

# Etude Theorique et Experimentale d'un Echangeur Air/Sol Enterre Destine au Rafrachissement des Locaux

N.Hatraf, N.Moummi, A.Brima, A.Moummi, S.Youcef. Ali

**Résumé :** Cette étude s'intéresse à un échangeur air/sol dit puits canadien. A travers la modélisation et l'expérimentation, nous essayons d'évaluer les performances d'un tel échangeur. Il s'agit de voir l'influence des propriétés du sol, du site et de la nature du conduit sur l'évolution de la température de l'air le long de l'échangeur puis celle obtenue à la sortie qui pourra être exploitée. L'écart avec la température extérieure détermine les possibilités offertes à la technique du rafraîchissement par la géothermie pour être utilisée dans les sites de climats variés en Algérie

**Mots clés :** énergies renouvelables, rafraîchissement, échangeur air/sol, géothermie.

## I INTRODUCTION

Dans cette étude on s'intéresse à la valorisation des énergies renouvelables en général et au rafraîchissement par la géothermie, une technique qui est jusqu'à présent non exploitée dans notre pays. Cette technique a pour support technique un échangeur air/sol enterré dit puits canadien. La température du sol influe principalement sur les performances d'un tel échangeur du fait que le sol, à une certaine profondeur devient le facteur primordial pour les échanges thermiques entre l'air qui circule à l'intérieur de l'échangeur et le milieu qui l'entoure. Dans ce travail, on a mené en premier lieu, une étude théorique pour l'établissement d'un modèle qui traduit le mieux l'évolution de la température du sol, depuis la surface jusqu'à une profondeur optimale qu'on déterminera. Cette profondeur qui dépend des contextes géographiques et climatique servira de base pour le dimensionnement d'un tel système pour qu'il puisse être exploité. En deuxième étape, nous exposons les résultats issus d'une série de mesures que nous avons menées. L'objectif principal des études que nous menons au laboratoire de génie mécanique de l'université de Biskra est de mettre en évidence l'impact que joue l'utilisation de ces énergies sur l'économie nationale pour la mise en place d'un programme de recherche dans ce domaine, permettant également d'établir une démarche globale de maîtrise de l'énergie par la valorisation des énergies nouvelles et renouvelables en Algérie.

## II ETUDE THEORIQUE

A Modélisation de la température du sol :

En général le sol est considéré comme un massif semi infini. L'échange thermique par conduction de sa surface vers l'intérieur est gouverné par l'équation générale de la conduction.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q'}{\rho c} \quad (1)$$

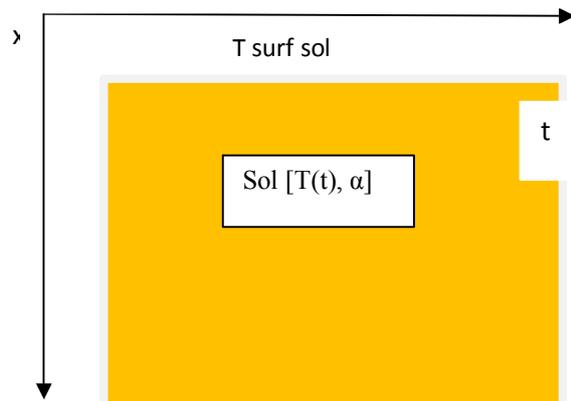


Fig.1 : Schéma du domaine étudié (sol)

La température de la surface du sol donnée par [1] s'écrit comme suit :

$$T(x,0) = \frac{(1-\alpha_{sol})G + h_r T_{amb} + (h_r - h_e) \frac{b_{max}}{24h}}{h_e} \quad (2)$$

Pour un transfert unidimensionnel suivant l'axe des x,  $\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} = 0$  et sans source interne  $Q' = 0$  l'équation (1) se simplifie pour être écrite sous la forme :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

Avec:  $\alpha = \frac{k}{\rho c}$

La condition initiale spatiale s'écrit sous la forme [8] :

$$T(0,t) = T_0 \cos \omega t + T_1$$

Avec:  $T_0 = \frac{T_{max} - T_{min}}{2}$  et

$$T_i = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

La température initiale temporelle s'écrit :

$$T(x, 0) = \frac{(1 - \alpha_{sol}) \cdot G + h_r \cdot T_{amb} + (h_r - h_e) \frac{D_{air}}{\lambda}}{h_e}$$

Appliquons le changement de variable  $\theta = T - T_i$ , l'équation (3) devient :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

Avec :  $T(\infty, t) = T_i$ ,  $\theta(0, t) = T_0 \cdot \cos \omega t$  et  $\theta(\infty, t) = 0$

La solution de ce type d'équation est de la forme :

$\theta = X(x) \cdot Y(t)$  que nous remplaçons dans l'équation [4] on aura par conséquent :

$$X''(x) \cdot Y(t) = \frac{1}{\alpha} Y'(t) \cdot X(x) \text{ qui s'écrit : } \frac{X''(x)}{X(x)} = \frac{1}{\alpha} \frac{Y'(t)}{Y(t)}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{X''(x)}{X(x)} = \delta \\ \frac{Y'(t)}{\alpha Y(t)} = \delta \end{cases} \quad \text{Ou} \quad \begin{cases} \frac{\alpha X''(x)}{X(x)} = \beta \\ \frac{Y'(t)}{Y(t)} = \beta \end{cases}$$

Le choix de la constante ( $\delta$ ) ou ( $\beta$ ) se fait à partir de considérations physiques [7]:

-Pour les processus thermiques tendant vers une distribution de température constante à l'équilibre on choisit  $\delta$  qui doit être nécessairement négative. En effet l'intégration par rapport au temps fournit :  $Y(t) = R \cdot \exp(\alpha \cdot \delta \cdot t)$ , où  $R = cste$ . Si  $\delta$  était positive, pour les temps croissants, la température tendrait vers une valeur infinie, ce qui est physiquement absurde

Posons  $\delta = -k^2$  on aura :  $Y(t) = R \cdot \exp(-\alpha \cdot k^2 \cdot t)$

- Si le phénomène est de nature périodique en fonction du temps, on prend alors  $\beta$  au lieu de  $\delta$ . En effet en posant  $\beta = i\omega$ , on obtient la solution de la forme :

$$Y(t) = R \cdot \exp(i\omega t) = R \cdot (\cos \omega t + i \sin \omega t)$$

On peut résoudre alors le problème dans le plan complexe et on ne retiendra que la partie réelle de la solution obtenue.

L'excitation étant de nature périodique. En effet la température de surface est en fonction de la température ambiante et en fonction du rayonnement incident qui sont des fonctions périodiques. On doit chercher une solution de même fréquence que l'excitation en posant :  $C = i\omega = \beta$

$$\text{On obtient : } Y' - CY = 0 \Rightarrow \frac{dY}{dt} - CY = 0$$

$$\alpha X'' - CX = 0 \Rightarrow X'' - \frac{C}{\alpha} X = 0 \Rightarrow X(x) = A' \exp \sqrt{\frac{C}{\alpha}} x + B \cdot \exp - \sqrt{\frac{C}{\alpha}} x$$

Comme  $X(x)$  doit tendre vers une limite finie quand  $x$  tend vers l'infini  $x \rightarrow \infty \Rightarrow A' \rightarrow 0$

On aura :  $X(x) = B \cdot \exp - \left( \sqrt{\frac{C}{\alpha}} \right) x$  et comme

$\sqrt{C} = \sqrt{i\omega}$  on aura :

$$\text{Réel}[X(x) \cdot Y(t)] = \text{Réel} \left[ A \cdot B \cdot e^{-i\omega t} \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}(x+i\pi)} \right]$$

$$\theta(0, t) = T_0 \cos \omega t = \text{Réel}[A \cdot B \cdot (\cos \omega t + i \sin \omega t)]$$

$$\Rightarrow AB = T_0$$

$$\theta(x, t) = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \left[ e^{i\omega t} \cdot e^{-i \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \right]$$

$$\theta(x, t) = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \left[ \cos \omega t + i \sin \omega t \left( \cos \left( -\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x \right) + i \sin \left( -\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x \right) \right) \right]$$

Comme la fonction cosinus est paire et la fonction sinus est impaire alors :

$$\theta(x, t) = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \left[ \cos \omega t \cos \left( \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x \right) - \cos \omega t \left( \frac{\pi}{2} \right) + \sin \omega t \cos \left( \frac{\pi}{2} \right) - \sin \omega t \left( \frac{\pi}{2} \right) \right]$$

Alors :

$$\theta(x, t) = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \left[ \cos \omega t \cos \left( \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x \right) + \sin \omega t \sin \left( \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x \right) \right]$$

Si on ne considère que la partie réelle, l'expression aura comme forme :

$$\theta(x, t) = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \left[ \cos \left( \omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x \right) \right],$$

Par conséquent la distribution de la température s'écrit :

$$T = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \left[ \cos \left( \omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x \right) \right] + T_i \quad (5)$$

B Simulation du modèle obtenu :

L'expression (5) obtenue, permet de suivre en fonction de la profondeur (x) et en fonction du temps la variation de la température du sol, depuis sa surface jusqu'à une profondeur optimale déduite ici à travers l'examen des courbes qui suivent :

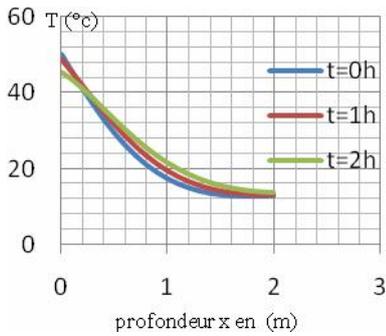


Fig. 2. Distribution spatiale et temporelle de la température du sol

Il est à noter que quelque soit la variation du temps, la température du sol tend vers une température minimale qui correspond à une profondeur dans le sol équivalent à 2 m à partir de laquelle on peut placer l'échangeur. Cette profondeur dépend principalement de la nature du sol et aussi des conditions climatiques.

### III ETUDE EXPERIMENTALE

Dans cette étude on a mené une démarche expérimentale en vue de suivre l'évolution de la température de l'air dans un échangeur enterré à une profondeur de 3 m dans le sol. En réalité on a installé deux échangeurs dont l'un est placé à 2 m mais qui n'a pas été testé.

#### A Dispositif expérimental

Le banc des essais expérimentaux a été monté sur site à l'université de Biskra. Il s'agit d'un réseau de 04 traçons d'une longueur totale d'environ 60 m. Le diamètre interne du tube est de 110 mm. L'ensemble est placé à une profondeur de 3m sous une pente de 2% [3]. Les tubes sont disposés et espacés les uns des autres d'une distance entre axes de 02 m. Un. Une fosse de réception en béton est construite à la sortie de l'échangeur. Un extracteur d'air de débit variable est placé à l'entrée de l'échangeur. Une série de sondes thermiques a été placées le long de l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie. Les sondes sont reliées à une centrale d'acquisition. Les tests exposés sont effectués le 28 juin 2009.

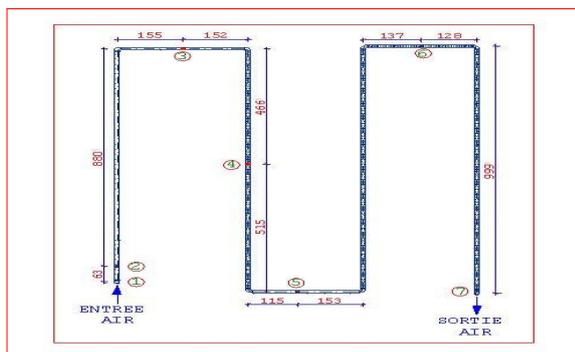


Fig. 3. Schéma de l'échangeur

#### B Résultats obtenus

Les résultats expérimentaux issus des mesures effectués sont montrés sur les figures ci-dessous. On remarque une chute de la température de l'air de l'entrée jusqu'à la sortie. Il est à noter un écart important entre la température de l'air dans l'échangeur et celle de l'air extérieur. Cet écart diminue progressivement. En effet la température de l'air tend vers la température du sol. La plus grande chute de la température de l'air depuis l'entrée de l'échangeur se situe à une longueur de 30 m. A partir de cette valeur la température de l'air diminue progressivement.

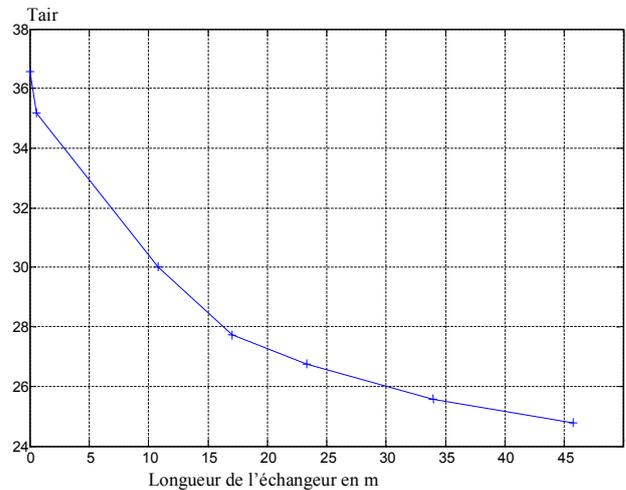


Fig. 4. Variation de la température de l'air - Débit 130 m<sup>3</sup>/h

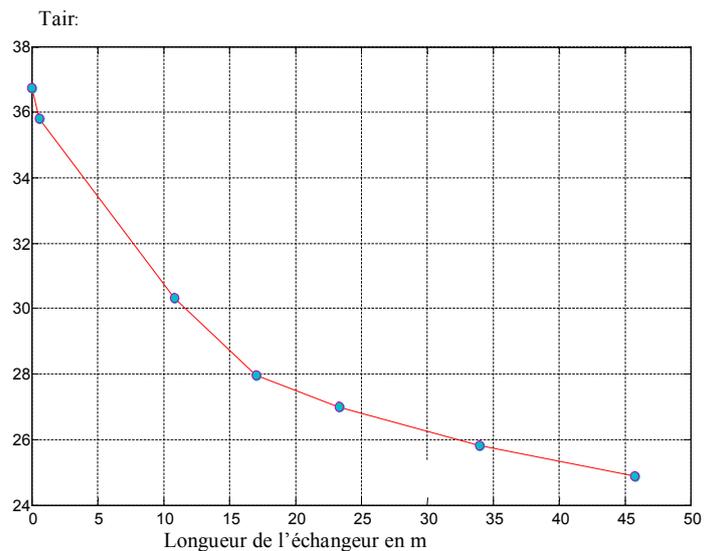


Fig. 5. Variation de la température de l'air - Débit 135,65 m<sup>3</sup>/h

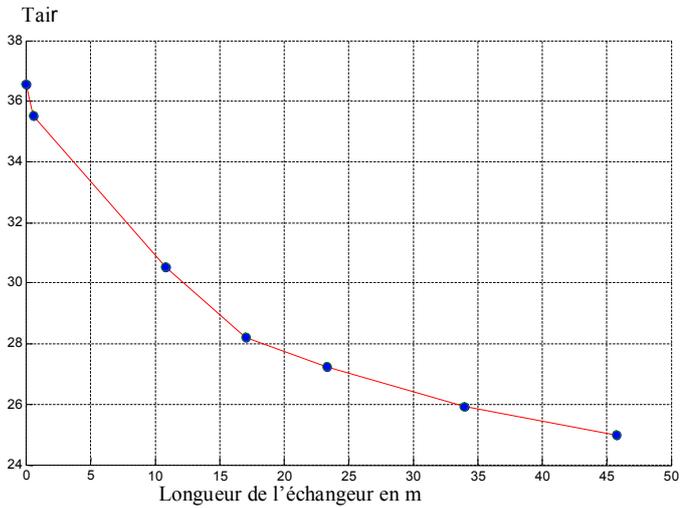


Fig. 6. Variation de la température de l'air- Débit 155.43 m<sup>3</sup>/h

#### IV CONCLUSION

Cette étude nous a permis de simuler un modèle qui traduit l'évolution de la température du sol en fonction des paramètres principaux. Ce modèle pourra servir en absence de données expérimentales pour dimensionner un échangeur air/sol. Il nous a permis également d'adopter une profondeur de 2 m à partir de laquelle on peut installer ce type d'échangeur pour bénéficier du rafraîchissement grâce à l'inertie du sol. La longueur de l'échangeur doit être suffisamment longue pour favoriser l'échange thermique. La valeur de 30 m est retenue dans cette étude pour profiter d'une chute suffisante. L'étape suivante consistera à établir des modèles qui traduisent l'évolution de la température de l'air dans l'échangeur en fonction des différents paramètres structurels conceptuels et d'utilisation qu'on comparera aux résultats expérimentaux.

#### NOMENCLATURE

Définition et unité	
Symbole	
	Capacité calorifique du sol [J/kg.K]
c	
f	Fraction qui dépend de la nature du sol Rayonnement solaire[W/m <sup>2</sup> ]
G	
	Conductivité thermique du sol [W/m.K]
K	
	Humidité relative du sol
ra	

t	Temps
T	Température (°C)
Tsurf sol	Température de la surface du sol
v	Vitesse du vent (m/s)
X	Profondeur du sol (m) Diffusivité du sol[m <sup>2</sup> /s]
α	
ω= 2π/Δt	Pulsation

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- S. Thiers, B. Peuportier, "Modélisation thermique d'un Echangeur Air-sol pour le rafraîchissement des bâtiments", Article présenté au Centre Énergétique et Procédés, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France 2007
- [1] P. Hollumer, "Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique", Thèse de Doctorat, Université de Genève, 2002.
  - [2] TS. Izuba; S.Thiers , S. Y. Jautard, "Dimensionnement du « puits climatique », analyse, modélisation, validation d'un modèle de simulation dynamique pour les puits « canadiens » ou « provençaux » ", Rapport présenté à l'INSA de Toulouse en 2003
  - [3] D. Bartolomeu, " Performances d'un échangeur thermique de type air-sol", 2005
  - [4] D. Amitrano, " Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit « puits canadien » ", Article présenté à l'Université J. Fourier, Grenoble en 2006
  - [5] M.M. Salah El-Din, "On the heat Flow into the ground", Department of Mechanical Engineering, College of Engineering and Islamic Architecture, Umm Al-Qura
  - [6] . F. Sacadura, " Initiation aux transferts thermiques", Technique et documentation, Lyon.
  - [7] Y N.Moumami, A. Moumami, K. Aoues, C. Mahboub, S. Youcef Ali , "Systematic forecasts of solar collector's performance in various sites of different climates in Algeria". International journal of sustainable energy, Vol 29 N 3 pp 142 – 150, Septembre 2010