



Étude Expérimentale De L'efficacité Énergétique D'une Citerne Enterrée Dans Le Sol Pour Le Conditionnement Climatique Des Locaux

Nadhir GACEM^a, Aberrahmane MOKHTARI^a, Hakim TENNAH^a, Sayeh MENHOUDJ^a, Karim DEHINA^a

^a*Département de Génie civil, Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf d'Oran, USTO Algérie*

gacem.nadhir@yahoo.com.

Résumé : Nous présentons dans ce travail une étude expérimentale d'un système géothermique implanté dans le campus universitaire USTO/MB. Le dispositif est constitué d'une citerne enterrée, d'une cellule d'essai équipée d'un plancher hydraulique réversible. Une métrologie a été mise en place pour mesurer la température à différents niveaux du système (sol, citerne, circuit hydraulique et cellule d'essai). Les résultats obtenus sur une campagne de mesure effectuée sur vingt mois, nous ont permis de tirer des lois de comportement énergétique du système. Sur l'environnement TRNSYS, nous avons établis un modèle de stockage saisonnier où les résultats ont fait l'objet de validation avec ceux obtenus par expérience.

Mots clés :

Citerne enterrée ; Stockage saisonnier ; Système géothermique ; Sol ; Rafraîchissement ; Cellule d'essai.

1. Introduction

Alors que les réserves des sources d'énergies fossiles terrestres en voie d'épuisement accaparent l'attention de tous, on commence tout juste à s'intéresser à une forme d'énergie durable et exempte d'émissions polluantes qui se trouve juste à côté : la chaleur terrestre. Jusqu'à présent, les technologies d'exploitation de la chaleur terrestre servaient principalement à produire de la chaleur pour des immeubles [1], bureaux ou habitations, pour des serres, pour le chauffage de chaussées et pour divers procédés industriels [2]. Le défi énergétique pour l'Algérie, confrontée à une croissance de sa consommation électrique parmi les plus élevées au monde [3], la consommation finale du secteur résidentiel a atteint 6 millions de tep en 2005, Le parc logement est de 5 745 645 dont 62% urbain. La consommation électrique du secteur résidentiel a atteint 807 K Tep, elle représente 38% de la consommation totale d'électricité. Ainsi, il représente le premier secteur grand consommateur d'énergie électrique au niveau national.

2. Systèmes géothermiques

Thiers et Peuportier [4] ont simulé un bâtiment passif situé en Picardie équipé d'un échangeur air-sol, d'un récupérateur sur air vicié, d'un chauffe-eau solaire et d'une pompe à chaleur d'appoint pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Les simulations réalisées montrent une amélioration substantielle des performances du bâtiment par rapport à un bâtiment de niveau de performance réglementaire. Le confort thermique peut y être préservé en toute saison à l'aide de mesures appropriées (protections solaires, ventilation, inertie thermique). Plus particulièrement, en été, les protections solaires, l'échangeur air-sol et la sur-ventilation nocturne constituent des solutions efficaces pour éviter la surchauffe. Derradji et Sahnoune [5] ont mis en exergue une méthode permettant la ventilation et le rafraîchissement naturel pour les régions à climat chaud. La ventilation naturelle directe ne peut être employée comme stratégie de contrôle passif à moins que l'air d'admission soit pré refroidi, de ce fait, le mouvement d'air est généré à l'intérieur de l'espace par des cheminées solaires couplées à des conduits de refroidissement souterrains. Dans le même contexte Mebarki [6] a lui aussi étudié les performances énergétiques d'un échangeur air-sol, d'où il a tiré des recommandations sur la profondeur de fouille et le diamètre maximal du conduit, d'autant qu'une stratégie de drainage permettant l'humidification du sol entourant l'échangeur. Dhina et Mokhtari [7] ont amélioré le rendement énergétique des échangeurs air-sol, en incorporant un tube coaxial de plus faible section transportant de l'eau d'irrigation à température constante d'où un échangeur à co-courant. Un tel échangeur, est considéré dans un climat saharien, servant à rafraîchir une maison rurale. Ce système peut trouver des applications intéressantes pour le rafraîchissement en milieu rural en intégrant le réseau d'irrigation dans le système, comme pour tout autre cas de figure où l'on dispose d'un débit d'eau assez régulier et dont la température est meilleure que celle de l'air extérieur. Gan [8] a conçu un système de stockage dans le sol basé sur la récupération des eaux de pluies. Les premiers résultats obtenus par Gan touchés l'efficacité le type d'échangeur utilisé, où il a pu déduire que le réservoir de stockage doté d'échangeur à ailettes est plus efficace que celui qui ne comporte pas d'ailettes, où ces dernières permettent d'élargir le champ de la température autour du réservoir et d'avoir une grande surface d'échange. En allons encore plus loin dans des études paramétriques, Gan a étudié l'influence de la nature des échangeurs, où il a combiné deux matériaux : un échangeur en aluminium et un autre en cuivre. Un système rénovant ; ancien comme origine ; a été exploité

au sud de l'Algérie, Adrar par Amara [9], les auteurs ont utilisé la technique de la Foggara pour le rafraîchissement et le chauffage d'une cellule climatique implantée au sud, qui à l'origine la Foggara est utilisée par les fermiers pour l'irrigation et l'eau potable. L'eau est dirigée sous l'effet de la gravité pour être récoltée dans un petit lac. La particularité de cette technique est que sa construction ne nécessite pas un investissement financier, aussi l'évaporation de l'eau est minimisée au maximum vue que l'écoulement se fait sous le sol. Le système a pu maintenir une température de 21°C durant l'année lors de son couplage avec la cellule climatique.

3. Protocole expérimental

3.1. Cellule d'essai

La cellule expérimentale est située au sud du campus universitaire IGCM, dans la commune d'Es-Sénia, située à 35.65° Nord latitude, 0.62° Ouest longitude et environ 105 mètre altitude au-dessus du niveau de la mer, ayant environs 68 084 résidents. La cellule (Figure 1) ; faite en rez de chaussé ; et compte une surface de 40 m², se compose de deux locaux identiques A et B avec les dimensions intérieures de 4,75 m de longueur et de 3,75 m de largeur, sa hauteur es de 2,70 m.

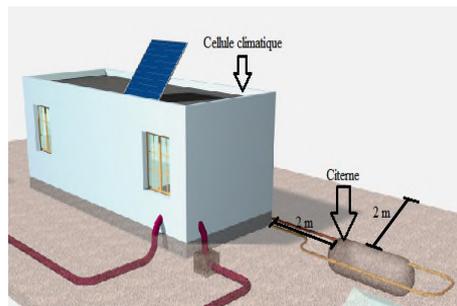


Figure 1 : La cellule d'essai de l'IGCMO.

3.2. Système géothermique et équipements

Le système géothermique occupe une surface de 2 x 2 m² sur la pelouse à l'Est de la cellule d'essai, avec un espacement de 2 m de cette dernière, et est constitué d'une citerne en acier tôle galvanisée de forme circulaire. La citerne est dotée de deux points de puisage, un situé en haut et le deuxième situé en bas de la citerne. Le circuit de distribution est composé de tube en cuivre de diamètre $\phi=22\text{mm}$, et couvert d'une gaine en plastique renforcé qui lui sert de protection, couplé à un échangeur de chaleur à courant parallèle, par l'intermédiaire d'une pompe de circulation SALMSON, qui permet un réglage à trois vitesses d'écoulements, un dispositif de purge y est intégré.



Figure 2 : (a).droite : Capteurs de température dans la citerne ; (b).gauche: Pose de la citerne dans la fouille.



Figure 3 : Photo de la citerne après remblayage.

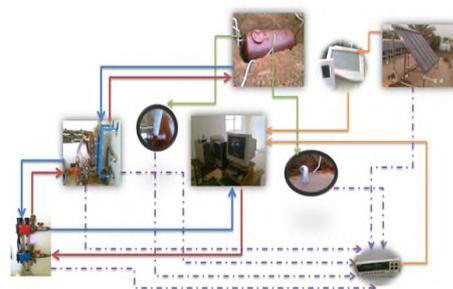


Figure 4 : Schéma fonctionnel du banc expérimental.

Le système géothermique est lié au circuit noyé dans la dalle du local B (plancher chauffant/rafraichissant) par l'intermédiaire des collecteurs prévu à cet effet. Conformément aux types des thermocouples utilisés dans la cellule d'essai par Menhoudj [10], le choix a été porté sur les thermocouples type K, ce type de thermocouple utilisé sera fixé d'une façon permanente sur la surface où s'effectuent les mesures de température. Notre système expérimental comprend 13 points de mesures.

3.3. Déroulement des opérations de mesure

L'eau stockée dans la citerne enterrée dans le sol est puisée par le biais de la pompe de circulation, et dirigée vers le circuit hydraulique noyé dans la dalle du local B par l'intermédiaire des collecteurs, par la suite sera rejetée dans la citerne par un circuit de retour, faisant ainsi un circuit fermé. En parallèle les mesures des températures par les différents capteurs placés sur les points singuliers, sont scannées par la chaîne d'acquisition type Keithley, la température et l'humidité de l'air extérieur sont enregistrées par la station météorologique. La (Figure 4) représente l'organisation du traitement des données.

4. Système géothermique

Le système géothermique doit pouvoir équilibrer la charge thermique de la cellule d'essai, afin de pouvoir maintenir une température de confort durant la saison estivale. De ce fait, l'énergie calorifique stockée dans le système géothermique doit être égale au besoin de rafraîchissement durant la période de fonctionnement du système.

4.1. Justification du volume de la citerne

En se basant sur l'équation (1), nous obtenons :

$$Cap_stockage = Q_{raf} \quad (1)$$

$$Cap_stockage = m \cdot C \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$m = \rho \cdot V \quad (3)$$

$$\Delta T = T_{fi} - T_{fe} \quad (4)$$

En remplaçant l'équation (3) et (4) dans l'équation (2) :

$$Cap_stockage = \rho \cdot V \cdot C \cdot (T_{fi} - T_{fe}) \quad (5)$$

En remplaçant (1) dans (5), le volume du stockage est donné par (6) :

$$V = \frac{Q_{raf}}{\rho \cdot C \cdot (T_{fi} - T_{fe})} \quad (6)$$

4.2. Type 342 (Stockage)

Le type 342 a été employé pour simuler le système de stockage représenté par une citerne dans le modèle de Gacem [11]. Il est capable de simuler le stockage de chaleur dans une cuve cylindrique, une fosse, ou une caverne remplie d'eau et enterrée dans le sol.

4.3. Construction du modèle et simulation

La méthode des différences finies appliquée à la loi de Fourier pour résoudre les équations de conduction de l'écoulement de la chaleur, où les dérivés de temps sont rapprochés par un schéma explicite. Le volume du sol et de stockage sont montés dans une structure cellulaire divisée (maille).



Figure 5 : (a).droite : Maillage par différences finies du stockage ; (b).gauche Dimension et propriétés thermiques de deux mailles adjacentes.

Le flux d'énergie thermique Q passant de la maille 1 à la maille 2 est calculé à partir de l'équation :

$$Q = (T_1 - T_2) \cdot \frac{A}{\frac{\Delta x_1}{\lambda_1} + R_{ins} + \frac{\Delta x_2}{\lambda_2}} \quad (8)$$

La conductance thermique G (W/°C) entre les mailles est calculée à partir de l'équation :

$$G = \frac{Q}{T_1 - T_2} \quad (9)$$

La méthode des différences finies pour traduire la convection est également employée pendant chaque opération dans le volume de stockage pour représenter l'ajout et l'extraction de la chaleur à partir du liquide. ([12] ; [13]).

$$Q = h \cdot A(T_1 - T_f) \quad (10)$$

5. Exploitation et analyse des résultats expérimentaux

5.1. Température et humidité de l'air à l'intérieur de la cellule d'essai

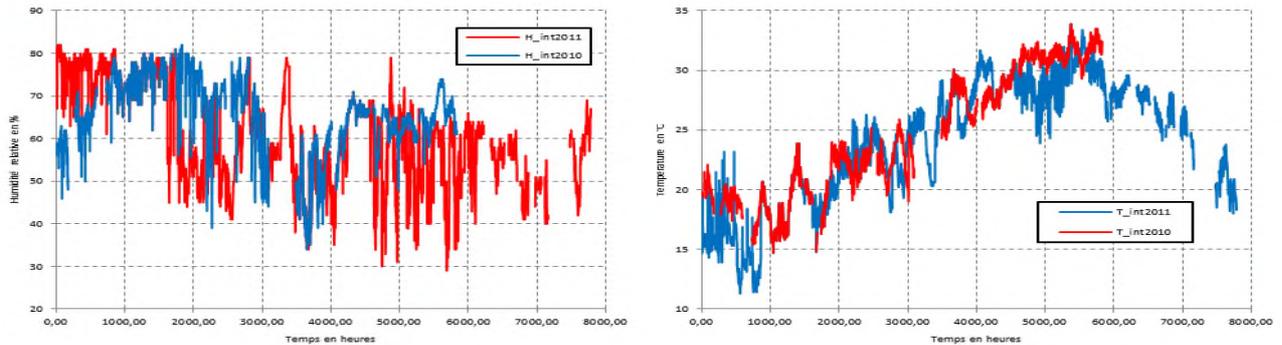


Figure 6: (a) gauche : Humidité de l'air intérieur de la cellule d'essai ; (b) droite : Température de l'air intérieur de la cellule d'essai durant les années 2011 et 2010.

La première mise en opération du système a débuté le 1er Mai 2010 et a duré toute la saison estivale (5 mois), le système a été arrêté le 30 septembre 2010 afin de coupler le plancher réversible et de le valoriser en le branchant avec le capteur solaire, pour un fonctionnement hivernal dans un but de chauffage par énergie solaire. Le premier Mai 2011, le plancher réversible est à nouveau couplé à la citerne (Système géothermique), pour une deuxième mise en opération qui va durer de même pour cinq mois, et arrêter à nouveau le 30 septembre 2011. Dans la période qui s'étale de l'heure 990 à 1500, nous pouvons constater que le différentiel de température est nul, on peut dire que la cellule d'essai est dans un régime établi, et cela coïncide avec la période hivernale de Janvier jusqu'à Mars. Le différentiel de température prend de l'allure et commence à apparaître à partir du mois de Mai et atteint son maximum avec 5°C dans les mois de Juillet et Aout, cela est dû à l'actionnement du système géothermique, où ce même différentiel commence à baisser au mois de Septembre, cette baisse peut être justifiée par l'épuisement du stockage de l'énergie dans la citerne. Le différentiel reprend une valeur de 0°C dans les derniers mois de l'année, à savoir Octobre jusqu'à Décembre, période d'arrêt du système géothermique.

5.2. Température de l'eau dans la citerne

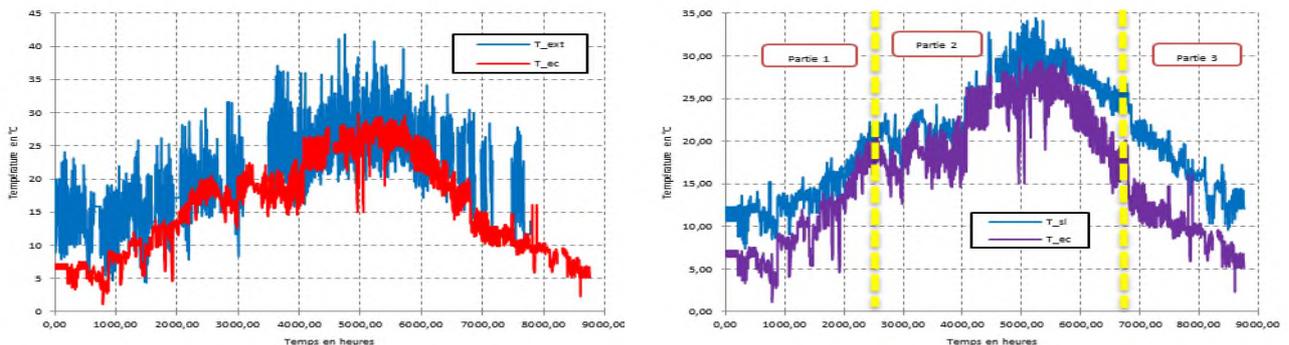


Figure 7: (a) gauche : Température moyenne de l'eau mesurée dans la citerne pour l'année 2011 par rapport à celle de l'air extérieur ; (b) droite: Température moyenne de l'eau mesurée dans la citerne pour l'année 2011 par rapport à celle du sol.

La variation de la température moyenne de l'eau dans la citerne est indépendante de la température de l'air extérieur, cette dernière atteint un maximum de 42°C, la température de l'eau dans la citerne ne dépasse pas les 30°C. Ce qui ne peut pas être dit sur la température de l'air intérieur, où cette dernière influe d'une façon directe sur la température de l'eau dans la citerne. En mode opérationnel du système de la période du 1er Mai au 30 Septembre, l'augmentation de la température à l'intérieur de la cellule provoque une augmentation de la température moyenne de l'eau dans la citerne, la baisse de la première induit une baisse de la seconde. En un aspect général, la température de l'eau dans la citerne évolue d'une façon identique que la température du sol

environnant, mais avec une amplitude moins que celle de la température du sol, d'autant plus un léger déphasage est bien remarqué. Néanmoins, il est important de signaler l'existence de trois parties. La première partie qui se prolonge du 1er Janvier au 1er Mai, où la température de l'eau dans la citerne est située sous la température du sol avec une différence de 7°C en début d'année, cette différence qui commence à baisser en se rapprochant du mois de Mai. La deuxième partie, qui elle est qualifiée par la mise en marche du système et qui se prolonge du 1er Mai au 30 Septembre, où la température de l'eau dans la citerne commence à se rapprocher de la température du sol, mais la différence existe toujours entre les deux températures, égale à 3-4°C. La fin du mois de septembre est qualifiée par une augmentation de cette différence égale à 7°C. Au début du mois d'Octobre cette différence de température demeure constante jusqu'au mois de Décembre, telle est qualifiée la troisième partie.

5.3. Validation du modèle du stockage saisonnier

D'après la (Figures 8), où la confrontation des températures résultantes sèches mesurées et simulées dans la cellule d'essai, il apparaît que les deux températures se rapproche avec un écart de 2°C, constaté dans les valeurs moyennes. Ces écarts de température constatés entre le modèle simulé et les résultats expérimentaux peuvent être causés par les perturbations thermiques qui affectent la cellule d'essai pendant la période de rafraîchissement, ces perturbations sont liées au fonctionnement de la chaîne d'acquisition qui peut dégager de la chaleur par son fonctionnement, aussi par l'ouverture de la porte d'accès à la cellule elle-même. L'erreur entre le modèle et les résultats expérimentaux ne dépasse pas les 3%.

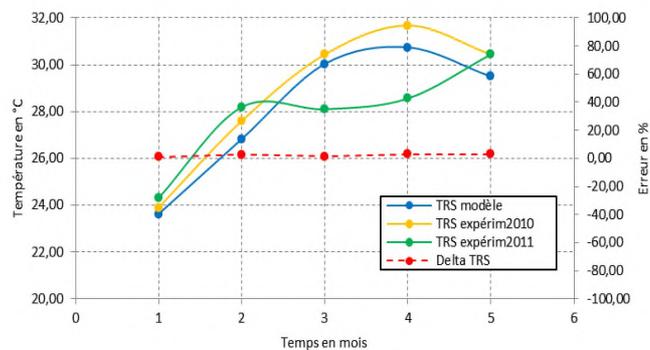


Figure 8 : Validation expérimentale du modèle de la citerne par les TRS.

6. Formulation de l'efficacité énergétique du système géothermique

L'efficacité énergétique est reconnue comme le rapport entre la puissance englobant les besoins de rafraîchissement dans le local et la puissance délivrée par le système pendant toute la période de fonctionnement du système, et donnée par la relation:

$$E_f = \frac{P_{sys} - P_{tot}}{P_{sys}} \cdot 100 \quad (11)$$

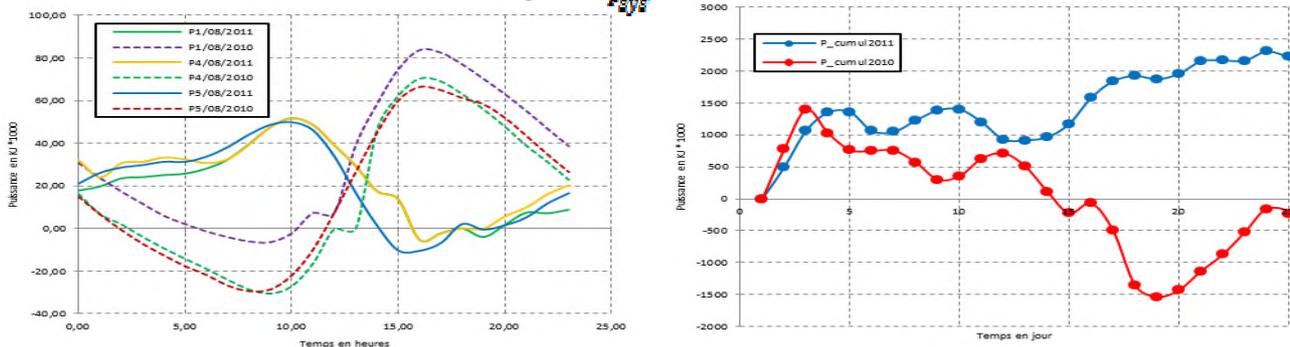


Figure 9: (a) droite : Comparaison de la puissance horaire délivrée par la citerne pendant les journées du 1 ; 4 et 5 Aout 2010 et 2011 ; (b) gauche : Puissance mensuelle cumulée délivrée par la citerne pendant le mois d'Aout 2010 et 2011.

La démarche de calcul est présentée pour un mois, le calcul de l'efficacité énergétique se fait de la même manière pour toute la période du fonctionnement du système. La (Figure 9) représente la puissance calculée pour les trois jours représentatifs du mois d'Aout pour les deux années 2010 et 2011. Le débit maximal est enclenché pour les deux systèmes munis de la pompe, le débit est de 4m³/h. La puissance délivrée par le système sans régulation atteint 80 000 KJ à 16 heures du soir et baisse brusquement vers 20 heures du soir. Tandis que la puissance délivrée par le système muni de la régulation de mise en marche et d'arrêt n'est que de 50 000 KJ mais dure de minuit à 16 heures du soir. La puissance délivrée par le système muni d'une régulation d'arrêt et de

fonctionnement couvre la période de minuit jusqu'à 16 heures du soir (Figure 9), avec possibilité de fonctionnement de 20 heures jusqu'à minuit. Tandis que le système sans régulation ne couvre pas les besoins matinales, mais peut combler les besoins s'étalant dans le temps compris entre 15 heures du soir à 20 heures du soir.

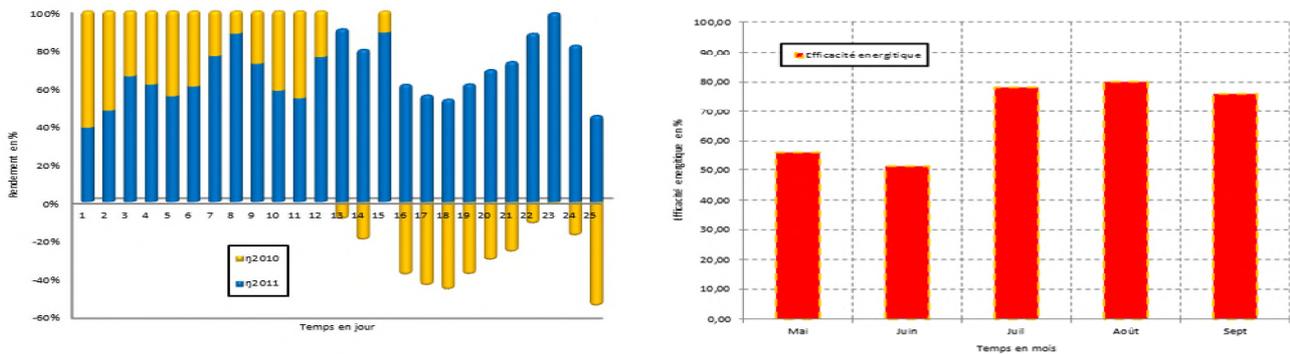


Figure 10: (a) droite : Rendement journalier des deux systèmes pendant le mois d'Aout ; (b) gauche: Efficacité énergétique du système pendant la période de rafraîchissement.

Le rendement des deux systèmes est calculé par rapport à la puissance maximale journalière fournie par le système. Le rendement du système dans l'année 2011 (η_{2011}) varie entre 40% enregistré au premier jour du mois d'Aout et atteint les 100% en fin du mois.

7. Conclusions

Le système géothermique couplé à un plancher rafraichissant intégré dans le bâtiment a pu maintenir une ambiance confortable à l'intérieur de la cellule d'essai, même que ce système a pu prouver son efficacité atteignant les 76%. La température de l'eau dans la citerne subit un léger déphasage par rapport à la température du sol à cause de la capacité thermique du fluide à l'intérieur de la citerne, l'amplitude est plus petite que celle du sol par la résistance du contact entre le sol et la citerne. La température de l'eau dans la citerne ne dépend pas d'une façon directe de la température extérieure, mais beaucoup plus de la température intérieure, et varie en fonction de la puissance extraite par le biais du circuit hydraulique noyé dans le plancher de la cellule d'essai, qui par la suite est injectée dans la citerne. La mise en marche continue du système en 2010 induit une augmentation rapide de la température de l'eau dans la citerne, avec un dysfonctionnement du système, le temps d'arrêt permet une recharge de la citerne du sol pour diminuer sa température. La comparaison entre les deux fonctionnements du système en termes d'efficacité a prouvé qu'un système de régulation est nécessaire pour le bon fonctionnement. Le risque de la condensation en surface du plancher a été éliminé pendant toute la durée du suivi expérimental, où la température de rosée se situe toujours sous la température de surface et cela indique le bon dimensionnement du système planché réversible.

8. Nomenclature

Cap_stockage : Énergie calorifique stockée par le système géothermique en [KJ].

Q_{raf} : Besoins total en rafraichissement en [KJ]. **m** : Masse du liquide du stockage en [Kg].

C: Chaleur massique du fluide de stockage en [KJ/Kg °C].

ρ : Masse volumique du liquide de stockage en [Kg/m³]. **V**: Volume du stock en [m³]

ΔT : Différentiel de température pendant la mise en marche du système géothermique en [°C].

λ_i : Conductivité thermique de la maille i en [W/m°C]. **Δx_i** : Longueur de la maille i en [m].

R_{ins} : Résistance entre le volume du stockage et le sol en [m² °C /W]. **A** : Surface de la maille i en [m²].

h : Coefficient de convection moyen en [W/m²°C]. **T_f** : Température du fluide en [°C].

9. Références bibliographiques

[1]: Riederer,P. Evers,G. Gourmez,D. Jaudin,F. Monot,P. Partenay,V. Pincemin,S. et Wurtz,E., «Conception des fondations géothermiques», Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Pole Énergies Renouvelables, Rapport d'étude, N° 7, Septembre 2007,P 1-P170.

[2]: Clauser, C., Geothermal Energy, In: K. Heinloth (Ed), Landolt-Börnstein, Group VIII: Advanced Materials and Technologies, Vol 3: Energy Technologies, Subvol.C: Renewable Energies, Springer Verlag, Heidelberg-Berlin, 2006, P 493-604.

[3]: Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie, «Consommation énergétique finale de l'Algérie», Ed 2007, Hydra, Alger, Algérie, 2007.

- [4]: Thiers, S et Peuportier, B., «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, France, avril 2007, 8 Pages.
- [5]: Derradji, M et Sahnoune, T., «conception et modélisation de système de ventilation et de rafraîchissement naturel pour les régions a climat chaud», Sciences & Technologie D, N°27, Juin 2008, P 9-16.
- [6]: Mebarki, B. Draoui, B. Abdessemed, S. Keboucha, A. Drici, S. et Sahli, A., «Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar», Revue des Energies Renouvelables, Vol 15, N°3, 2012, P 465-478.
- [7]: Dehina, K. et Mokhtari, AM., «Simulation numérique d'un échangeur air-sol-eau à co-courant», XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012, 9 Pages.
- [8]: Gan, G., Riffat, S B and Chong, C S A., «A novel rainwater ground source heat pump-Measurement and simulation», Applied Thermal Engineering, Vol 27, 2007, P 430-441.
- [9]: Amara, S., Nordell, B and Benyoucef, B., «Using fougara for heating and cooling buildings in sahara», Energy Procedia, Vol 06, 2011, P 55-64.
- [11]: Gacem, N., «Etude expérimentale de l'efficacité énergétique d'une citerne d'eau enterrée dans le sol pour le conditionnement climatique des locaux», Mémoire de Magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie, 183 Pages.
- [12]: Incropera., Dewitt., Bergman and Lavine., «Fundamentals of Heat and Mass Transfer», Sixth Edition, 2007, P 1-999.
- [13]: Solar Energy Laboratory., «TRNSYS 16 Mathematical Reference», Volume 5, University of Wisconsin Madison, 2004.