



Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables  
The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



# Effet de la variation de l'énergie solaire sur la température dans le sol

S. BEZARI<sup>#1</sup>, A. BELAID<sup>#1</sup>, L. KADIR<sup>\*3</sup>

*# Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa  
B.P. 88 Garat Ettaam, Ghardaïa, Algérie*

<sup>1</sup>bezarisalah@yahoo.fr

<sup>2</sup>b\_fetouh@yahoo.fr

*\*Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER  
B.P. 62 Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie*

<sup>3</sup>lamior@yahoo.fr

**Résumé** — Dans cet article, on présente un modèle semi analytique qui permet le calcul du champ de température pour différentes profondeurs d'un sol nu et ce pour différentes heures d'une journée. Les résultats expérimentaux de température dans le sol permet d'une part que la température du sol reste presque constante après une profondeur mesurée et dépend avec le type du sol et d'autre part que l'étude de température dans le sol en fonction de profondeur peut être augmentée la performance de stockage. Nous nous sommes intéressés à l'évaluation de la réponse du sol pour des sollicitations extérieur (rayonnement solaire, température). Par conséquent, la conductivité thermique du sol peut varier considérablement selon la proportion de ces éléments. Même si le sol présente une teneur uniforme en matière minérale et organique et une porosité constante, sa conductivité dépend de façon marquée de la teneur en eau, à cause de la grande différence entre la conductivité thermique de l'eau et celle de l'air.

**Mots Clés** — énergie solaire, transfert thermique, sol, température

## I. INTRODUCTION

Dans le sol, la transmission de la chaleur dépend des propriétés physiques des particules du sol, de leur degré de compacité et de la teneur en humidité. Le sol étant poreux contenant des quantités variables d'air et d'eau, l'analyse du flux de chaleur dans le sol est beaucoup plus compliquée que dans un corps solide homogène dont la conductivité thermique et la capacité calorifique sont des paramètres établis.

Les propriétés thermiques du sol par exemple la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la variation de la densité en fonction d'autres facteurs comme l'humidité du sol, la taille granulaire du sol et la porosité du sol. Plusieurs auteurs comme (Wierenga et al, 1969, Lettau, 1971) ont développé des modèles analytiques en analysant les propriétés thermiques du sol. Un accueil excellent des méthodes de

calcul des propriétés thermiques du sol sont données par (Farouki, 1986).

Plusieurs modèles pour prédire la température de la surface du sol sont disponibles dans la littérature. La plupart de ces modèles exige un ordinateur et techniques d'analyse numérique (Van Wijk et De Vries, 1963; Wierenga et De Wit, 1970; et Hanks et al, 1971).

Autres sont des modèles à régression et sont spécifiques pour des sites particuliers comme le modèle développé par (Meikle et Tredway, 1979), il y a aussi quelques modèles analytiques disponibles dans la littérature. Ces modèles sont limités aux sols ayant des conditions bien spécifiées. Les modèles analytiques récents sont ceux développés par (Bharadwaj et al, 1982; Krarti et al, 1995; Nebbali et al, 2007).

Dans le présent article, un modèle analytique a été développé pour essayer de prédire la température de la surface du sol à partir des conditions météorologiques et les propriétés du sol à la région de Ghardaïa. Ces modèles ne sont pas conçus pour fournir la température exacte de la surface du sol à un site bien spécifié, de ce fait la température ne peut pas être obtenue sans mesure directe, par contre ces modèles permettent de fournir aux concepteurs et ingénieurs une simple mais une méthode précise pour estimer les variations de la température du sol.

## II. EQUATIONS

Le sol est un milieu semi-infini limité sur sa face supérieure par un plan sur lequel est appliqué un signal de température périodique  $T=f(t)$ . Les caractéristiques thermiques sont connues. Pour le cas d'un sol homogène et isotrope, le bilan thermique sur un élément de volume, donne lieu suivant la profondeur  $Z$ , à l'équation de propagation de la chaleur sans production interne d'énergie qui s'écrit :



$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

#### A. Approche analytique

La résolution de cette équation étant complexe, des méthodes approchées sont [1,2,3]. On admet une distribution de température de type série de Fourier [2]. Les relevés s'effectués par équipe de gisement solaire de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergie Renouvelable (URAER) de Ghardaïa, nous ont permis d'approcher ce signal, en surface du sol (conductivité thermique  $K=2,4$  W/m.k, diffusivité thermique  $a = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s), par une fonction de type série de Fourier.

Les variations périodiques des flux radiatifs à la surface y déterminent des variations de température dont l'extension vers la profondeur obéit à l'équation générale de la propagation des phénomènes périodiques avec amortissement. A tout instant t, la température du sol T (z,t) à la profondeur z se déduit de l'équation suivante :

$$T(z,t) = T_m + T_0 \cdot \text{Re}(e^{[i\omega t - \delta z]})$$

La température à la surface du sol  $T_s$  s'écrit donc :

$$T_s = T(0,t) = T_m + T_0 \cdot \text{Re}(e^{i\omega t})$$

avec

$$\delta = \sqrt{\frac{i\omega}{a}} = \frac{1+i}{D}$$

$$w = \frac{2\pi}{T}$$

$$a = \frac{k_s}{\rho_s \cdot C_p s}$$

$T_m$  : température moyenne de la période considérée ;  
 $T_0$  : amplitude de variation de la température à la surface du sol ;  
 $w$  : fréquence angulaire;  
 $a$  : diffusivité thermique du sol;  
 $D$  : profondeur d'amortissement, variable selon les propriétés du sol et de la périodicité du phénomène considéré

$$D = \sqrt{\frac{2 \cdot a}{w}}$$

Il faut noter qu'à une profondeur  $Z=D$ , l'amplitude de la température est  $1/e=0.37$  fois l'amplitude de la température à la surface. Et à une profondeur  $Z=3D$  l'amplitude est 5% de  $T_0$ , toutes fluctuations ont été éliminées. Pour cette raison la constante D est appelée la profondeur amortissant du sol. Le tableau 1 indique que pour les sols réguliers la variation annuelle se manifeste uniquement à des profondeurs moins de 10m. Ce résultat est encore confirmé par des études conduites à des sites bien spécifiées. (Kindball et al,1972) on reporté que la variation annuel de la température du sol à Warendburg, NY, est en excès égale à 10°C à une profondeur de 50cm et environs 5°C à une profondeur de 3m. (Bligh et Knoth,1982) ont trouvé une variation en excès de 5°C à une profondeur de 4m mais à une profondeur de 14m ils ont montré une variation de 0°C.

#### B. Model analytique

Dans la section précédente, on observait que la connaissance de la température de la surface du sol permettait la prédiction de la température du sol homogène à l'importe quelle profondeur. Le modèle analytique qui sera présenté ci-dessous assume les conditions purement harmoniques. La théorie peut s'étendre facilement à d'autres harmoniques si nécessaire. Le modèle est basé sur l'analyse microscopique du bilan d'énergie à la surface du sol. L'analyse microscopique du mécanisme gouvernant le transfert de la chaleur à l'intérieur du sol est très complexe et le décrire mathématiquement est une tâche très laborieuse. En particulier, la vaporisation est un processus difficile à modéliser depuis que des facteurs comme l'humidité. Heureusement, le traitement microscopique des mécanismes majeurs qui peuvent intervenir à la surface du sol peut donner des résultats plus exploitables en se basant sur les résultats expérimentaux comme sera montré dans le présent article.

$$-k \frac{\partial T}{\partial Z} = R + H + I - E_w$$

Où

$K$  : est la conductivité thermique du sol.  
 $H$  : transfert par convection  
 $I$  : énergie solaire absorbée par la surface du sol  
 $E_w$  : l'énergie liée à la vaporisation d'eau  
 $R$  : énergie solaire incident sur la surface du sol

### III. RESULTAT ET INTERPRETATION

Notre travail consiste tout d'abord à confronter les valeurs mesurées et calculées de l'éclairement solaire incident dans une surface horizontale afin d'estimer la puissance absorbée d'origine solaire. Il s'ensuit qu'une étude a été effectuée pour prédire les températures du sol.



*A. Éclairements d'une surface horizontale*

L'éclairement solaire reçu par sol (en suppose que le sol est un plaque horizontale) varie typiquement de la manière représentée sur les figures précédents au cours d'une journée non-perturbée (zone de Ghardaïa 21 mai 2009) : nul la nuit, il augmente dès le lever du jour pour atteindre un maximum au midi solaire avant de décroître de nouveau jusqu'à s'annuler à la tombée de la nuit.

Les figures (1, 2, 3) montrent le rayonnement (diffus, direct et global) calculé, en considérant la corrélation de Collares-Pereira et Rabl pour un ciel clair et le rayonnement global mesuré sur site de Ghardaïa par l'intermédiaire de pyranomètre EKO.

De chaque figure les deux courbes présentent la même allure mais avec un écart important. Cette différence est probablement due à un ciel relativement couvert durant les journées considérées dans la partie expérimentale.

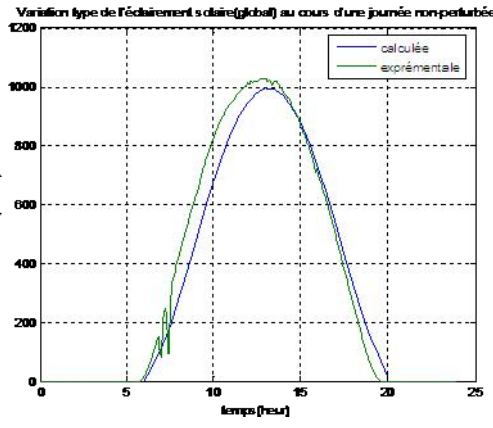


Fig.1 Variation type de l'éclairement solaire au cours d'une journée (Rayonnement global calculée et mesurée)

*B. Variation de la température dans le sol*

La nature de la solution analytique peut être observée en fonction de la profondeur Figure 4. Où du temps Figure 5.

Les figures (a-1,b-1) obtenues avec un programme de MATLAB et le calcul ce fait on même condition initiale. L'analyse de cette graphes peut être remarqué que :

Les graphes de même allure mais la différence ci la valeur de profondeur qui la température reste presque constante. Pour les choix de cette étude (sol sable, terre humide).

Les figures (a-1, b-1) montres la solution cette fois en terme de profils de la température dans le sol en fonction de profondeur à différentes périodes du cycle de variation de la température en surface. Cette figure donne une autre perspective de l'atténuation et déphasage des ondes. Le décalage des températures entre la profondeur et la surface est relié au déphasage des ondes l'enveloppe de variation de température diminue avec la profondeur en relation avec l'atténuation. La figure est assez représentative des conditions typique puisque normalement l'effet des variations de température à la surface du sol n'a plus d'influence au-delà de profondeur mesuré.

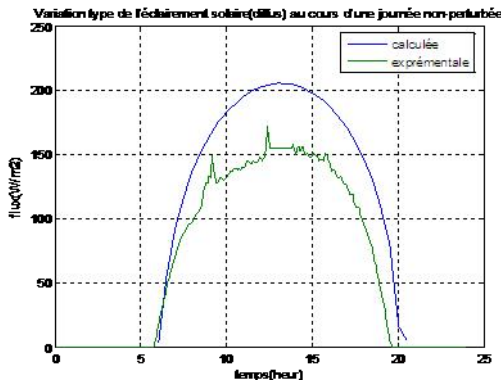


Fig.1 Variation type de l'éclairement solaire au cours d'une journée (Rayonnement diffus calculée et mesurée)

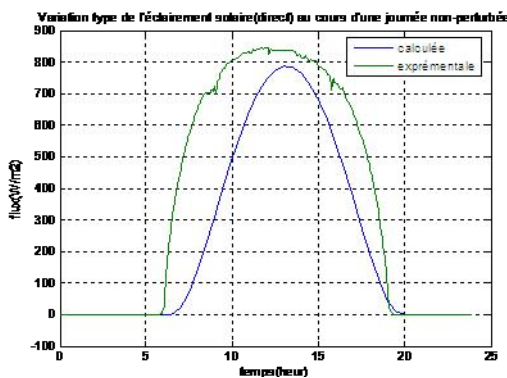
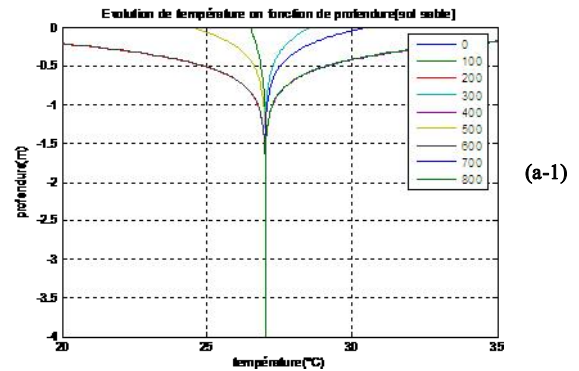


Fig.2 Variation type de l'éclairement solaire au cours d'une journée (Rayonnement direct calculée et mesurée)



(a-1)

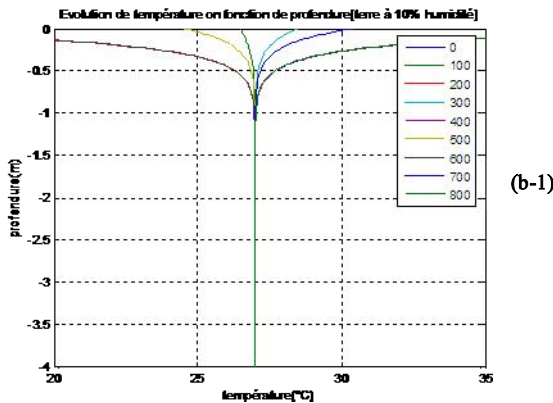
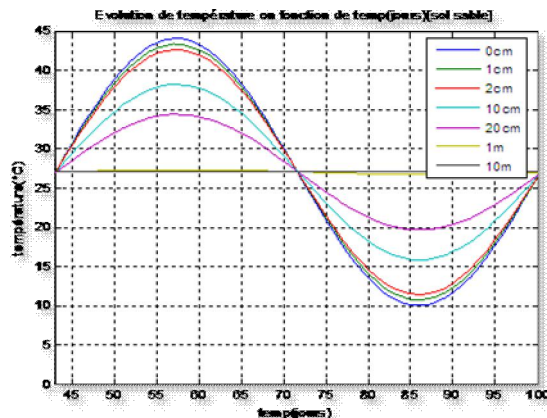


Fig.4 Evolution de la température du sol en fonction de profondeur

Les figures (a-2, b-2) montrent une variation de température sinusoïdale à la surface du sol à. Noté que la période  $P$  (s ou j) d'une onde est reliée à sa fréquence  $\omega$ . Dans cette étude l'onde thermique de surface possède une période de un jour et une amplitude de  $17^\circ\text{C}$  autour d'une valeur moyenne de  $27^\circ\text{C}$ .

Le déphasage entre la température à la surface et celle en profondeur est facilement remarquable en observant le temps auquel la température est maximale ou tout autre point singulier de l'onde. De même, il est évident que les ondes en profondeur sont soumises à des variations moindres de température qu'à la surface. Les ondes en profondeur sont donc atténuées par rapport à en surface.



(a-2)

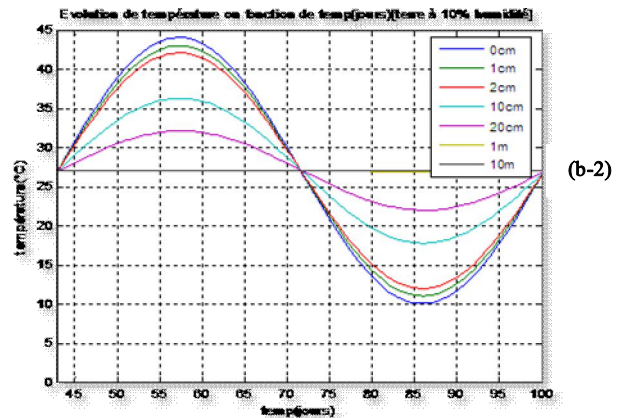


Fig.5 Evolution de la température du sol en fonction du temps

#### IV. CONCLUSIONS

Le principal avantage du sol comme source d'énergie est la stabilité de sa température au cours de l'année. Il est vrai qu'à quelques mètres de profondeur (Nebbali et al, 2007). Les résultats obtenus, montrent que le champ de températures dans la couche superficielle du sol, qui s'étend sur une profondeur de 60 cm, reste sensible aux variations climatiques enregistrées en surface.

(Monteil et al 1991), en présentant un modèle dynamique qui tient compte de l'inertie du sol, montrent que le choix de la valeur de la valeur initiale conditionne la convergence du modèle. Ces pourquoi, pour les besoins de simulations dans un modèle de serre intégrant le sol, ce profil de température peut constituer une condition aux limites et initiale.

L'étude de température dans le sol permet d'une part que la température du sol reste presque constante après une profondeur mesurée et dépend avec le type du sol et d'autre part que l'étude de température dans le sol en fonction de profondeur peut être augmentée la performance de stockage..

#### REFERENCES

- [1] M. Krarti, C. Lopez-Alonzo, D. E. Claridge, and J. F. Kreider, "Analytical model to predict annual soil surface temperature variation," journal of solar energy engineering, vol. 117, pp. 91-99. 2000.
- [2] R. Nebbali, and S. Makhlof, "Détermination de la distribution du champ de températures dans le sol, par un modèle semi-analytique. Conditions aux limites pour les besoins de simulation d'une serre de culture" Revue des énergies renouvelables CER'07 Oujda, pp. 255-258. 2007.
- [3] . Wierenga, D. A. Nielsen, and R. M. Hagan, "Thermal properties of a soil based upon field and laboratory measurements," soil sci, Am Proc, 33. Pp353-360, 1969.
- [4] H. Lettau, "Determination of thermal diffusivity in the upper layers of a natural ground cover" soil sci, 112. 173-177, 1979.
- [5] C. Monteil, G. Issanchou, and M. Amouroux, "Modèle énergétique de la serre agricole," journal de physique III., 429-454, Nov. 1991.
- [6] (A. Mermoud, "Régime thermique du sol" Cours de physique du sol, école polytechnique fédérale de Lausanne, 2006.