de 2°C. Cet écart revient à la perte au niveau du collecteur et la corbeille. Nous enregistrons par la suite une concordance acceptable entre les valeurs de températures expérimentales et celle analytiques de l'ordre de 6%.

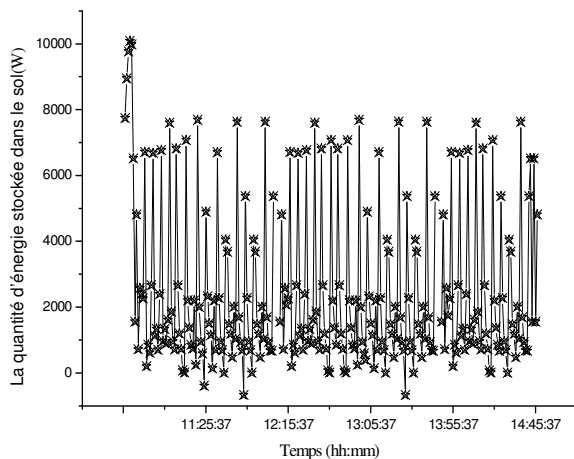


Fig 8 Variation de la quantité de chaleur récupérée du sol en fonction du temps pour un débit 0.08kg/s

La figure 8 montre que la quantité de chaleur maximale récupérée du sol (par le système d'échangeur sous forme corbeille) en fonction du temps avec un débit 0.08kg/s est de l'ordre de 8 kW. La valeur moyenne de cette quantité de chaleur est de 4 kW.

## VI. CONCLUSION

Le potentiel géothermique de surface en Tunisie est très important. En effet, la valeur moyenne de la température du sol mesurée dans le site de Borj Cédria, à environ 3 m de profondeur, est de l'ordre de 20°C en été.

L'exploitation de la géothermie de surface nécessite, généralement, l'utilisation d'une pompe à chaleur géothermale (PACG).

Un nouveau type d'échangeurs thermiques sous forme de corbeille conique a été conçu réalisé et installé dans le sol à une profondeur de 3 m et couplé à une Pompe à chaleur géothermale de puissance frigorifique 16 kW pour refroidir une serre chappel de superficie 3 m<sup>2</sup>.

Les résultats ont montré que l'écart de température entre l'entrée et la sortie de la corbeille en cycle de refroidissement pendant 6 heures peut atteindre 30°C et la puissance maximale peut atteindre une valeur maximale de 8 kW et une valeur moyenne de 4 kW.

Les résultats analytiques ont été comparés aux résultats expérimentaux; Une concordance acceptable a été remarquée. (une incertitude entre 3% et 5%).

## NOMENCLATURE

L : longueur réelle d'échangeur (m)  
 l : longueur latéral de corbeille (m)  
 D : diamètre intérieur du tuyau (m)  
 d : profondeur (m)  
 r : rayon de la petite base de corbeille (m)  
 R : rayon de la grande base de corbeille (m)

H: hauteur de la corbeille (m)

S: surface d'échangeur (m<sup>2</sup>)

T: température (K)

$\dot{m}$  : Débit massique (kg/s)

$R_{PE}$  : Resistance thermique (m<sup>2</sup>K/W)

$\delta$  : Épaisseur du sol (m)

$q''$  : Flux thermique (kW/m<sup>2</sup>)

Cp : capacité thermique de l'eau, (J/.kg.K).

h : coefficient d'échange convectif

Q: Quantité de chaleur (W)

U: coefficient global de transfert thermique (W/m<sup>2</sup>.K)

Nu : Nombre de Nusselt

Pr : Nombre de Prandtl

Re : Nombre de Reynolds

## Letters Greek

$\rho$  : Densité thermique, (kg/ m<sup>3</sup>)

$\lambda$  : Conductivité thermique, (W/mK.)

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

## Suscrits

e:entrée

s: sortie

f: fluide

sol: sol

## Abréviations

LMTD : Différence moyenne de la température (K)

PACG : Pompe à chaleur géothermale

PEHD : polyéthylène haute densité

## REFERENCES

- [1] M.Nalli and H.Ersen, Experimental Thermal Performance Evaluation of Horizontal Ground-Source Heat Pump System, July 2003
- [2] E.Kondili,J.K. Kaldellis, Optimal design of geothermal-solar greenhouses for the minimisation of fossil fuel consumption,Applied Thermal Engineering 26 (2006) 905-915
- [3] Hüseyin Benli, Energetic performance analysis of a ground-source heat pump system with latent heat storage for a greenhouse heating, Energy Conversion and Management 52 (2011) 581-589
- [4] Hüseyin Benli, A performance comparison between a horizontal source and a vertical source heat pump systems for a greenhouse heating in the mild climate Elazi g, Turkey, Applied Thermal Engineering 50 (2013) 197-206.
- [5] O. Ozgener, A. Hepbasli, Performance analysis of a solar-assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating an experimental study, Building and Environment Vol. 40, pp.1040-1050, 2005
- [6] Ahmet Yıldız, Onder Ozgener, Leyla Ozgener, Energetic performance analysis of a solar photovoltaic cell (PV) assisted closed loop earth-to-air heat exchanger for solar greenhouse cooling, Renewable Energy 44 (2012) 281-287
- [7] 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.
- [8] Yves Jannot, transfert thermique,2011