

Simulation d'un échangeur air sol et d'une citerne rafraîchissante couplés à un local multizone

Auteurs : Abderrahmane Medjdoub Mokhtari ¹, Karim Dehina ²

¹ Faculté d'architecture et de génie civil USTMB Oran Algérie

² Faculté de technologie, Université Amar Telidji, Laghouat Algérie
am_mokhtari@yahoo.fr ; karimdehina@yahoo.fr

Résumé : La présente communication a pour objet de simuler le comportement énergétique d'un système géothermique superficiel composé d'un échangeur air sol et d'une citerne rafraîchissante, servant au pré conditionnement d'air d'un local multizone sis à Oran - Algérie, en vue d'en optimiser l'efficacité énergétique. Un modèle numérique dynamique développé à cet effet, a permis de faire une étude paramétrique faisant apparaître les paramètres les plus influents sur le rendement énergétique de ce système combiné. Une étude expérimentale est menée sur ce même site permettant de valider le modèle numérique. En fin, Un bilan énergétique est dressé, montrant tout l'intérêt qu'offre ce système, qui couplé à tous types de bâtiments, peut couvrir une part importante de ses besoins énergétiques.

Mots clés :

Echangeur air-sol, Citerne rafraîchissante, simulation, Couplage thermique

1. INTRODUCTION

Le couplage thermique des systèmes géothermiques superficiels aux bâtiments d'habitation suscite de plus en plus d'intérêt en matière de chauffage et de rafraîchissement.

Considérés comme source d'énergie propre et durable, la généralisation de leur application est pourtant pénalisée par des contraintes liées à la disponibilité d'espaces libres au voisinage du bâtiment et au coût de l'investissement initial, accentué éventuellement, au cas où une pompe à chaleur est prévue.

C'est sous un contexte économique pas toujours favorable à l'introduction de ces systèmes en Afrique du Nord, qu'un simple système expérimental combiné est installé à l'université des sciences et de technologies d'Oran, composé de deux échangeurs air-sol et d'une citerne rafraîchissante enterrée couplée à un plancher hydraulique d'une cellule expérimentale.

Une campagne de mesures s'étalant sur deux saisons d'été a été menée, et qui a permis d'apprécier l'apport énergétique du système [1]. La modélisation du système, a permis de mener une étude paramétrique, objet de cet article, déterminant ainsi les facteurs les plus influents sur le rendement du système.

A partir des données géométriques et physiques de l'installation expérimentale existante, une optimisation par simulation est proposée ici pour un climat sud méditerranéen représenté par la ville d'Oran, et un climat saharien représenté par la ville de Béchar au Sud Ouest de l'Algérie.

2. PRESENTATION DU SYSTEME

La cellule expérimentale est composée de deux locaux juxtaposés semblables de 20 m² chacun (figure 01). Le premier local est alimenté par deux échangeurs air-sol à deux mètres de profondeur dont l'un est en P.V.C DN 125mm et l'autre en Zinc DN 125mm de 20 mètres linéaires chacun. Le second local dispose d'un plancher hydraulique réversible utilisé à des fins de chauffage solaire en hiver et au rafraîchissement en été. Celui-ci est couplé à une citerne rafraîchissante en acier galvanisé de 1.73m³ dont l'axe est ancré à 2m de profondeur. Le sol limoneux a une diffusivité thermique $a_s = 5.88 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{s}$ et une conductivité $\lambda_s = 1.5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}$.

Une chaîne d'acquisition informatique liée à un réseau de capteurs thermiques et à une mini station météorologique permet un enregistrement permanent des données.

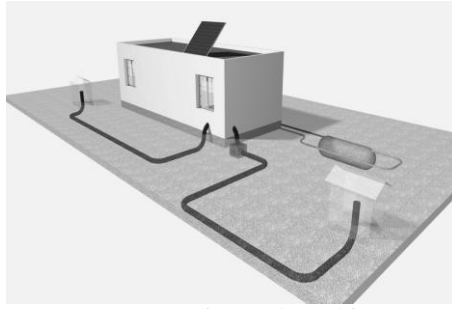


Figure 1 : Système expérimental combiné - USTO Oran

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des parois de la cellule expérimentale

Paroi	Matériau	Conductivité Thermique λ (W/m. °C)	Masse volumique (Kg /m ³)	Cp (KJ/Kg °C)	Epaisseur e (m)
Mur extérieur et intérieur	Enduit ciment	1.15	1800	1.0	0.01
	Brique	0.50	1100	0.92	0.10
	Isolant	0.30	38	0.92	0.04
	Brique	0.50	1100	0.92	0.10
	Enduit ciment	1.15	1800	1.0	0.01
Plancher Bas	Revêtement sol en Gerflex	0,2	/	/	0.003
	Béton	1.75	2400	0.92	0.10
	Isolant	0.03	38	0.92	0.04
	Béton	1.75	2400	0.92	0.10
Plancher Haut	Etanchéité Supérieure polystyrène	0,04	200	0.670	0.03
	polystyrène	0,03	25	0.920	0.02
	Dalle de compression	1,75	2300	0.920	0.04
	Corps creux en ciment	1.14	1850	0,92	0.16
	Enduit ciment	1.15	1800	1.000	0.015
Porte	Bois	0.20	600	0.92	0.05

3. Modélisation des systèmes

3.1. Echangeur air-sol

Suivant la méthode exposée par THIERS S. [2] pour intégrer l'influence du bâtiment sur l'échangeur air-sol, le couple : entrées - sorties de l'échangeur air-sol peut être modélisé à part. On a recours alors à un modèle numérique complet implémenté sous logiciel Scilab. Les sorties de ce modèle servent de fichier d'entrée au modèle du bâtiment.

Vu la faible diffusivité thermique dans le sens parallèle à l'échangeur [2], le problème de diffusion tridimensionnel dans le sol, peut être ramené à un modèle bidimensionnel discrétisé. Aussi la section de l'échangeur a été assimilée à une section carrée.

Le bilan d'énergie sur une section 'Ω' (fig. 01) est décrit par les équations suivantes :

Diffusion de la chaleur dans le sol

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a_s} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Bilan énergétique sur un tronçon discrétisé

$$2\dot{m}_a c_a V_a (T_e - T_a) = 2\pi r_i h_a dy (\overline{T_{st}} - T_a) \quad (2)$$

Couplage à la limite radiale du tube

$$h_a(T_a - \overline{T_{st}}) = -\lambda_s \left(\frac{\overline{T_{s\delta}} - \overline{T_{st}}}{\partial x} \right) \quad (3)$$

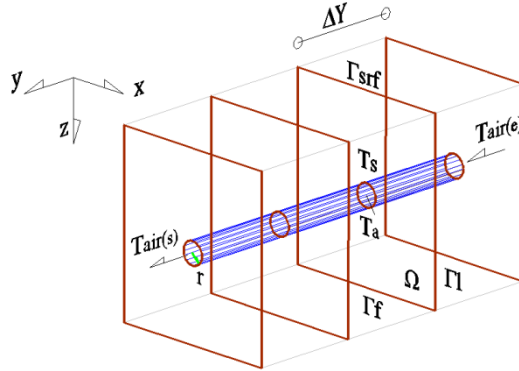


Figure 2 : Schéma de discrétisation longitudinale de l'échangeur

Sur un domaine discrétisé 'Ω', le modèle mathématique prend la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} -\partial_t T + a_s \cdot \partial_{xz} T^2 = u_{2D}(x, z, t) \quad \forall t > 0 \\ \text{Conditions aux limites} \\ T_{surf_sol} = T_{sol}(0, t) \\ T_l = u_{2l}(z, t) \quad \text{par symétrie} \\ T_f = u_{2F}(Z, t) \\ T_s = T_{sol}(0, t) \\ \text{Condition initiale} \\ T_0 = u_{1D}(z, t_0) \quad \text{sur } \Omega \end{array} \right. \quad (I)$$

Avec :

$$\Gamma = \Gamma_{srf} \cup \Gamma_l \cup \Gamma_f \cup \Gamma_s$$

- u_{2l}, u_{2F} fonctions numériques d'extrapolation sur Ω , définies respectivement au voisinage de Γ_l et Γ_f .
- u_{1D} : Fonction numérique de diffusion unidirectionnelle de la chaleur dans le sol
- T_{sol} : Fonction de température de surface [3].
- T_l : Température aux limites latérales.
- T_f : Température au fond du champ Ω .
- Z : Profondeur du terrain considéré.

L'équation de la diffusion de la chaleur (I) correspondant aux fonctions u_{1D} et u_{2D} à été discrétisée à l'aide d'une méthode explicite aux différences finies.

3.2. Modélisation de la citerne

La température d'entrée de la citerne ne peut être découplée du bâtiment. Sur ce, le choix de la méthode de modélisation des deux systèmes est faite suivant un critère « temps de simulation-précision » tolérable. On fait alors appel à un modèle semi analytique, où les conditions aux limites du sol influencé par la citerne sont données par la relation analytique de Kasuda[4], alors que la citerne et son champ de sol influencé est traité numériquement sous le logiciel Energyplus. Le bâtiment est ainsi couplé à la citerne sous le même logiciel.

Relation de Kasuda pour un milieu semi infini :

$$T(Z, t) = \overline{T_s} - A \cdot e^{\left(-Z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 a_s}}\right)} \cdot \cos \left(t - t_{min} - \frac{Z}{2} \cdot \sqrt{\frac{365}{\pi a_s}} \right) \quad (4)$$

Bilan énergétique de la citerne :

$$US(T_s - T_w) = mc \left(\frac{T_w}{dt} \right) \quad (5)$$

Le sol est discrétisé dans le sens radial en 8 portions, et dans le sens circonférentiel en 06 segments. La conduction axiale étant négligée.

3.3. Autres paramètres physiques :

Le nombre de Nusselt est donné au régime laminaire, prévalent dans la citerne, par la relation de Hausen[5]

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668(D/L)Re.Pr}{1 + 0.04[(D/L)Re.Pr]^{2/3}} \quad (6)$$

Au régime turbulent prévalent en tuyauterie on adopte plutôt la relation de Colburn :

$$Nu = 0.023Re_d^{0.8}Pr^{1/3} \quad (7)$$

D'où le coefficient d'échange convectif :

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \quad (8)$$

Les pertes de charge en tuyauterie sont données par des corrélations mentionnées par Lencastre.A [6]
La consommation énergétique de la pompe se calcule par la relation :

$$P_{pompe} = \frac{\rho g J Q_w}{\eta} \quad (9)$$

4. Résultats et discussion :

4.1. Citerne rafraichissante

Partant de la configuration initiale reportée au paragraphe 2 et qui correspond aux données expérimentales de l'installation de l'USTO, les paramètres suivants ont été et fur et à mesure modifiés dans un sens d'optimisation du système.

Données initiales :

1. Volume de la citerne 1.73 m³
2. Rayon 0.5m
3. Profondeur d'axe 2m
4. Sol de moyenne diffusivité $a=5.88 \times 10^{-7} m^2/s$
5. Albédo=0.4
6. Lieu : Oran
7. Débit : $Q = 0.20 l/s$
8. Tuyauterie isolée entre citerne et plancher : Cu 20x2mm L= 8ml
9. Dimensions du local : 4 x 5 x 3 m.

Paramètres optimisés (citerne) :

1. Diffusivité du sol $a=1 \times 10^{-7} m^2/s$.
2. Volume : 5m³
3. Profondeur d'axe 3.5m
4. Albédo : 0.7

On considère d'abord la cellule telle qu'elle est réellement configurée, en introduisant un climatiseur chargé de maintenir une température de consigne de 26°C.

La simulation suivante reprend la même configuration mais avec la citerne couplée au plancher hydraulique. On remarque sur le graphique (3) que le système est énergétiquement déficitaire. Le fait de réduire la diffusivité du sol améliore très légèrement le rendement du système mais sans pour autant donner une efficacité au système.

Partant du cas précédent, l'augmentation du volume de la citerne à diamètre constant permet une économie de l'ordre de 80% pour ce cas, la surface d'échange citerne-sol étant agrandie. Une profondeur d'ancrage de 3.5 m paraît être idéale [1] et permet avec l'augmentation de l'albédo de se rapprocher d'une autosuffisance du système en matière de rafraîchissement.

L'évolution libre de la température dans la cellule dans le cas optimisé en absence d'un climatiseur est représentée par le graphique (4) où il est clair que la température de l'air se trouve dans un intervalle confortable.

Si l'augmentation du débit d'eau peut favoriser l'échange thermique du système, l'accroissement des pertes de charges rendrait aussitôt le système énergétiquement déficitaire. Une valeur comprise entre 0.1 et 0.2 l/s semble être optimale.

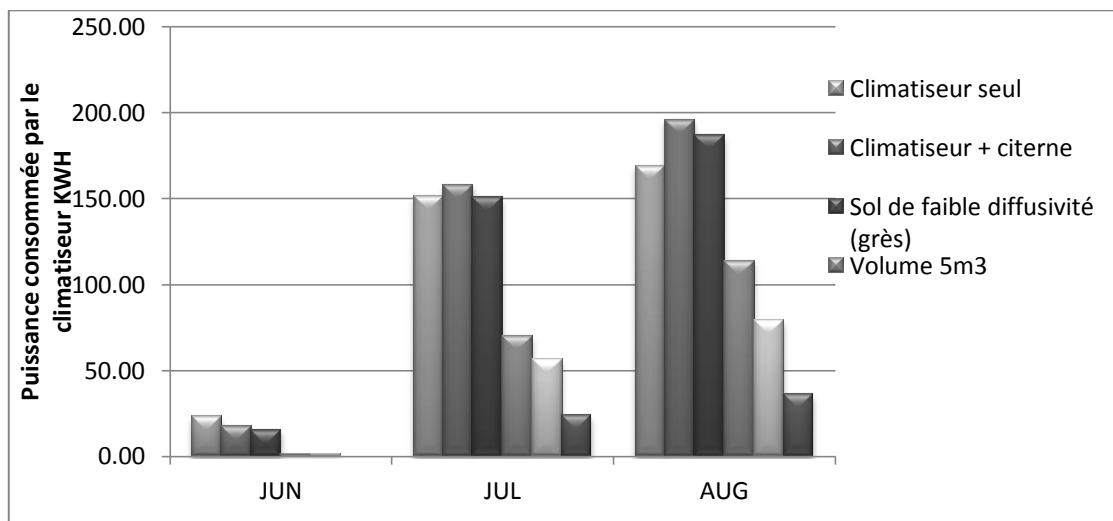


Figure 3 : Etude paramétrique - Influence sur le rendement énergétique du système

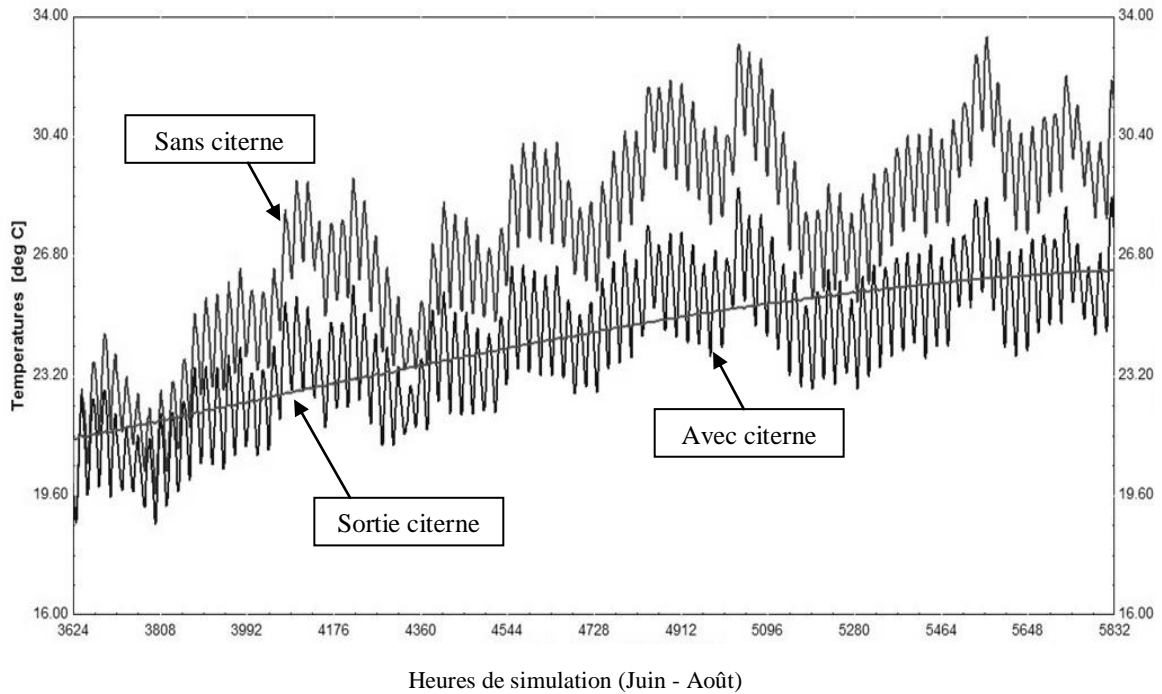


Figure 4 : Evolution de la température de l'air dans la cellule

4.2. Système combiné : Citerne + échangeur air - sol

La mise à contribution de l'échangeur air sol en zinc ancré à 3.5m de profondeur dans les mêmes conditions optimales énoncées précédemment et avec un débit d'air soufflé de 90M³/h donnent lieu aux résultats représentés sur la figure 5. Le puits canadien seul permet à Oran un gain de l'ordre de 40% sur une saison de rafraîchissement, contre une autonomie presque complète dans le cas d'une combinaison citerne et puits canadien.

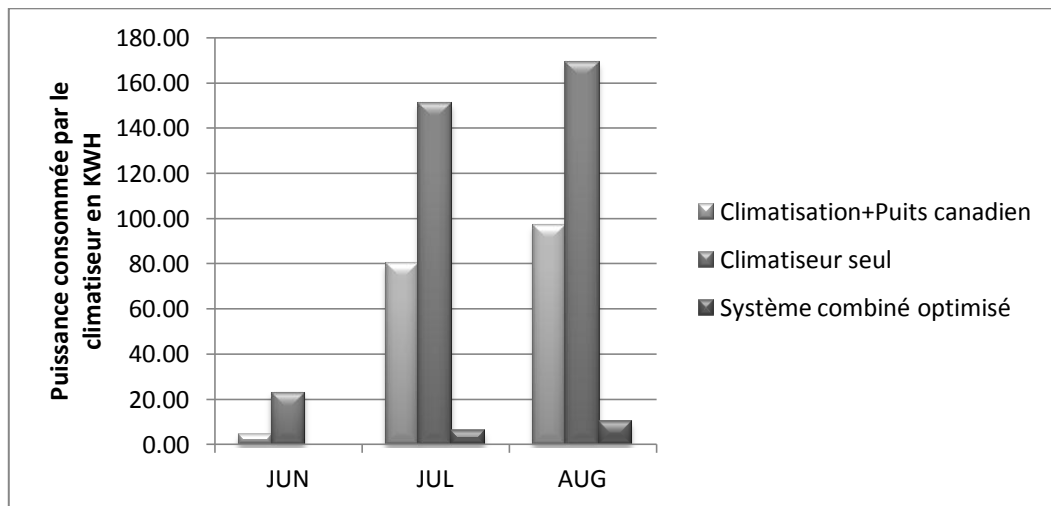


Figure 5 : Consommation énergétique du climatiseur à Oran

Tandis qu'à Béchar le système combiné optimisé offre une couverture de l'ordre de 40% des besoins énergétiques en matière de rafraîchissement (figure 6).

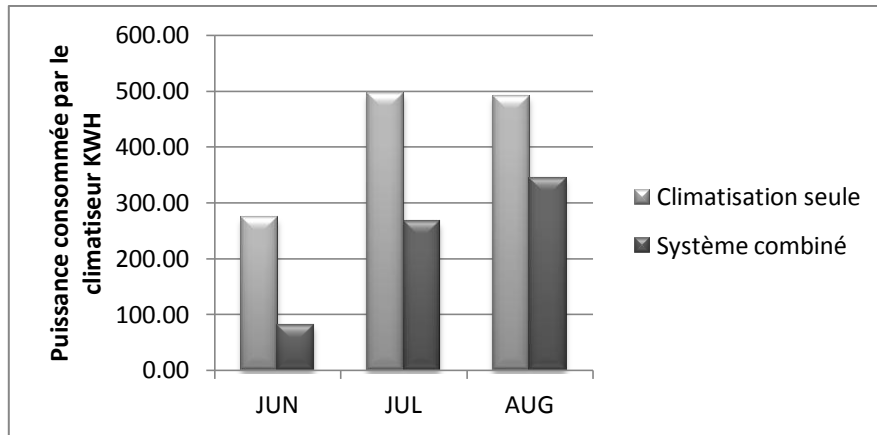


Figure 6 : Consommation énergétique du climatiseur à Béchar

Les tableaux 2 et 3 donnent le gain énergétique net après déduction de la consommation électrique de la pompe liée à la citerne donnée par l'équation (9) et celle du ventilateur statique lié au puits canadien et dont la consommation est de 40W.

Tableau 2 : Efficacité énergétique du système combiné pour Oran

Energie consommée en KWH		Charge de la Climatisation seule	Charge de la climatisation aidée par le système combiné	Climatisation + Ventilation + pompage	Gain énergétique
ORAN	Juin	22.93	0.00	60.00	-161.7%
	Juillet	151.00	6.01	66.01	56.3%
	Août	169.20	10.03	70.03	58.6%

Tableau 3 : Efficacité énergétique du système combiné pour Béchar

Energie consommée en KWH		Charge de la Climatisation seule	Charge de la climatisation aidée par le système combiné	Climatisation + Ventilation + pompage	Gain énergétique
Béchar	Juin	273.60	81.52	141.52	48.3%
	Juillet	495.60	267.20	327.20	34.0%
	Août	491.30	345.10	405.10	17.5%

Il apparait du tableau 2 pour le mois de Juin que le fonctionnement de la pompe et du ventilateur doivent être régulés au risque de pénaliser le système combiné. Le gain énergétique du système commence à décroître dès le mois de Juillet à Béchar en raison de l'accumulation de la chaleur dans le sol occasionnée par la température de l'air extérieur, par l'intensité de l'ensoleillement et par le fonctionnement du système lui-même.

Conclusion

La combinaison de ces deux simples systèmes géothermiques superficiels, permet d'avoir un gain énergétique appréciable en matière de rafraîchissement aussi bien en climat sud méditerranéen que saharien. Sous conditions optimales le système peut couvrir la totalité des besoins sous le premier climat et près de la moitié pour le second.

Toutefois, un tel système ne peut trouver d'application avec les règles d'urbanisme actuelles notamment en milieu urbain vu l'espace qu'il nécessite. Il faut en effet compter environ 1m² de terrain nu pour 1m² de bâti à un seul niveau.

Sur la base de l'étude paramétrique menée, on peut énumérer les recommandations suivantes :

1. Réduire en tant que possible l'albédo à la surface du sol, si le système est dédié à la saison estivale seule. Profiter l'effet de masque engendré par les habitations ou par la végétation.
2. Les formes allongées de la citerne sont préférables.
3. L'implantation en sol de faible diffusivité est préconisée.
4. La profondeur de 3.5m donnerait de meilleurs résultats.
5. La régulation thermique est essentielle afin de limiter la consommation électrique des organes de pompage et de ventilation.
6. La température initiale de l'eau a un effet direct sur les premières journées d'exploitation du système. Le recours à une pompe à chaleur est également à étudier afin de minimiser l'envergure du système et de lui assurer une autonomie totale.

Nomenclature

Symbole	Nom, unité		
A	Amplitude annuelle, K	\bar{T}_{st}	Température moyenne du sol à la limite du tube, K
a_s	Diffusivité thermique du sol, $m^2.s^{-1}$	$\bar{T}_{s\delta}$	Température moyenne du sol à la limite de la zone influencée, K
c	Chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	T_w	Température de l'eau, K
D	Diamètre, m	t	Temps, s
g	Accélération de l'apesanteur, $m.s^{-2}$	t_{min}	Jour où la température minimale est enregistrée, jour
h_a	Coefficient d'échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	U	Coefficient d'échange thermique global, $W.m^{-2}.K^{-1}$
J	Pertes de charge totales, mce	u_x	Fonction numérique
L	Longueur, m	V_a	Vitesse de l'air, $m.s^{-1}$
m	Masse, kg		
Pf	Profondeur, m	Symboles grecs	
Q_a	Débit d'air, $m^3.s^{-1}$	δ	: Profondeur de pénétration du signal thermique [m]
Q_w	Débit d'eau, $m^3.s^{-1}$	λ_s	: Conductivité thermique du sol [W.K ⁻¹ .m ⁻¹]
Nu	Nombre Nusselt, -	λ_t	: Conductivité thermique du tube [W.K ⁻¹ .m ⁻¹]
P_{pompe}	Puissance consommée par la pompe, W	ρ	: Masse volumique [Kg/m ⁻³]
Pr	Nombre de Prandtl, -	η	: Rendement global de la pompe [%]
R	Résistance thermique, $K.m^2.W^{-1}$	ρ_a	: Masse volumique de l'air [kg.m ⁻³]
Re	Nombre de Reynolds, -	Γ	: Frontière.
r	Rayon, m	Ω	: Champ bidimensionnel.
r_i	Rayon interne, m		
S	Surface, m ²		
T	Température, K		
T_a	Température d'air moyenne par segment, K		
T_e	Température d'air moyenne à l'entrée du segment, K		
T_s	Température du sol, K		

Références

- [1] N. Gacem, Etude expérimentale de l'efficacité énergétique d'une citerne d'eau enterrée dans le sol pour le conditionnement climatique des locaux. Mémoire de magistère, USTO, Oran, Pages 20-163, 2012.

- [2] S. Thiers, Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive. Thèse de Doct., Ecole des mines, Paris, pages60 - 65, 2008.

- [3] K. Dehina, Etude des performances énergétiques et optimisation d'un échangeur Air-sol par analyse numérique. Mémoire de magistère, USTO Oran, pages 42-48, 2010.

- [4] T. Kasuda and Archenbach, P.R. "Earth Temperature amd Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States", ASHRAE Transactions, Volume 1, 1965.

- [5] Incropera & al, Fundamentals of heat and mass transfer. Sixth edition, Wiley édition, page 513.

- [6] A. Lencastre & A, Hydraulique générale. Editions Eyrolles. 1999

- [7] J. Padet, Echangeurs thermiques. Editions Masson, paris, pages 58-87, 1994.

- [8] I. Danaila et al, Introduction au calcul scientifique par la pratique. Editions Dunod, Paris, 2008.