



Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables  
The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



# Etude de comportement thermique d'un échangeur enterré air/sol. Expérimentation de Biskra (Algérie)

H. NEBBAR\*<sup>1</sup>, O. HAMDI\*<sup>2</sup>, N. MOUMMI<sup>#1</sup>, A. BRIMA<sup>#2</sup>

\*Département de Génie Mécanique Université de Biskra, Algérie

<sup>1</sup>nebbbar.82@gmail.com

<sup>2</sup>ilmomar@gmail.com

#Laboratoire de Génie Mécanique, Université de Biskra, Algérie

<sup>1</sup>n.moummi@univ-biskra.dz

<sup>2</sup>a.brima@univ-biskra.dz

**Résumé**—L'échangeur air-sol est un système de rafraîchissement ou préchauffage des locaux très peu consommateur d'énergie qui exploite d'inertie thermique du sol. Dans cette étude, Nous avons évalué le potentiel de l'utilisation de la géothermie dite de surface et la technologie appropriée pour son exploitation par la détermination des variations de la température du sol à différentes profondeurs ainsi que déterminer des variations de la température de l'air à la sortie de l'échangeur, en considérant dans cette étude l'écoulement permanent d'un fluide Newtonien et incompressible dans un tube de section circulaire en supposant que le régime dynamique est établi. A partir du modèle obtenu nous avons montré la variation de la température de l'air à la sortie de l'échangeur en fonction des paramètres de l'échangeur géométrique, thermique et paramètres site, des caractéristiques du milieu, de la géométrie de passage et des paramètres d'entrée et de sortie de l'échangeur.

**Mots Clés** – Modélisation thermique, Energie, Géothermie, Température, Echangeur Air- Sol

## I. NOMENCLATURE

$T_{amb}$ : Température ambiante journalière.....[°C]  
 $\omega$ : Fréquence angulaire.....[rad/jour]  
 $A$ : Amplitude de la variation de température...[°C]  
 $t_0$ : Jour de l'année où la température maximale[jour]  
 $\lambda_{sol}$ : Conductivité du sol.....[W/(m°C)]  
 $c_{sol}$ : Capacité calorifique massique du sol.....[J/(kg°C)]  
 $\alpha$ : Diffusivité thermique.....[m<sup>2</sup>/s]  
 $u$ : Vitesse de l'air suivant ( $\vec{ox}$ ).....[m/s]  
 $P$ : Pression de l'air.....[N/m<sup>2</sup>]  
 $h_{con}$ : Coefficient d'échange convectif.....[W/(m<sup>2</sup>°C)]  
 $D$ : Diamètre intérieur du tube.....[m]  
 $\lambda$ : Conductivité thermique de l'air.....[W/(m°C)]  
 $V_{air}$ : Vitesse de l'air.....[m/s]

$\mu$ : Viscosité dynamique de l'air.....[kg/(m.s)]  
 $\nu$ : Viscosité cinématique de l'air.....[m<sup>2</sup>/s]  
 $\rho$ : Masse volumique de l'air.....[kg/m<sup>3</sup>]  
 $\dot{m}$ : Débit d'air.....[kg/s]  
 $c_{p\ air}$ : Chaleur massique de l'air.....[J/(kg°C)]  
 $R_{con}$ : Résistance thermique correspondant à l'échange convectif entre l'air et le tube.....[m. °C/W]  
 $R_{tub}$ : Résistance thermique du tube enterré.....[m. °C/W]  
 $R_{sol}$ : Résistance thermique entre le tube et le sol [m. °C/W]

## II. INTRODUCTION

Le puits canadien est un système qui se sert de l'inertie thermique du sol pour égaliser ces variations thermiques.

Le principe du puits canadien/provençal est de faire circuler l'air neuf de ventilation dans un conduit enterré grâce à un ventilateur avant de l'insuffler dans le bâtiment. [1]

En hiver, l'air se réchauffe au cours de son parcours souterrain, les besoins de chauffage liés au renouvellement d'air des locaux sont alors réduits et le maintien hors gel du bâtiment peut être assuré. Le puits est alors dit puits canadien.

En été, l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour se refroidir et arriver dans le bâtiment durant la journée à une température inférieure à la température extérieure. Le puits est alors dit puits provençal "Fig.1".

Ce travail est basé sur des modélisations et des simulations numériques de la température du sol et de l'air à la sortie d'un d'échangeur air/sol.



# Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

## The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014

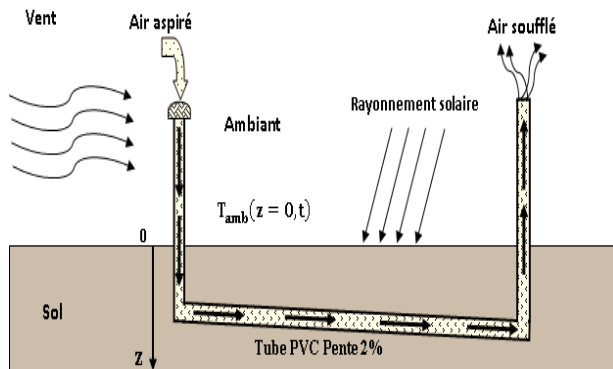


Fig. 1 Schéma de puits canadien

### III. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

❖ Le travail de recherche présenté par Stéphane THIERS, Bruno PEUPOORTIER, au centre énergétique et procédé à l'école nationale supérieure des mines de Paris, France en 2007 [3] avait pour but :

-Calculer la température du sol «non perturbé» à partir du bilan énergétique à la surface du sol, de l'influence d'un bâtiment proche et de la puissance géothermique à partir d'un modèle thermique de sol.

-Utiliser la température du sol calculée pour déterminer la température de l'air en sortie d'échangeur. Ce modèle a été intégré à un outil de simulation thermique du bâtiment à partir d'un modèle d'échangeur.

❖ Le travail de recherche présenté par David Amitrano, Université J. Fourier, Grenoble en 2006 [4] a pour but de proposer des critères objectifs pour le choix de différentes caractéristiques basées sur des simulations numériques d'échange thermique par convection forcée dans un tube enterré. Ceci permet de mettre en évidence l'effet du diamètre, de la longueur, du débit volumétrique de la différence de température entre le sol et l'air entrant sur le flux thermique fourni par le puits canadien.

❖ Le travail de recherche présenté par David BARTOLOMEU en 2005 [5] est consacré à la performance d'un échangeur thermique de type air-sol. Cet échangeur thermique de type tuyaux enterrés dans le sol a été conçu à la station expérimentale de l'ITP à Romillé. Son principe est basé sur les échanges de températures entre le sol et l'air circulant dans le réseau de tubes enterrés. Un bon dimensionnement de ce système est nécessaire pour optimiser ses performances qui sont analysées tout au long de l'année en distinguant les saisons hivernale et estivale.

❖ Le travail de recherche présenté par Pierre Hollmuller en 2002 [6] est consacré à l'utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. C'est une étude théorique et expérimentale. L'analyse a été basée sur des mesures récoltées et simulations

effectuées avec un modèle numérique développé à cet effet. La modélisation analytique a permis de mettre en lumière les phénomènes physiques de base et de dégager quelques règles de dimensionnements simplifiées.

❖ Le travail de recherche présenté par: Thierry Salomo, Renaud Mikolasek à IZUBA-Energies, Bruno Peuportier, Stéphane Thiers au centre énergétique et procédés à l'école des mines de Paris et Solarteyves Jautard, Alain Trombe à INSA de Toulouse en 2003 [9], est consacré à l'analyse, la modélisation et la validation d'un modèle de simulation dynamique pour les puits « canadiens » ou « provençaux ». L'objectif principal est l'étude du potentiel de l'inertie du sol par le système de « puits canadien » ou de « puits provençal » pour l'été, que l'on se propose de nommer ici « puits climatique ».

### IV. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le site d'étude, localisé à Université de Biskra "Fig.2"

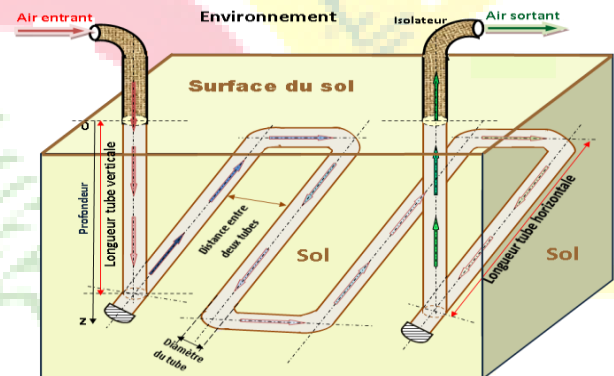


Fig. 2 Disposition expérimental de l'échangeur air/sol

Cet dispositif équipée de :

- 7 tubes PVC enterrés horizontalement : 4 tubes à longueur  $L=9$  m/tube et 3 tubes à longueur  $L=3$  m/tube, diamètre  $D=20$ cm, profondeur  $Z=3$  m sous la surface du sol.
- 2 tubes PVC enterrés verticalement: une tube à entrer d'air et l'autre à sortie d'air, longueur  $L=4,5$  m/tube, diamètre  $D=20$ cm, profondeur  $Z=3$  m sous la surface du sol.
- Un aspirateur pour aspirer l'air ambiant à l'intérieur du tube.
- L'échangeur est placé horizontalement avec une pente de 2% pour permettre l'évacuation de l'eau produite suite à la condensation.

### V. MODÉLISATION THERMIQUE

#### A. Modélisation de la température du sol

Dans la géothermie de surface, on s'intéresse aux quelques premiers mètres en dessous de la surface du sol. De ce point de vue, le sol peut être considéré comme un milieu semi-



**Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables**  
**The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



infini. L'évaluation du potentiel de l'utilisation de la géothermie de surface et de la technologie appropriée pour son exploitation, passe par la détermination des variations, le long de l'année, de la température du sol à différentes profondeurs. Ces variations sont obtenues à l'aide d'une modélisation simple utilisant les propriétés du sol et les températures ambiantes "Fig.3". [1]

On a considéré les températures ambiantes journalières durant une année, les évolutions de température en fonction du temps (jour) ont été représentées adéquatement par des fonctions cosinus : [1]

$$T_{amb}(z = 0, t) = T_{moy} + A \cos(\omega(t - t_0)) \quad (1)$$

Ces fonctions seront utilisées ci-après comme conditions aux limites lors de la détermination des distributions spatio-temporelles de la température du sol. [1]

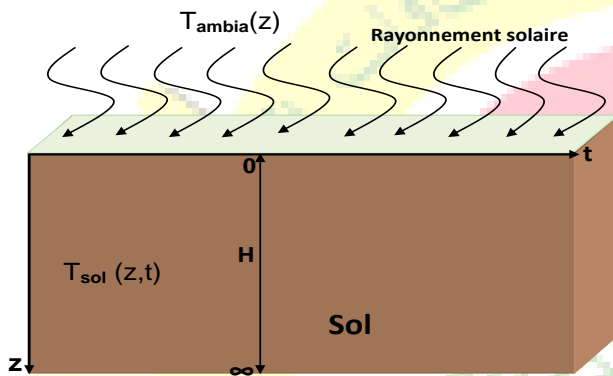


Fig. 3 Schéma du transfert de chaleur dans le sol

L'équation instationnaire de la chaleur dans ce cas s'écrit:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Après résolution de l'équation "Eq. (2)" on trouve:

$$T_{sol}(z, t) = \left[ \left( T_{moy} - T_i + A \cos(\omega(t - t_0)) \right) \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} z} \cos \left( \omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a}} z \right) + T_i \right] \quad (3)$$

**B. Modélisation de la température de l'air**

On considère l'écoulement permanent d'un fluide Newtonien, incompressible dans un tube de section circulaire on suppose que le régime dynamique établi.

❖ *Tronçon vertical du canal enterré*

L'équation de bilan thermique pour ce tronçon du tube "Fig.4"

prend la forme suivante :

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T) - P \text{div} \vec{q} + \phi \quad (4)$$

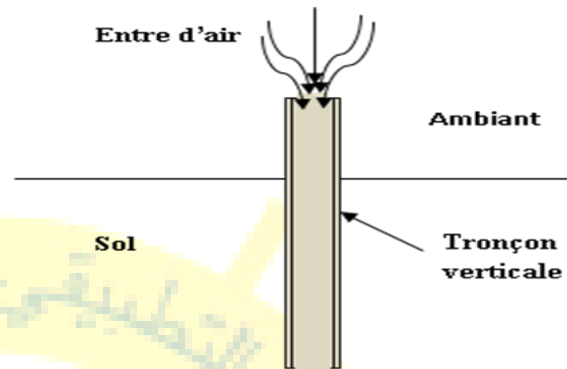


Fig. 4 Schéma du transfert de chaleur dans le tronçon vertical

Après simplifications, l'équation "Eq. 4" devient:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{a_{air}}{w} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (5)$$

❖ *Tronçon horizontal du canal enterré*

L'équation de bilan thermique pour ce tronçon du tube "Fig.6" prend la forme suivante :

$$\begin{aligned} \dot{m} \cdot c_{pair} \cdot (T_x + dT_x - T_x) &= \frac{dx}{\mathcal{R}_{conv} + \mathcal{R}_{tube} + \mathcal{R}_{sol}} \cdot (T_{sol} - T_x) \quad (6) \end{aligned}$$

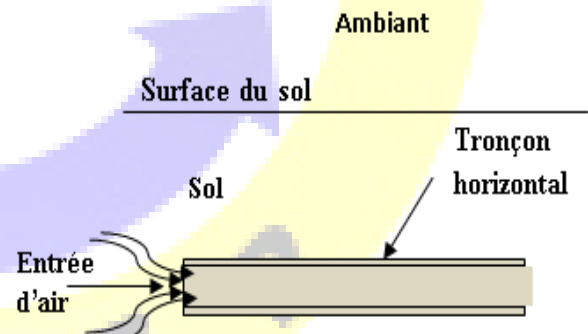


Fig. 5 Schéma du transfert de chaleur dans le tronçon horizontal

La solution analytique de l'équation "Eq. 6" admet comme expression:

$$T_x = T_{sol} + (T_{air \text{ entrée}} - T_{sol}) \cdot e^{\frac{-U}{\dot{m} \cdot c_{p \text{ air}}} \cdot x} \quad (7)$$



# Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

## The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



### VI. RESULTATS

#### a. Variation de la température du sol

Les variations, le long de l'année, de la température du sol à différentes profondeurs. Ces variations de températures du sol, permettent l'évaluation du potentiel de l'utilisation de la géothermie de surface. Montre clairement que les variations de température de l'air extérieur sont amorties et déphasées par le sol, et ceci est d'autant plus marqué que la profondeur est grande. Au-delà d'une dizaine de mètres sous la surface du sol, la température du sol ne varie plus sous l'effet de l'évolution de la température extérieure. Seule la température moyenne évolue en fonction de la profondeur sous l'effet de la puissance géothermique provenant du manteau terrestre.

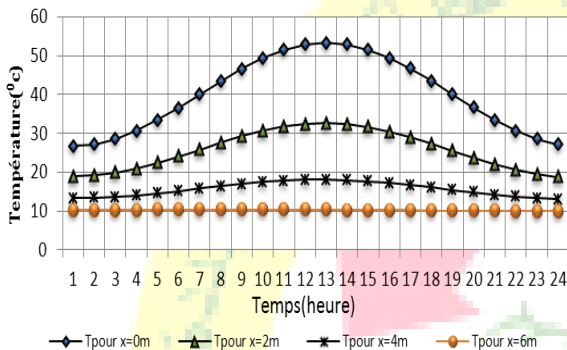


Fig. 6 L'évolution de la température de sol en fonction de temps pour ville de Biskra à 25juillet

La figure "Fig.6" montre la variation de la température du sol qui forme une sinusoïde de période journalière dans les différentes des profondeurs, d'amplitude  $A=12^{\circ}\text{C}$ .

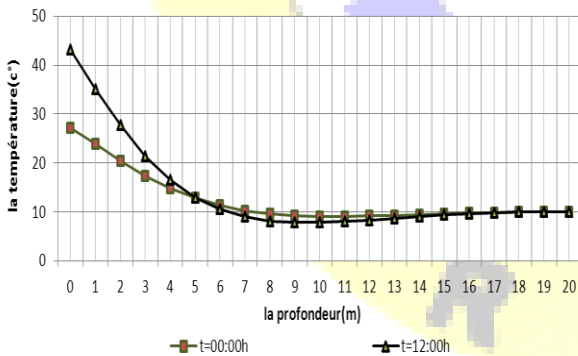


Fig. 7 la variation de la température de sol suivant la profondeur pour ville de Biskra à 05/08/2013

La figure "Fig.7" représente la variation de la température du sol en fonction de la profondeur et de la nature du sol, à midi, d'amplitude  $A= 12^{\circ}\text{C}$  et de la température moyenne annuelle  $T_{\text{moy}} = 28.08^{\circ}\text{C}$ . Cette valeur se stabilise pour des profondeurs supérieures à 6m quel que soit le temps.

#### b. Tronçon vertical

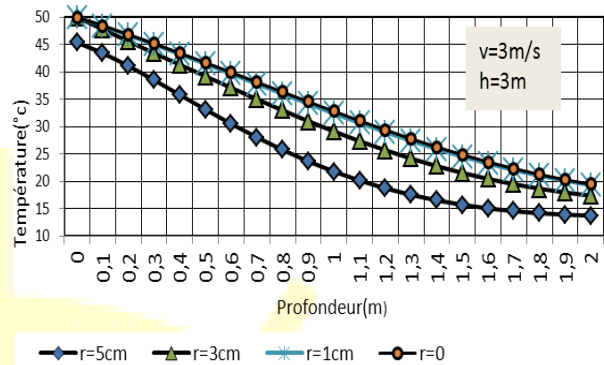


Fig. 8 .La variation de la température de l'air en fonction du rayon pour quelques valeurs de profondeur

La figure "Fig.8" présente la variation de la température de l'air dans un tube enterré verticalement en fonction du rayon du canal pour quelques valeurs de la profondeur.

#### c. Tronçon horizontal

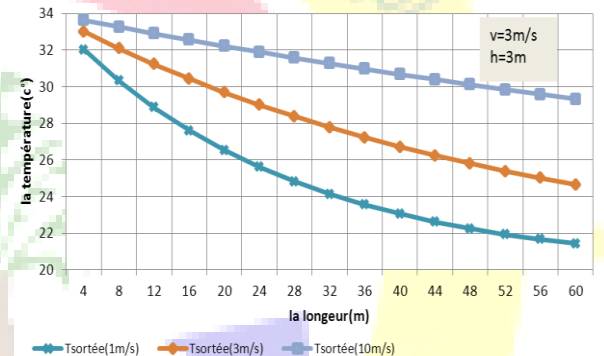


Fig. 9 La variation de la température de l'air à sortie de canal enterrée horizontalement en fonction la longueur

La figure "Fig.9" présente la variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement suivant la longueur du canal et la vitesse de l'air.

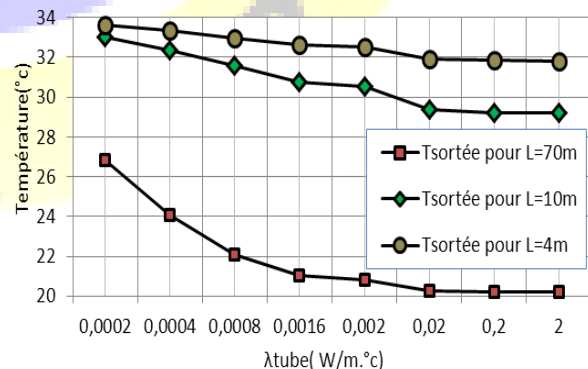


Fig. 10 Variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement en fonction de la conductivité thermique du tube



# Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



La figure "Fig.10" présente la variation de la température de l'air à la sortie du tube enterré horizontalement en fonction de la conductivité thermique du tube pour quelques valeurs de la longueur du tube.

#### d. Comparaison

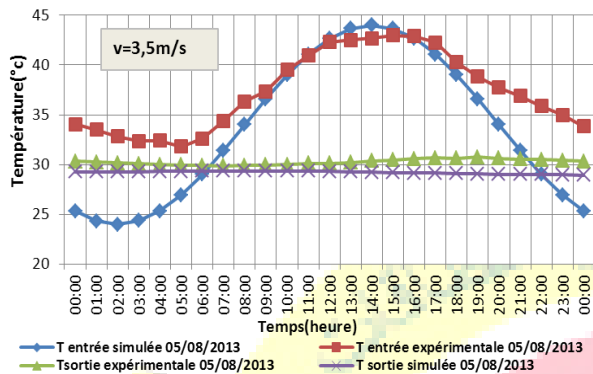


Fig. 11 Variation expérimental et simulation de la température de l'air à l'entrée et la sortie de l'échangeur air/sol pour ville de Biskra à 05/08/2013

On constate que les deux courbes sont quasiment confondues. Qu'on représente la variation des températures de l'air à la sortie de l'échangeur par les expériences ou numériques les résultats sont très proches.

#### VII. CONCLUSION

Nous avons développé dans notre travail un modèle thermique d'un échangeur air/sol qui détermine la température du sol et de l'air à la sortie de l'échangeur. Ceci permet de mettre en évidence l'effet, sur le fonctionnement de ce système, des paramètres suivants:

- La géométrie de l'échangeur : Le diamètre, la longueur et la profondeur d'enfouissement des canalisations.
- La qualité du sol et le taux d'humidité.
- Les propriétés physiques des canalisations : La conductivité thermique du tube, Les résistances thermiques convectives entre l'air et le tube et entre le tube et le sol.

#### REFERENCES

1. M.S. GUELLOUZ et G. ARFAOUI : Potentiel de la géothermie de surface pour le chauffage et la climatisation en Tunisie, Revue des Energies Renouvelables CICME'08 Sousse, pages 143 - 151, 2008.
2. K. DEHINA, A.M. MOKHTARI, Simulation numérique d'un échangeur air-sol-eau à Co-courant. XXXe Rencontres AUGC-IBPSA, Chambéry, Savoie, 9p, 6 au 8 juin, 2012.
3. S. THIERS, B. PEUPORTIER: modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiments, Journée thématique SFT-IBPSA, Froid solaire et confort d'été, Aix-les-Bains, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 8p, 25 avril 2007.

4. D. AMITRANO: Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit « puits canadien ». Université J. Fourier, Grenoble, 13p, 2006.
5. D. BARTOLOMEU: Performances d'un échangeur thermique de type air-sol, Université J. Fourier, Grenoble, Vol. 28, No3, 4p, 2005.
6. P. HOLLMULLER, Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments, Thèse de Doctorat, Université de Genève, 125p, 2002.
7. M. BENHAMMOU, B. DRAOUI, Simulation et caractérisation d'un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments fonctionnant dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie. Revue des Energies Renouvelables, Vol. 15 N°2, Pages 275 - 284, 2012.
8. Données sur sites Internet. ([www.free.météo.com](http://www.free.météo.com))
9. Thierry Salomon, Renaud Mikolasek, Bruno Peuportier, Stéphane Thiers, Yves Jautard et Alain Trombe. Dimensionnement du « puits climatique » Analyse, modélisation, validation d'un modèle de simulation dynamique pour les puits « canadiens » ou « provençaux ». Rapport Prebat Ademe.04 04C 000 1. Région Languedoc Roissillon 2003. 59 p.