



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Énergies Nouvelles et
Renouvelables
The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014



Étude expérimentale et numérique d'un échangeur de chaleur air/sol horizontal

M. E. Benhamza¹; A. Brima²; S. Houda³; L.Serrir⁴

¹ Université de Biskra département de génie mécanique

² Université de Biskra département de génie mécanique

³ Université de Biskra département d'architecture

⁴ Centre de recherche appliquée en énergies renouvelables- Ghardaïa

¹ghazalibenhamza@yahoo.fr

²a.brima@univ-biskra.dz

³m.houda@univ-biskra.dz

Résumé :

Les échangeurs de chaleur air/sol horizontaux sont des dispositifs utilisés pour réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments, par l'échange de l'énergie thermique de la terre afin de rafraîchir en été et chauffer en hiver. Dans cette étude nous avons procédé à une simulation par le biais de la mécanique des fluides numérique (CFD), pour cela il a été nécessaire de concevoir l'échangeur tout en respectant le design et les dimensions réelles du dispositif expérimental. Pour cet objectif nous avons utilisé aussi bien pour la conception et le maillage le logiciel mailleur «GAMBIT» tout en prêtant attention aux conditions aux limites adéquates. Nous avons testé plusieurs configurations de maillage avec différents raffinements pour en choisir une qui fasse un compromis entre la précision et les ressources informatiques et aussi nous avons raffiné grandement notre maillage à proximité de la paroi. Concernant le solveur, nous avons eu recours au logiciel commercial FLUENT 6.3. On a confronté les résultats de simulation avec les résultats du dispositif expérimental, on a constaté une bonne concordance entre eux. Il est à noter que pour évaluer la température le long des deux tronçons (entrée et sortie) de l'échangeur, nous avons opté une fonction (UDF) la fonction définir par l'utilisateur.

Mots-Clés: Échangeurs de chaleur air/sol, Géothermie, Étude numérique.

I. INTRODUCTION :

Les échangeurs de chaleur enterrés sont comme des méthodes passives réalisées pour réduire la consommation

énergétique. Cet article traite le comportement thermique d'un échangeur de chaleur air/sol horizontal qui se compose d'une canalisation tubulaire souterraine en métal ou en matière plastique, dans notre cas il a été utilisé un système de canalisation circulaire de $\varnothing 110_{\text{mm}}$ enterré horizontalement. Ce modèle permet l'échange de la chaleur de fluide avec le sol dans le but de rafraîchir en été et de chauffer en hiver. Le dispositif expérimental est installé au niveau de l'université de Biskra située dans une zone à climat chaud, qui est employé pour fournir des données expérimentales a été installé au sud de l'Algérie et bien précisément au niveau de la ville de Biskra, pour le but d'étudier son efficacité.

Dans la littérature, plusieurs travaux de recherche théoriques et expérimentaux sur les échangeurs de chaleur enterrés ont été menés dans plusieurs laboratoires de recherches. Ils expliquent les divers types des échangeurs de chaleur et étudient l'efficacité de chauffage et de refroidissement. **Sehli** et al. [1] ont développé un modèle numérique régulier unidimensionnel pour estimer l'efficacité des échangeurs de chaleur terre-à-air, installés au sud de l'Algérie à des profondeurs différentes. Les auteurs ont conclu que le système d'EAHE ne peut pas maintenir le confort thermique à l'intérieur des locaux, mais il pourrait être employé pour réduire la demande énergétique dans le bâtiment domestique dans la même région. Ce système peut être utilisé en même temps comme un dispositif de climatisation. **Misra** et al. [2] ont développé un modèle sous solveur FLUENT 6.3, l'analyse basée sur CFD a été utilisée



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Énergies Nouvelles et Renouvelables The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

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



pour résoudre le champ de la température autour de la conduite enterrée horizontalement de EATHE, en utilisant une grille non structurée, et pour étudier les effets de la durée de temps de l'opération continue, de la conductivité thermique de sol du diamètre de conduite et de la vitesse d'écoulement sur l'exécution thermique d'EATHE sous la coupure des conditions ont été analysées. Un modèle numérique du transfert thermique dans la terre a été développé par **Esen et al [3]** afin de déterminer la distribution de la température à proximité de la conduite. L'approximation de différence finie est employée pour l'analyse numérique. il est à noter les résultats numériques obtenus sont en accord les mesures expérimentales. Pour réduire la charge de refroidissement des bâtiments en été **Bansal et al. [4]** ont réalisés plusieurs travaux sur les échangeurs de chaleur air-sol, l'un de ces travaux un model a été développé par la CFD avec le solveur **FLUENT (version 6,3)**, pour un climat chaud et sec il s'agit de la ville d'Ajmer (Inde). **Bansal et al. [5]** ont développés un échangeur de chaleur air-sol et ont intégrés un refroidisseur évaporatif à la sortie de l'EATHE. L'analyse horaire d'une année du système intégré a été effectuée pour des conditions climatiques principalement chaudes et sèches en utilisant le modèle de la (CFD) modélisé avec le solveur **FLUENT (version 6,3)**.

II. DESCRIPTION DU MODÈLE DE CFD :

Nous avons fait une étude numérique d'un échangeur de chaleur air/sol. Le solveur 6,3 FLUENTS de CFD a été employé dans cette étude. Pour contrôler le changement de la température tout au long des tubes de l'échangeur, on a dessiné la géométrie de l'échangeur sur le logiciel de maillage **Gambit2.3** et on a respecté toutes les dimensions (la longueur, diamètre des pipes, la forme des coudes, l'épaisseur et l'espacement des tubes), pour les deux cas (une forme complète et autre symétrie).

A. La géométrie et le maillage :

Dans cette étape nous avons discrétisé la géométrie de l'échangeur de chaleur avec des dimensions réelles (longueur, diamètre...), en utilisant une géométrie tridimensionnelle adaptée à la structure maillée.

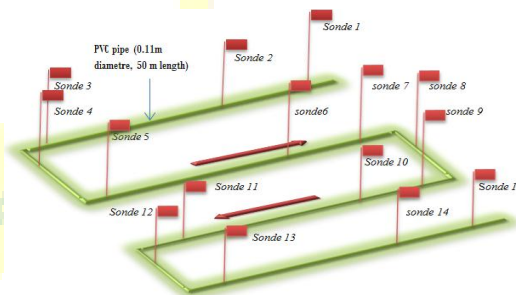


Fig.1 Schéma du système d'échangeur de chaleur air/sol

Pour différents types de maillage et précision (les espaces entre les nœuds) et avec un maillage de la couche limite c.-à-d. un maillage fin très proche de la paroi du tube, et définie les conditions de frontière (définie les parois comme un solide, et l'entrée comme un ventilateur pour assurer la circulation de l'air,...).

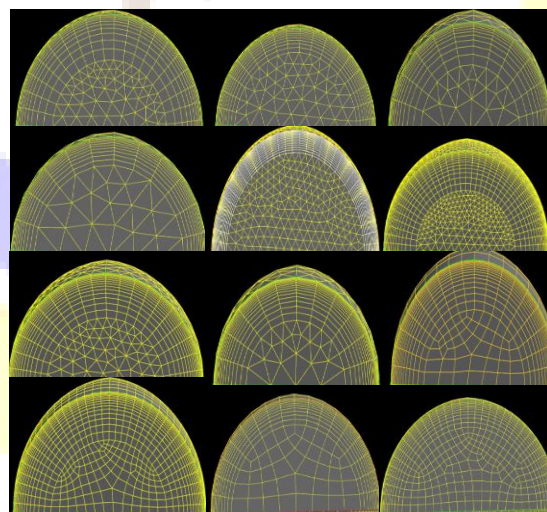


Fig.3 Différents types de maillage utilisés pour la simulation

La même chose avec une géométrie symétrique utilisée pour réduire le temps de convergence de la simulation.



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Énergies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

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

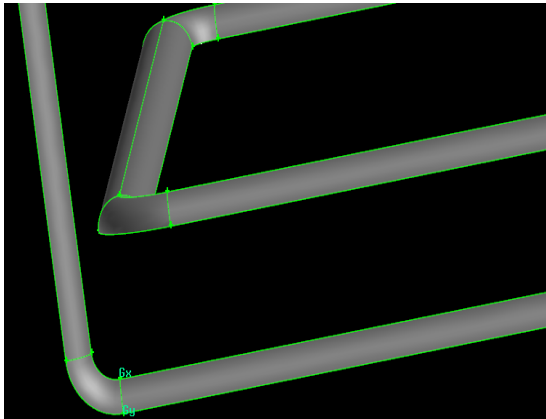


Fig.4 Géométrie symétrique de l'échangeur sous Gambit

Nous pouvons aussi contrôler notre maillage volumique qui touche toute la surface de l'échangeur de chaleur en utilisant « exam mesh » et vérifier le maillage selon les axes « x,y,et z ».

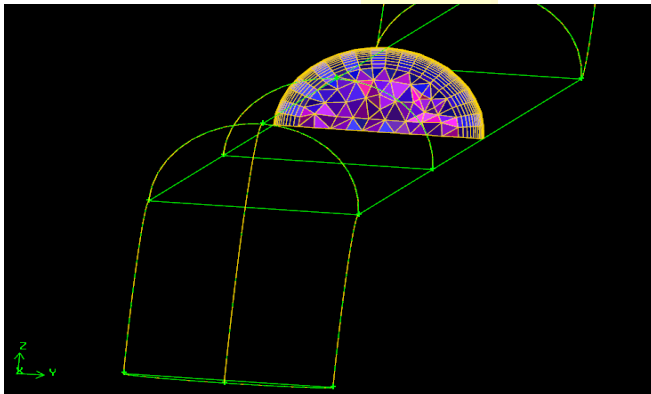


Fig.5 Contrôle du maillage.

B. Le solveur Fluent 6.3:

Pour la simulation numérique on a exporté la géométrie vers le code **FLUENT** et communiqué les données nécessaires et définir les conditions aux limites (déclarer que la température de la paroi du tube horizontale de l'échangeur est égale à celle du sol à une certaine profondeur), et nous avons utilisé le modèle de l'énergie pour définir les paramètres liés à l'énergie ou au transfert thermique, et définir la conductivité thermique de la conduite. Les schémas de discrétisation utilisés dans le présent travail 1^{er} ordre pour la quantité de mouvement, énergie cinétique turbulente, et le taux de

dissipation, et un l'algorithme SIMPLE standard pour le couplage vitesse- pression. En ce qui concerne le critère de convergence nous avons choisi 1e-6 pour l'énergie et les autres équations pour assurer la convergence.

C. Équations régissant :

Les équations régissant de transport dans les coordonnées 3D cartésiennes pour un écoulement incompressible et stationnaire, le transfert de la chaleur et de la masse sont donnés ci-dessous équation de continuité:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

$$\left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

$$\left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

Équation d'énergie, pour un écoulement stationnaire, sans source interne et dissipation visqueuse.

$$\left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (5)$$

Les écoulements turbulents sont caractérisés par les champs de fluctuations de vitesse. Ces fluctuations mélangent des quantités transportées telles que l'énergie, et la concentration d'espèce, aussi bien ont flotté les quantités transportées. Puisque ces fluctuations peuvent être de petite échelle et de haute fréquence. Cependant, les équations modifiées contiennent des variables inconnues additionnelles, et les modèles de turbulence sont nécessaires pour déterminer ces variables en termes de quantités connues:



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Énergies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

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



En ce qui concerne les modèles de turbulences on a plusieurs modèles mathématiques sont présentés, le modèle Spalart-Allmaras, le modèle (k- ε), le modèle (k- ω), le modèle RSM (Reynolds Stress Modèles), modèle (DES), modèle (LES)...

Notre choix dans cette étude c'est le Modèle standard k-ε [Launder et spalding (1972)] qui se base sur le concept bousinesq (1977), notre choix du modèle de turbulences est dépend avec les ressources informatiques et la quantité de temps disponible pour la simulation.

Équations de transport Model k - ε : Standard :

L'énergie cinétique de turbulence **k** et son taux de dissipation, **ε** sont obtenus à partir des équations suivantes de transport:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (7)$$

Ou

G_k Représente la génération de l'énergie cinétique de turbulence due aux gradients moyens de vitesse, calculée comme :

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (8)$$

G_b Représente la génération de l'énergie cinétique de turbulence due à la flottabilité, calculée comme :

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{P_{rt}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (9)$$

P_{rt} Est le nombre turbulent de Prandtl pour l'énergie, **g_i** est le composant du vecteur de la gravité dans la direction **i**. Pour le standard et réalisable **k - ε**.

β Le coefficient de la dilatation thermique.

Y_M Représente la contribution de la dilatation de fluctuation dans la turbulence compressible au taux global de dissipation :

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_\ell^2, \text{ M nombre mach } M = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$$

C_{1ε} et **C₂** Sont des constantes, **σ_k** et **σ_ε** sont les nombres de Prandtl de la turbulence pour **k** et **ε**

S_ε et **S_k** Sont les limites définies pour l'utilisateur de source.

Modélisation de la viscosité turbulente :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

Constantes Modèles :

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_\mu = 0.09$$

En ce qui concerne les conditions aux limites variables le long des tubes verticaux en fonction de la profondeur du sol, nous avons opté pour une fonction qui nous avons définie (UDF), permettant d'attribuer la fonction de la température des tubes verticaux en fonction de la profondeur. La température de la surface du sol peut être estimée en utilisant une fonction sinusoïdale (Eq. (1)).

$$T(0, t) = T_m + T_0 \cdot \cos(\omega t) \quad (11)$$

La température de la profondeur du sol peut être présentée comme suit:

$$T(z, t) = T_m + T_0 \cdot \exp\left(\frac{z}{\gamma}\right) \cdot \cos(\omega t - z/\gamma) \quad (12)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}, \quad \alpha = \frac{\lambda_{sol}}{\rho c_{psol}}$$

Avec **T(z, t)** la température du sol au temps (**t**) et à une profondeur (**z**), **T_m** est la température moyenne annuelle du sol, **T₀** est l'amplitude de la température sur la surface du sol (**z=0**), et **ω** est la fréquence de la vague annuelle de la température. Les caractéristiques physiques ainsi que les paramètres de calcul sont illustrés respectivement sur les tableaux (I et II).



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Énergies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

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



TABLEAU I :
Propriétés physiques [1]

Propriété	Valeur
Conductivité thermique du sol (W/m. °C)	2.01
Chaleur spécifique du sol (J/kg. °C)	1380
Densité du sol (kg/m ³)	2300
Diffusivité thermique du sol (m ² /s)	6.33X10-7
Conductivité thermique du PVC (W/m. °C)	1.17
Chaleur spécifique du PVC (J/kg. °C)	900
Densité du PVC (kg/m ³)	1380

TABLEAU II :

Paramètres d'entrée pour la validation comparative.

Propriété	Valeur
Longueur de pipe	50 m
Diamètre de pipe	0.11m
Profondeur de pipe	4m
Vitesse d'air	4.5 ; 3.5m/s
Température d'entrée	37,48°C
Température de sol (z=4m) en été	24 ; 28°C

III. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE :

Cette partie est développée dont le but d'étudier l'efficacité de l'échangeur de chaleur enterré dans les régions trop chaudes et arides. Nous avons dit que l'échangeur a été installé au site de Biskra voir les figures (7, 8, 9) réalisées par le labo LGM enceinte de l'université de Biskra, qui est situé au sud de l'Algérie, possède un climat aride et très chaud en été. Biskra parmi les régions de l'Algérie de haute consommation d'énergie pour la climatisation des locaux, surtout avec les périodes de température trop élevées qui peuvent atteindre 50°C. C'est pour cela le laboratoire de génie mécanique de l'université de Biskra a lancé des recherches pour développer un système de climatisation de basse consommation d'énergie, afin de réduire la consommation d'énergie utilisée pour la climatisation. Il est important de signaler qu'une

demande très élevée en matière d'énergie sur tous pour les dernières années.



Fig.7 Image de l'échangeur de chaleur horizontal pour différentes profondeurs.



Fig.8 Emplacement des sondes tout au long de l'échangeur de chaleur.

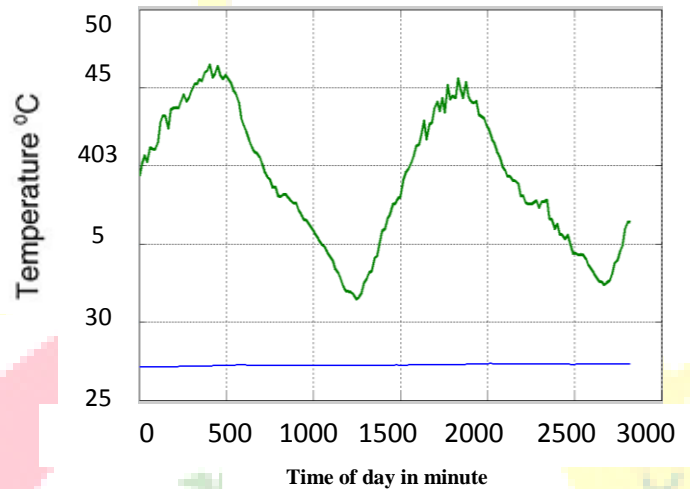


**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Énergies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

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



Fig.9 Emplacement détaillé des sondes de l'air à l'intérieur de la gaine.



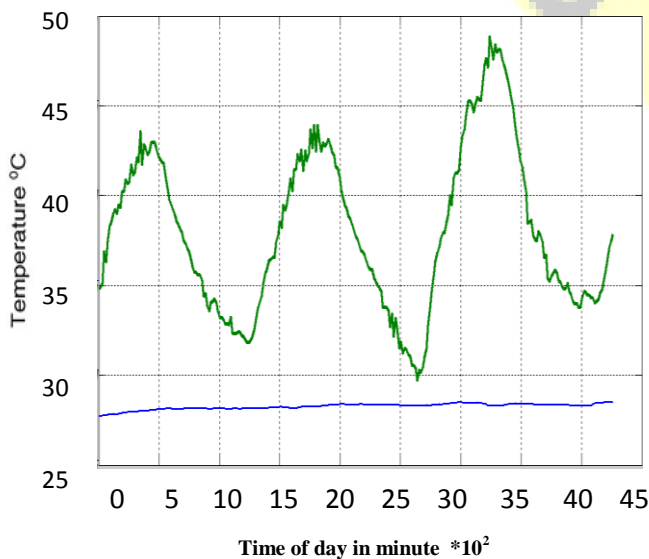
La température de l'air d'entrée
— La température de l'air de sortie

Fig.10 Comparaison entre la température d'entrée et de sortie de l'échangeur.

IV. VALIDATION DU MODÈLE DE SIMULATION:

Nous avons fait des essais durant les mois de Juillet et Aout, les deux mois les plus chaud de l'année, pour étudier réellement le comportement de l'échangeur et son efficacité, la figure (10) présente l'écart de la température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur enterrée pour trois jours successifs pour les deux mois.

Pour valider notre travail nous avons fait une étude expérimentale avec des sondes qui donnent la variation de la température tout au long des tubes de l'échangeur de chaleur et qui nous permettent de faire la comparaison avec les données numériques.



A. Les iso-surfaces:

Les iso-surfaces sous FLUENT représente la méthode de choisir les points de température tout au long des pipes, la figure (8) présente la température de l'air (ligne rouge) et la température de la paroi.

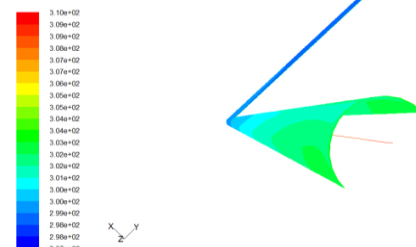


Fig.11 Les iso-surfaces



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Énergies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

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



TABLEAU III:
Validation du modèle de simulation (température de l'air ambiant:
37°C).

Distance axiale de l'admission d'EATHE (m)	Données expérimentales (°C)	Résultats numériques (°C)
2.65	35.24	35,66
6.9	32.28	32,39
10.81	29.83	29,35
18	26.74	26,98
23.44	25.95	25,84
30.21	25.00	25,02
45.3	24.21	24,26

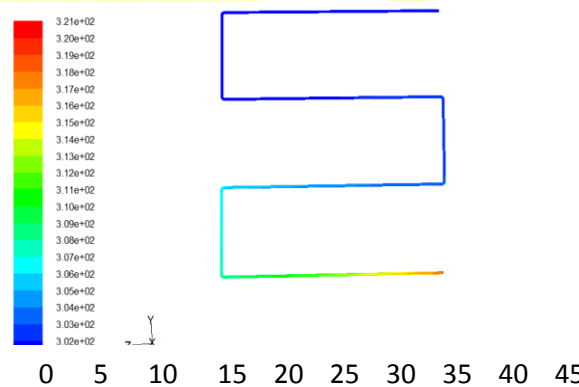
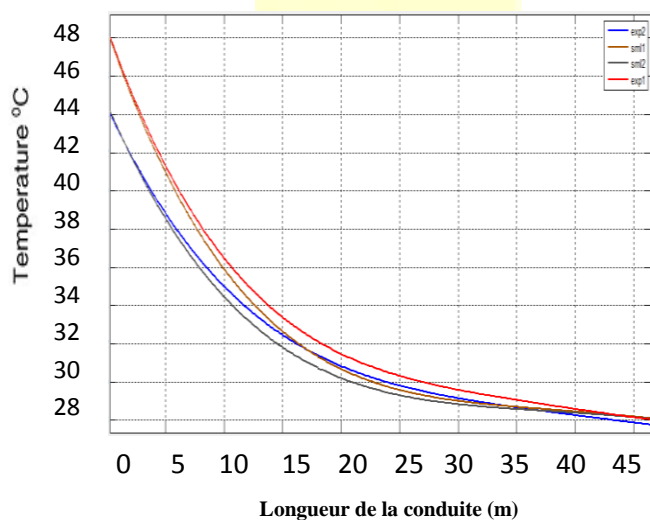
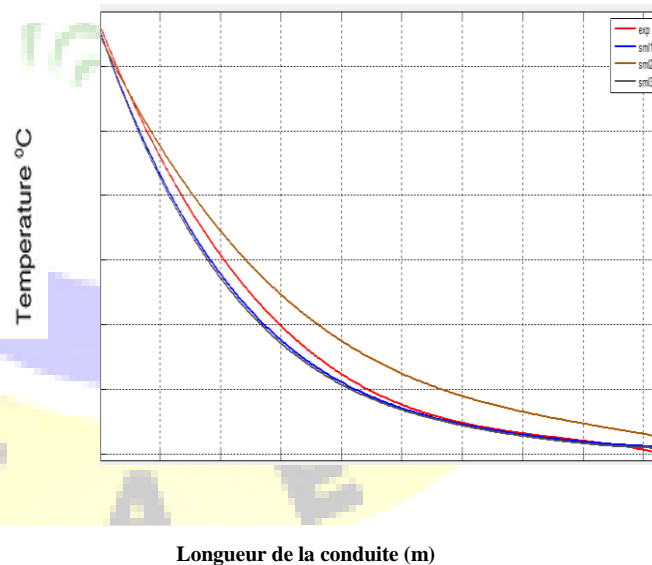


Fig.13 Distribution de la température de l'air avec la longueur des conduites.



- La température simulée après 1 heure
- La température expérimentale après 1 heure
- La température simulée après 4 heures
- La température expérimentale après 4 heures

Fig.12 Validation des résultats de CFD avec des résultats



- La température simulée avec un maillage Hex/wedge de 1.5.
- La température simulée avec un maillage Tet/Hybrid de 1.5.
- La température simulée avec un maillage Hex/wedge de 1.
- La température expérimentale.

Fig.14 La variation de la température pour différents types de maillages.



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Énergies Nouvelles et
Renouvelables
The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014

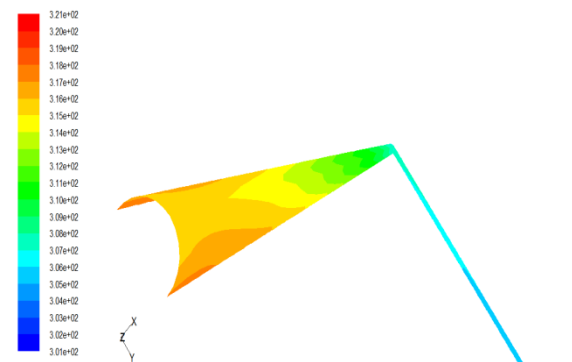


Fig.15 Distribution de la température sur
la paroi des conduites.

V. CONCLUSION:

Dans cet article on peut conclure que l'utilisation de maillage tridimensionnel est efficace pour étudier la variation de la température tout au long de l'échangeur. On remarque que l'étude numérique est simple et efficace, qu'elle donne des résultats acceptables par rapport aux mesures expérimentales. Soit pour la conduction sur la paroi de l'échangeur ou pour la circulation de l'air au long de l'échangeur, une concordance est remarquée.

Pour l'étude numérique, nous pouvons conclure que la géométrie symétrique de l'échangeur donne de bons résultats avec un temps de simulation court par rapport à l'utilisation de géométrie complète.

Nous avons opté pour un maillage suffisamment fin de sorte que les résultats des variables recherchées ne sont pas influencés par un raffinement poussé.

Pour l'étude expérimentale, selon les résultats obtenus en été, on a remarqué un écart très important de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur qui peut aller jusqu'à 20°C. Ces résultats donnent une preuve que l'échangeur de chaleur enterré peut contribuer fondamentalement à l'économie de l'énergie aussi bien en été qu'en hiver.

Référence :

- [1] Sehli, A., et al. (2012). "The Potential of Earth-air Heat Exchangers for Low Energy Cooling of Buildings in South Algeria." *Energy Procedia*18: 496-506.
- [2] Misra, R., et al. (2013). "CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger." *Applied Energy*103: 266-277.
- [3] Esen, H., et al. (2007). "Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system." *Building and Environment*42(3): 1126-1134.
- [4] Bansal, V., et al. (2010). "Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling." *Energy and Buildings*42(5): 645-648.
- [5] Bansal, V., et al. (2012). "Performance analysis of integrated earth-air-tunnel-evaporative cooling system in hot and dry climate." *Energy and Buildings*47: 525-532.
- [6] Khalajzadeh, V., et al. (2011). "Parameters optimization of a vertical ground heat exchanger based on response surface methodology." *Energy and Buildings*43(6): 1288-1294.
- [7] N. Moumni et al (2010). "Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra." *Energies Renouvelables* Vol. 13 N°3 399 – 406.
- [8] P.M. Congedo et al (2012). "CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations." *Applied Thermal Engineering* 33-34 24e 32.



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Énergies Nouvelles et
Renouvelables**

**The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014



Nomenclature :

EATHE : échangeur de chaleur enterré Air-Sol.

u : X vitesse, m/s.

v : Y vitesse, m/s.

w : Z vitesse, m/s.

μ_t : viscosité turbulente m^2/s .

ν : viscosité cinématique m^2/s .

ρ : Masse volumique de l'air, kg / m^3

T : Température de l'air, °C.

P : Pression de l'air.

μ : Viscosité dynamique de l'air.

ϵ : Taux de dissipation de turbulence.

k : L'énergie cinétique de turbulence.

ν : Viscosité cinématique de l'air.

α : Diffusivité thermique moyenne.
 m^2 / s .

ω : La fréquence de la vague annuelle de la
température

Z : Profondeur des pipes, m.

λ_{sol} : Conductivité thermique du sol

c_{psol} : Capacité de chaleur spécifique du sol.