

Modélisation de la température en profondeur du sol pour la région d'Adrar - Effet de la nature du sol

M. Benhammou¹ et B. Draoui²

¹ Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien
BP 478 Route de Reggane, Adrar, Algérie

² Laboratoire de Physique & Dispositifs à Semi-conducteurs,
Université de Béchar, Algérie

(reçu le 02 Février 2011 – accepté le 20 Juin 2011)

Résumé - Vu le développement industriel et socioéconomique que connaissent plusieurs pays en voie de développement entre autres, l'Algérie, la demande en énergie est en pleine croissance. Les énergies conventionnelles d'origine fossile sont très polluantes et en voie de disparition dans quelques décennies. De ce fait, le recours aux énergies renouvelables est une bonne alternative, car ces énergies sont très économiques, disponibles en permanence et conservatrices de l'environnement. Une de ces énergies est la géothermie qui consiste à extraire les calories emmagasinées dans le sol, soit pour la production du chauffage dans les saisons froides, soit pour la production du froid dans les saisons chaudes. La détermination de la température en profondeur du sol nécessite la connaissance de la nature du sol. Comme cette dernière est souvent prise par défaut, il est donc important d'étudier son influence sur la température en profondeur du sol, ainsi que sur le déphasage et la profondeur de pénétration du signal de température. Dans ce contexte, on a réalisé cette étude sous les conditions météorologiques de la ville d'Adrar. Les résultats obtenus nous indiquent que la profondeur de pénétration annuelle de même que le déphasage sont beaucoup influencés par la nature du sol, alors que la température moyenne de la surface du sol y est insensible.

Abstract - The demand on energy is increasing because of the industrial and socioeconomic development that known many countries in process of development such as Algeria. The conventional energies are pollutant and in addition to that they will disappear in few decades. So the best solution is to exploit the renewable energy because they are economic, not pollutant and permanent. One of these energies is the geothermic which consist to extract the calories stocked in the soil in sight of production of heating in the cold seasons and it can be used to cool in the hot seasons. In this paper, we study, under the meteorological conditions of the town of Adrar, the effect of the kind of soil on the temperature in depth of soil, and also on the depth of penetration and the dephasing. The resultants indicate that the depth of penetration and dephasing are significantly influenced by the kind of soil. But the average temperature of soil surface appears insensitive to the kind of soil.

Mots clés: Géothermie - Profondeur de pénétration - Déphasage - Température du sol - Nature du sol.

1. INTRODUCTION

L'énergie géothermique est l'énergie calorifique stockée sous la surface terrestre. Les profondeurs de la terre recèlent d'énormes quantités de chaleur naturelle, dont l'origine réside essentiellement dans la désintégration d'éléments radioactifs.

Selon les connaissances actuelles, les températures culminent à 6000 °C dans le noyau et atteignent jusqu'à 1300 °C environ dans le manteau supérieur du globe

terrestre. Le flux géothermique qui parvient à la surface du globe dépasse 40 milliards de kW. Plus de 99 % de la masse de notre terre est soumise à des températures dépassant 100 °C. Le reste, soit 0.1 % de la masse ont des températures inférieures à 100°C. En moyenne, la température augmente à partir de la surface du sol de 3 °C environ par 100 mètres de profondeur, ce qui correspond à un gradient géothermique normal.

La géothermie fait partie des énergies renouvelables. Elle consiste à extraire les calories stockées dans le sol pour la production de l'électricité (géothermie à haute température) ou du chauffage (géothermie à basse température).

De plus, comme la température du sol à partir d'une profondeur donnée est quasi constante durant toute l'année. Donc cette même température peut avoir deux applications différentes, selon qu'elle est plus ou moins élevée que la température ambiante de la saison considérée.

En effet, à l'aide d'un échangeur géo aéraulique efficace, on peut exploiter cette chaleur pour la production du chauffage pendant les saisons froides et pour la production du froid pendant les saisons chaudes. Ainsi, on peut couvrir une bonne partie des besoins énergétiques d'une habitation en chauffage et en climatisation.

Le coût qui intervient dans la réalisation d'une installation géothermique et qui peut apparaître gros est compensé si on imagine que pour une longue période, on va se chauffer et se climatiser avec une énergie gratuite et que notre facture d'électricité sera considérablement réduite.

En revanche, la connaissance du gisement géothermique est un facteur plus que nécessaire pour la construction des installations géothermiques. Pour cela, il est important d'évaluer au préalable le potentiel géothermique de la région à étudier. La température du sol dépend de la profondeur à laquelle est mesurée cette température et des conditions météorologiques du site telles que le rayonnement solaire, la température ambiante et la vitesse du vent. Elle dépend également de la nature du sol et de l'environnement du site comme à titre d'exemple la présence d'un bâtiment au voisinage.

A cause de l'indisponibilité de toutes les données expérimentales de la région d'Adrar notamment celles qui concernent la nature du sol, on a réalisé cette étude afin d'examiner l'influence de ce paramètre sur la température en profondeur du sol.

2. MODELISATION THEORIQUE

2.1 Modélisation de la température en profondeur du sol

Le sol est assimilé à un massif semi infini homogène dont les propriétés physiques sont constantes et indépendantes de la profondeur z , et qui est soumis à un signal sinusoïdal (la température à la surface du sol est notée T_{surf}).

Dans ce modèle, la température à la surface du sol a l'allure d'une sinusoïde donnée sous la forme suivante:

$$T_{\text{surf}}(t) = \bar{T}_{\text{surf}} + \sum_{j=1}^N A_{\text{surf}}(j) \times [\sin(\omega(j) \times t - \varphi_{\text{surf}}(j))] \quad (1)$$

N étant le nombre d'harmoniques et (j) est un nombre entier positif allant de 1 à N . En s'appuyant sur le modèle du massif semi infini, on en déduit la température du sol à une profondeur z et au temps t :

$$T_{\text{sol}}(z, t) = \bar{T}_{\text{surf}} + \sum_{j=1}^N A_{\text{surf}}(j) \times \exp\left(-\frac{z}{\delta[\omega(j)]}\right) \times \sin\left(\omega(j) \times t - \varphi_{\text{surf}}(j) - \frac{z}{\delta[\omega(j)]}\right) + \text{geo} \times z \quad (2)$$

La profondeur de pénétration d'un signal de température de pulsation $\omega(j)$ est donnée en fonction de la diffusivité thermique du sol α_{sol} par la relation suivante:

$$\delta[\omega(j)] = \sqrt{\frac{2 \times \alpha_{\text{sol}}}{\omega(j)}} \quad (3)$$

La pulsation $\omega(j)$ se calcule à partir de la réaction suivante:

$$\omega(j) = \frac{2 \times \pi}{P} \times j \quad (4)$$

P, c'est la période du signal exprimée en secondes et elle s'étend sur une année entière.

Le coefficient geo est le gradient de température dû au flux géothermique. Ce flux est considéré comme uniforme en tout point du sol et dirigé verticalement vers le haut. Le gradient géothermique est pris, par défaut, égal à 0.03 °C.m⁻¹. Cependant si la profondeur est faible, l'effet du gradient géothermique peut être négligé.

2.2 Modélisation de la température à la surface du sol

Faute des données expérimentales de la température de la surface du sol, on va se servir du modèle basé sur le bilan énergétique au niveau de la surface du sol en vue d'en déduire une expression pour sa température. Ce bilan est établi de la manière suivante:

La surface du sol reçoit une quantité d'énergie sous forme de rayonnement du soleil et sous forme de chaleur sensible en échange convectif avec l'air ambiant. Elle perd à son tour une partie de sa chaleur par rayonnement, par conduction et par la convection sous forme de chaleur latente en échange avec le ciel, le sol et l'air ambiant respectivement. Ce qui peut être traduit en équation par l'égalité suivante:

$$Q_{\text{cond}} = (Q_{r_solaire} - Q_{r_sol,ciel}) + (Q_{\text{conv_sensible}} - Q_{\text{conv_latente}}) \quad (5)$$

Q_{cond} est le flux de chaleur transmis par la conduction dans le sol. Elle est déterminée par la formule suivante:

$$Q_{\text{cond}} = \lambda_{\text{sol}} \left. \frac{dT_{\text{surf}}}{dt} \right|_{z=0} \quad (6)$$

Le paramètre λ_{sol} est le coefficient de conduction thermique du sol.

$Q_{r_solaire}$ est la quantité de rayonnement solaire absorbée par la surface du sol. Elle est évacuée en fonction de l'albédo du sol par la relation suivante:

$$Q_{r_solaire} = (1 - \rho_{sol}) \times G \quad (7)$$

$Q_{r_sol,ciel}$ est le flux de chaleur échangé par rayonnement entre la surface du sol et la coûte céleste, il est donné par l'équation suivante:

$$Q_{r_sol,ciel} = \varepsilon_{sol} \times \sigma \times (T_{surf}^4 - T_{ciel}^4) \quad (8)$$

Où ε_{sol} et σ sont respectivement l'émissivité du sol et la constante de Stefan-Boltzman.

$Q_{conv_sensible}$ est le flux de chaleur dû à la convection du vent, il est estimé par la relation suivante:

$$Q_{conv_sensible} = h_{vent} \times (T_a - T_{surf}) \quad (9)$$

avec:

$$h_{vent} = 0.5 + 1.2 \times \sqrt{V_{vent}} \quad (10)$$

$Q_{conv_latente}$ est le flux de chaleur latente dû à l'évaporation au niveau de la surface du sol, Il est évalué par la relation empirique suivante:

$$Q_{conv_latente} = c_{lat} \times f \times h_{vent} \times [(a_{lat} \times T_{surf} + b_{lat}) - HR \times (a_{lat} \times T_a + b_{lat})] \quad (11)$$

HR étant l'humidité relative de l'air, les constantes empiriques sont définies comme suit:

$$a_{lat} = 103 \text{ Pa/K} \quad (12a)$$

$$b_{lat} = 609 \text{ Pa} \quad (12b)$$

$$c_{lat} = 0.0168 \text{ K/Pa} \quad (12c)$$

Le paramètre empirique f dépend de la nature du sol et du degré d'humidité du sol.

Tableau 1: Variation du paramètre f en fonction de la nature du sol

Nature du sol	Paramètre f
Aride	0.1 - 0.2
Sec	0.4 - 0.5
Humide	0.6 - 0.8
Saturé	1

On introduit un nouveau coefficient d'échange équivalent désigné par h_{eq} et qui englobe le flux de chaleur perdu en échange radiatif avec le ciel et le flux de chaleur que la surface du sol reçoit en échange par convection avec l'air ambiant. Cela va rendre linéaire l'équation du bilan thermique par rapport à la température T_{surf} .

$$Q_{conv_sensible} - Q_{r_sol,ciel} = h_{eq} \times (T_a - T_{surf}) \quad (13)$$

2.3 Transformation en série de Fourier

Les moyennes mensuelles de température ambiante de même titre que les moyennes mensuelles du rayonnement solaire global horizontal de la ville d'Adrar sont présentées sur le **Tableau 2**.

Ces données sont transformées en série harmoniques de Fourier comme suit:

$$T_a(t) = \bar{T}_a + \sum_{j=1}^N A_T(j) \times [\sin(\omega(j) \times t - \varphi_T(j))] \quad (14)$$

$$G(t) = \bar{G} + \sum_{j=1}^N A_G(j) \times [\sin(\omega(j) \times t - \varphi_G(j))] \quad (15)$$

T_a et G désignent respectivement la température ambiante et le rayonnement solaire. N indique le nombre d'harmoniques.

En injectant ces deux dernières expressions dans le bilan d'énergie et après avoir fait les simplifications nécessaires, on a abouti à ce qui suit:

$$\bar{T}_{\text{surf}} = \frac{(1 - \rho_{\text{sol}}) \times \bar{G} + h_r \times \bar{T}_a + (h_r - h_e) \times (b_{\text{lat}} / a_{\text{lat}})}{h_e} \quad (16)$$

$$\text{tg}(\varphi_{\text{surf}}(j)) = \frac{(h_{\text{cond}}(\omega(j)) + h_e) \times Y_2(j) - h_{\text{cond}}(\omega(j)) \times Y_1(j)}{-(h_{\text{cond}}(\omega(j)) + h_e) \times Y_1(j) - h_{\text{cond}}(\omega(j)) \times Y_2(j)} \quad (17a)$$

$$A_{\text{surf}}(j) = \frac{Y_1(j) \times \sin(\varphi_{\text{surf}}(j)) + Y_2(j) \times \cos(\varphi_{\text{surf}}(j))}{h_{\text{cond}}(j)} \quad (17b)$$

avec:

$$h_e = h_{\text{eq}} + h_{\text{vent}} \times a_{\text{lat}} \times c_{\text{lat}} \times f \quad (18a)$$

$$h_r = h_{\text{eq}} + h_{\text{vent}} \times a_{\text{lat}} \times c_{\text{lat}} \times f \times \text{HR} \quad (18b)$$

$$h_{\text{cond}}(\omega(j)) = \frac{\lambda_{\text{sol}}}{\delta[\omega(j)]} \quad (18c)$$

$$Y_1(j) = (1 - \rho_{\text{sol}}) \times A_G(j) \times \cos(\varphi_G(j)) + h_r \times A_T(j) \times \cos(\varphi_T(j)) \quad (18d)$$

$$Y_2(j) = -(1 - \rho_{\text{sol}}) \times A_G(j) \times \sin(\varphi_G(j)) - h_r \times A_T(j) \times \sin(\varphi_T(j)) \quad (18e)$$

3. RESULTATS ET DISCUSSION

La ville d'Adrar est située au Sud-Ouest de l'Algérie. Son site est caractérisé par une altitude de 264 m au dessus de la mer, une longitude de 0.17°W, une latitude de 27.53°N et d'un albédo de 35 %. La durée du jour maximum correspondant au solstice d'été est 13 h 46 mn, tandis que la durée du jour minimum correspondant au solstice d'hiver 10 h 14 mn.

Vu l'indisponibilité des données horaires d'une année entière pour la ville d'Adrar, on a utilisé les moyennes mensuelles illustrés dans le **Tableau 2**. Les données de

température ambiante ont été obtenues de la station météorologique d'Adrar. Ces données sont les résultats de dix années d'expérience (1974-1984) ce qui leur donne une grande fiabilité.

En ce qui concerne les données estimatives du rayonnement solaire, elles ont été obtenues de l'Atlas Solaire d'Algérie.

Tableau 2: Données météorologiques de la ville d'Adrar

Mois	Température ambiante moyenne (°C)	Rayonnement Solaire moyen (Wh/m ²)
Janvier	12,1	361,67
Février	15,4	445,50
Mars	19,6	561,67
Avril	24,3	639,67
Mai	28,4	661,17
Juin	34,4	683,5
Juillet	36,5	675,08
Août	36,0	626,00
Septembre	31,8	548,83
Octobre	24,5	454,17
Novembre	17,2	369,17
Décembre	13,2	327,67

Afin d'étudier l'influence de la nature du sol et de la période du signal de température et de rayonnement sur la profondeur de pénétration, on a pris comme période de signal: un jour, une semaine, un mois et une année. On a choisi trois natures de sol, comme il est indiqué sur le **Tableau 3**:

Tableau 3: Nature des sols et propriétés physiques

Nature du sol	Masse volumique (kg/m ³)	Diffusivité thermique (m ² /s)	Capacité calorifique (J.kg/°C)
Argile	1500	9.69×10^{-7}	880
Limon argilo – sableux	1800	6.22×10^{-7}	1340
Sable	1780	3.76×10^{-7}	1390

Les résultats présentés sur la figure 1, nous font apparaître deux choses. Premièrement, on observe que la profondeur de pénétration associée à une période d'une année dépasse les trois mètres (3 m) pour l'argile, mais elle est inférieure de deux mètres (2 m) pour le sable. Cela signifie qu'un sol en argile présente une grande sensibilité aux variations climatiques annuelles en comparaison avec un sol sableux. Il s'ensuit que l'étude de la nature du sol est très essentielle pour la détermination de la température en profondeur du sol.

Deuxièmement, pour les trois sols, la profondeur de pénétration correspondant à une période mensuelle est inférieure de 1 m. Ce dernier résultat nous amène à dire que comme les variations climatiques mensuelles ne sont ressenties que par une couche peu

profonde de la croûte terrestre, on peut utiliser les moyennes mensuelles de la température ambiante et du rayonnement solaire pour évaluer la température du sol à *une profondeur donnée sans craindre que cela ait de grands effets sur l'exactitude de nos résultats.

En outre, la nature du sol semble ne pas avoir un effet sur la température moyenne de la surface du sol (Fig. 2), alors qu'elle a une influence remarquable sur le déphasage (Fig. 3). A titre d'exemple, pour une profondeur de 3 m, le déphasage est de 90 jours pour le sable, tandis qu'il est moins de 60 jours pour l'argile.

Il y a lieu de constater également que le déphasage est inversement proportionnel à la profondeur de pénétration annuelle. En d'autres termes, plus celle-ci est grande, plus le déphasage est petit.

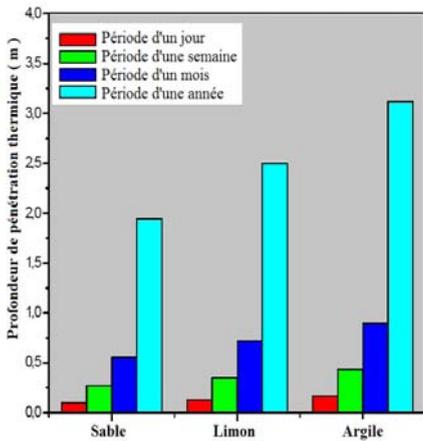


Fig. 1: Profondeur de pénétration thermique en fonction de la nature du sol

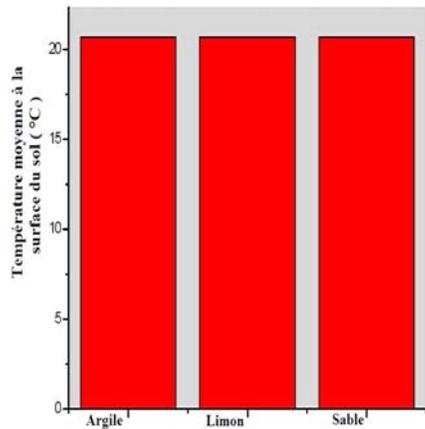


Fig. 2: Température moyenne à la surface du sol suivant la nature du sol

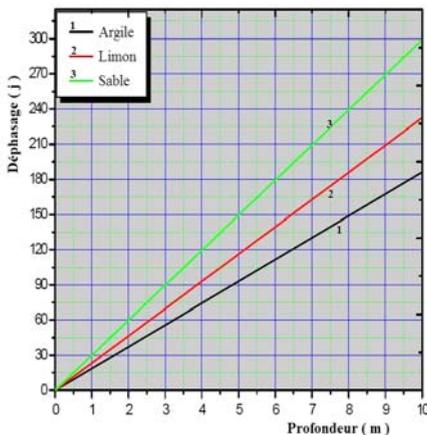


Fig. 3: Variation du déphasage en fonction de la profondeur dans le sol

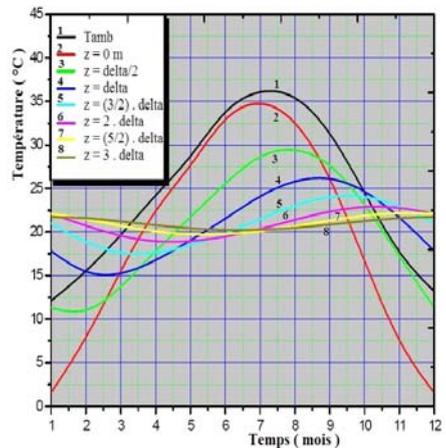


Fig. 4: Variation de Température en fonction de la profondeur du sol

Quant à l'évolution du déphasage selon la profondeur, les résultats illustrés dans la figure 3 nous indiquent que plus on s'enfonce dans le sol, plus le déphasage devient important. Afin que les résultats soient indépendants de la nature du sol, on a pris, dans la figure 4 comme unité de longueur la profondeur de pénétration annuelle.

L'évolution de la température du sol au cours d'une année en fonction de la profondeur dans le sol montre que l'amplitude du signal de température décroît quand la profondeur augmente et au-delà d'une distance valant deux fois la profondeur de pénétration, la température du sol n'a plus la forme d'une sinusoïde et se stabilise autour d'une certaine valeur.

4. CONCLUSION

On a étudié dans ce travail l'influence de la nature du sol sur la température en profondeur du sol pour la ville d'Adrar. Les résultats obtenus nous indiquent que ce paramètre qui est souvent pris par défaut influe beaucoup sur la profondeur de pénétration annuelle et sur le déphasage.

Pour l'argile, on a trouvé que la profondeur de pénétration annuelle dépasse les trois mètres (3 m), tandis qu'elle est égale à peine deux mètres (2 m) pour le sable.

De plus, pour une profondeur de 3 m, le déphasage est de trois mois pour le sable, alors qu'il est moins de deux mois pour l'argile. On a constaté également qu'une température du sol comprise entre 17 °C et 24 °C est obtenue pour une profondeur $z = (3/2) \times \delta$.

Une telle profondeur correspond à une distance de 4,60 m dans le sol sableux et à 2,90 m dans le sol argileux, soit une différence de 1.7 m.

NOMENCLATURE

A : Amplitude	G : Eclairement global horizontal
h : Coefficient transfert thermique, $W/m^2.K$	HR : Humidité relative de l'air
P : Période, s	T : Température, K
V : Vitesse, m/s	t : Temps
z : Distance, m	geo : Gradient géothermique, °C/m
Q_{cond} : Flux de chaleur de conduction, W/m^2	$Q_{r_solaire}$: Flux de rayonnement solaire, W/m^2
$Q_{conv_sensible}$: Flux de chaleur sensible échangé par convection, W/m^2	$Q_{conv_latente}$: Flux de chaleur sensible échangé par convection, W/m^2
$Q_{r_sol,ciel}$: Flux de chaleur radiatif échangé entre le sol et la voûte céleste	G : Moyenne de rayonnement global, W/m^2
T : Moyenne de température, K	N : Nombre d'harmoniques
Symboles grecques	
ω : Pulsation, rad/s	α : Diffusivité thermique, m^2/s
λ : Conductivité thermique, $W/m.K$	φ : Phase initiale, rad
ε : Emissivité	ρ : Albédo
σ : Constante de Stefan-Boltzmann	δ : Profondeur de pénétration, m

Indices

a , ambiante; surf , Surface; T : Température, G : Rayonnement solaire global; Cond. Conduction

REFERENCES

- [1] M. Poulin, '*Modélisation Numérique des Echanges Hydrauliques et Thermiques entre Rivière et Nappe Alluviale*', Revue des Sciences de l'Eau, Vol. 1, N°1-2, pp. 107 – 128, 1984.
- [2] G. Cautenet et C. Boutin, '*Etude Numérique des Flux de Chaleur Sensible et de Chaleur Latente en Relation avec l'Humidité du Sol en Surface sur un Site de Savane Herbeuse*', Atmosphère-Océan, Vol. 26, N°2, pp. 159 – 182, 1988.
- [3] C. Dutertre, P. Rousseau, J. Castaing, R. Coudure et J.G. Cazaux, '*Conditionnement d'Air par Tuyaux Enterrés dans le Sol*', 27^{èmes} Journées de la Recherche Porcine en France, Vol.27, pp. 329 – 336, 1995.
- [4] T. Namèche, J.L. Vasel, '*Bilan Thermique sous Climat Tempéré des Lagunes Aérées et Naturelles*', Revue des Sciences de l'Eau, Vol. 12, N°1, pp. 65 – 91, 1995.
- [5] P. Hollmuler, '*Utilisation des Echangeurs Air-Sol pour le Chauffage et le Rafraîchissement des Bâtiments*', Thèse de Doctorat es Sciences, Faculté des Sciences, Université de Genève, Suisse, 2002.
- [6] T. Zhang and F. Haghighat, '*Simulation of Earth-to-Air Heat Exchangers in Hybride Ventilation Systems*', 9th International IBPSA Conference, Montréal, Canada, August 15-18, 2005.
- [7] L. Guillou-Frotter, '*Les Empreintes Paléo thermiques du Sous-Sol*', Géosciences, Vol. 3, 2006.
- [8] S. Thiers et B. Peuportier, '*Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiments*', Journée thématique SFT-IBPSA, Froid Solaire et Confort d'Eté, Aix –les-Bains, 25 avril 2007.
- 9] Y.L. Beck, S. Palma-Lopez, V. Ferber, C. Fauchard, M. Froumentin, D. Jacquelin et P. Cote, '*Evaluation de l'Etat Hydrique et la Masse Volumique d'un Sol Argileux par des Méthodes Géophysiques Combinés*', 6^{ième} Colloque GEOFCAN, Bondy, France, 25-26 Septembre 2007.
- [10] A. Duinea, '*Modélisation Mathématique du Fonctionnement d'un Echangeur de Chaleur*', Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series, N°32, pp. 187 – 189, 2008.
- [11] S. Thiers and B. Peuportier, '*Thermal and Environmental Assessment of a Passive Building Equipped with an Earth-to-Air Heat Exchanger in France*', Solar Energy 28/9 (2008) 820-831.
- [12] S. Thiers, '*Bilans Energétiques et Environnementaux de Bâtiments à Energie Positive*', Thèse de Doctorat, Centre Energétique et Procédés, ENSMP, 252 p., 2008.

- [13] E.J. Kim, J.J. Roux, G. Rusaouen and F. Kuznik, '*Numerical Modelling of Geothermal Vertical Heat Exchangers for the Short Time Analysis using the State Model Size Reduction Technique*', Applied Thermal Engineering, Vol. 30, N°6-7, pp. 706 – 714, 2010.