
Modélisation d'un corps de chaussée rigide sous sollicitations thermiques en régime transitoire

A.Mammeri^{1,2,3}, L.Ulmet³, C.Petit³, A.Mokhtari²

¹ Faculté des sciences et technologie, Bp 417, Université de Béchar, Algérie.
Mail : Mammeri_ab@yahoo.fr

² Département de Génie Civil, USTOMB, Bp 1505 El Menaouer Oran, Algérie.

³ Groupe d'Etudes des Matériaux Hétérogènes – Equipe Génie Civil et Durabilité, Université de Limoges, boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons, France.

RÉSUMÉ. Ce papier présente une modélisation capable de traiter le problème thermique transitoire incluant le phénomène d'apport solaire sur la surface d'une chaussée rigide, ceci à l'échelle d'un cycle d'une année. Nous présentons dans un premier temps une validation du modèle par comparaison avec une solution analytique, dans le cas d'une variation sinusoïdale de température ambiante. Pour une chaussée réelle sur le site de Béchar (Algérie), nous mettons ensuite en évidence l'importance des paramètres d'ensoleillement et de refroidissement nocturne, à travers l'analyse des profils de températures à différents instants pour différentes profondeurs. L'objectif final est de coupler cette modélisation à une modélisation mécanique capable de simuler l'endommagement et les fissurations.

ABSTRACT. This paper presents a modeling capable of treating the transient thermal problem including the phenomenon of solar contribution on the surface of stiff pavement this on the scale of a cycle of one year. We present at first a validation of the model compared with an analytical solution, in the case of a sinusoidal variation of ambient temperature. For real pavement on the site of Béchar (Algeria), we bring to light then the importance of the parameters of period of sunshine and night-cooling, through the analysis of the profiles of temperatures at the various moments with various depths. The final goal is to couple this modeling with a mechanical modeling capable to predict the damage and the cracking.

MOTS-CLÉS : modélisation thermique, chaussée, température, béton, transitoire.

KEY WORDS: thermal modelling, pavement, thermal, concrete, transient.

1. Introduction

Les structures routières sont parfois soumises à des variations dimensionnelles répétées d'origine thermique générant des sollicitations pouvant être préjudiciables à leur durabilité. Les méthodes de dimensionnement autour du 45^{ème} parallèle (en France notamment) négligent ce type de sollicitations devant celles de trafic. Cependant, il existe des régions où les sollicitations thermiques sont prépondérantes [BIS 72], [Al-Abdul 94] ; les régions arides avec un climat désertique en font partie.

Les chaussées routières rigides ont en commun des mécanismes de fissurations d'origines diverses. Les sollicitations thermiques et le trafic sont à l'origine de ces désordres, mais la nature de ces derniers va varier en fonction de chaque type de structure. Cette variation de température journalière et saisonnière de la région de Béchar étudiée a une particularité : parfois la température dépasse facilement les 50°C à l'ombre en été [MOK 2008].

2. Etat de l'art

L'influence de la température sur les chaussées reste un domaine encore beaucoup discuté. Pour cela, de nombreuses recherches ont été réalisées, sur la distribution de la température dans les corps de chaussées pour caractériser la température de surface [SOL 93], [BRA 80], ou encore sur l'impact de l'effet thermique sur les chaussées d'une manière très simplifiée [REZ 97], [WIL 77], ou plus complète mais sur des séquences courtes [HER 2000], [YIN 2011].

3. Objectif de l'étude

L'originalité de cette étude réside dans la prise en compte de l'effet de refroidissement nocturne, qu'est un paramètre non négligeable dans ces régions à faible nébulosité. Ici, il s'agit d'élaborer un modèle numérique en élément finis, à l'aide du logiciel (Cast3M), capable de traiter le problème thermique transitoire incluant le phénomène d'apport solaire sur la surface de chaussée, ceci à l'échelle d'une durée d'un an. Nous présentons ici deux parties d'analyse : la première consiste à valider l'approche numérique par comparaison avec une solution analytique. Le cas traité est un milieu semi infini, supposé homogène, et soumis en surface à un échange convectif avec une ambiance dont la température est fonction sinusoïdale du temps. La deuxième partie consiste à modéliser un corps de chaussée réel (Figure 1.) soumis simultanément à des évolutions de températures ambiantes et de flux solaire incident, extraites d'un fichier de données climatiques de zone aride (Béchar, Algérie) [TRNSYS version 16]. Dans cette partie, nous mettons en évidence l'importance des paramètres d'ensoleillement et le refroidissement nocturne par rayonnement vers le ciel.

4. Formulation du problème

On considère un corps de chaussée rigide composé de trois couches (dalle en béton, grave ciment et sol d'assise), soumis à différents phénomènes modélisés, comme le montre la figure ci-dessous.

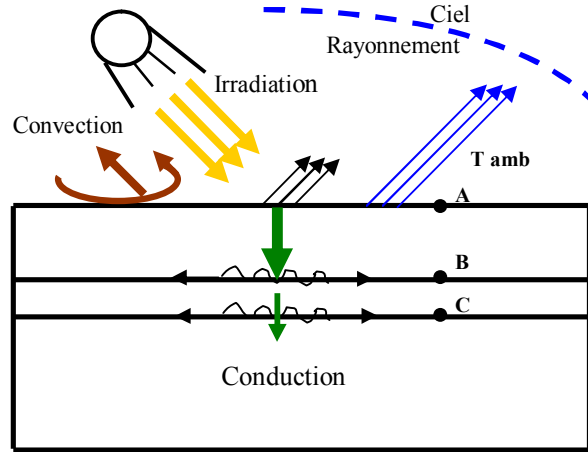


Figure 1. Inventaire des flux échangés sur un corps de chaussée

4.1. Conduction transitoire

Dans un régime transitoire, le transfert de chaleur est régi par l'équation générale suivante où la température T (°C) est définie en tout point de l'espace et à tout instant t (s) par :

$$\Delta T = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad [1]$$

Dans cette équation $a = \frac{\lambda}{\rho C}$ est la diffusivité thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), λ la conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), ρ la masse volumique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), C la chaleur spécifique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), et Δ l'opérateur laplacien.

Ces paramètres ont été documentés par les travaux [YIN 2011], [CHU 2009].

4.2. Convection

C'est le transfert de chaleur entre la surface du corps de chaussée et l'air, qui est régi par la loi de Newton :

$$\varphi_{con} = h(T_s - T_{air}) \quad [2]$$

où T_s La température de surface (°C) et T_{air} la température de l'air (°C).

h est le coefficient d'échange convectif ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). L'examen des vitesses d'air du fichier de données climatiques conduit à considérer des conditions de convection forcée durant toute la période. h dépend des nombres de Reynolds (Re), Prandtl (Pr) et la conductivité thermique d'air (K_{air}), par la fonction suivante [YIN 2011]:

$$h = 5.6 + 0.332 \cdot Re^{-0.5} Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{K_{air}}{L} \quad [3]$$

où $K_{air} = 0.027 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$; $Pr = 0.7$; $L = 0.15\text{m}$ et le nombre de Reynolds

$$Re = \frac{V.L}{\nu} \quad [4]$$

$\nu = 16.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, représente la viscosité cinématique d'air. Considérant la très grande variabilité de la vitesse d'air V , nous avons retenu une valeur annuelle moyenne de 4.53 m.s^{-1} , ce qui conduit à une valeur de h égale à $16.53 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

4.3. Rayonnement

4.3.1. Irradiation solaire

Il s'agit d'un rayonnement de courtes longueurs d'ondes (CLO) d'origine solaire, présentant une composante de flux direct, et une autre de flux diffus. Dans cette partie, on s'intéresse à la modélisation du rayonnement solaire incident sur un plan horizontal par ciel clair. Dans la littérature, il existe plusieurs modèles parmi lesquels on peut citer le modèle de r.sun [Hof 2002] qui donne pour un ciel clair les deux valeurs de rayonnement (direct et diffus) séparément, ou encore celui de Capderou [CAP 87] qui reste le plus utilisé en Algérie [YET 2009]. Les données climatiques pour les zones arides montrent évidemment des profils d'irradiation très proches des courbes théoriques, en raison de la faible nébulosité. Le rayonnement incident est partiellement absorbé par la surface du sol. Le coefficient d'absorption $\alpha = 1 - \text{Albédo}$ retenu dans notre étude est égal à 0.6 [DEN 2010].

4.3.2. Rayonnement vers le ciel

Cet échange radiatif avec la voute céleste, qui s'effectue par grandes longueurs d'ondes (GLO) est donné par l'expression suivante :

$$\phi_{irr} = \varepsilon.\sigma.(T_s^4 - T_{ciel}^4) \quad [5]$$

Le coefficient d'émissivité de la surface du sol ε est pris égal à 0.95 pour le béton, σ est la constante Stefan Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$), T_{ciel} est la température équivalente de rayonnement du ciel (K). Nous citons ci-après le détail de calcul de cette température [TRNSYS version 16]. Elle est dépend de l'humidité, de la température ambiante d'air, du facteur d'aspect nuageux du ciel et de la pression atmosphérique locale. Elle a l'expression suivante [MAR 84] :

$$T_{ciel} = T_{air}(\varepsilon_0 + 0.8(1 - \varepsilon_0)C_{cover})^{0.25} \quad [6]$$

où ε_0 représente l'émissivité du ciel clair. Elle dépend de l'humidité de l'air par le biais de la température de rosée (T_{sat}) par la relation suivante [MAR 84] :

$$\varepsilon_0 = 0.711 + 0.005 \times T_{sat} + 7.3 \times 10^{-5} \times T_{sat} + 0.013 \times \cos\left(2\pi \frac{\text{temps}}{24}\right) + 1.2 \times 10^{-5} (P_{atm} - P_0) \quad [7]$$

où P_{atm} représente la pression atmosphérique au lieu considéré (hPa), P_0 la pression atmosphérique au niveau de la mer (1024 hPa) et temps l'heure solaire.

C_{cover} représente le facteur de couverture nuageuse du ciel et si les données météorologiques n'incluent pas cette donnée, ce paramètre peut être déterminé selon l'équation suivante [KAS] :

$$C_{cover} = \left(1.4286 \frac{E_{Dif}}{E_{Glob,H}} - 0.3 \right)^{0.5} \quad [8]$$

E_{Dif} représente le flux diffus et $E_{Glob,H}$ est le flux de radiation total reçu par une surface horizontale. La valeur nocturne de C_{cover} peut être prise égale à la valeur moyenne de l'après-midi.

4.4. Modélisation numérique par éléments finis

La méthode numérique par le code Cast3M fait appel à un schéma transitoire implicite (« theta méthode »), non linéaire afin de tenir compte des équations de rayonnement. Le calcul porte sur une succession de plusieurs années identiques. Les conditions aux limites appliquées sur la surface peuvent être une combinaison des cas suivant :

- Echange convectif avec une température d'air variable dans le temps,
- Imposition d'un flux de chaleur variable d'origine solaire (irradiation),
- Echange radiatif avec un environnement situé à l'infini.

La condition limite imposée en profondeur, à la limite inférieure du sol, est un flux nul (gradient géothermique négligé).

5. Résultats et discussions

Nous présentons ci-dessous les résultats numériques de trois types de phénomènes modélisés.

5.1. Phénomène de transfert thermique conductif et convectif

Dans cette première modélisation, nous supposons que le corps de chaussée est homogène, semi infini et soumis uniquement à un échange convectif avec une température ambiante fonction sinusoïdale du temps, de période de $T=24$ h et d'amplitude $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$. L'étude porte sur trois cycles successifs, afin de comparer les résultats de la variation de température aux points (A, B, C) avec la solution analytique donnée par la formule suivante [YEZ 88]:

$$\theta(x,t) = \frac{\theta_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x} \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x - \beta\right)}{\sqrt{\left(1 + \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \frac{\lambda}{h}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\omega}{2a}} \frac{\lambda}{h}\right)^2}} \quad \text{avec} \quad \beta = \text{Arctg} \left(\frac{\sqrt{\frac{\omega}{2a}} \frac{\lambda}{h}}{1 + \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \frac{\lambda}{h}} \right)$$

où $\omega = 2\pi/T$ représente la pulsation en (rad. s^{-1}), et β le déphasage entre le maximum de la température de surface et le maximum de température d'air en (rad).

Dans la figure ci-dessous, on représente la variation de température en surface du corps de chaussée ($x=0$ m) et à des profondeurs correspondant à la position des deux interfaces ($x=0.30$ m et $x=0.46$ m), par l'approche analytique et par la solution numérique. Les effets de déphasage et d'amortissement, augmentant en

fonction de la profondeur, apparaissent clairement. Nous remarquons que les résultats du modèle sont très proches des valeurs analytiques. L'exactitude est de l'ordre de 96% en surface, 95% en premier interface et 92% en deuxième. L'influence des conditions initiales arbitraires devient négligeable dès le troisième cycle.

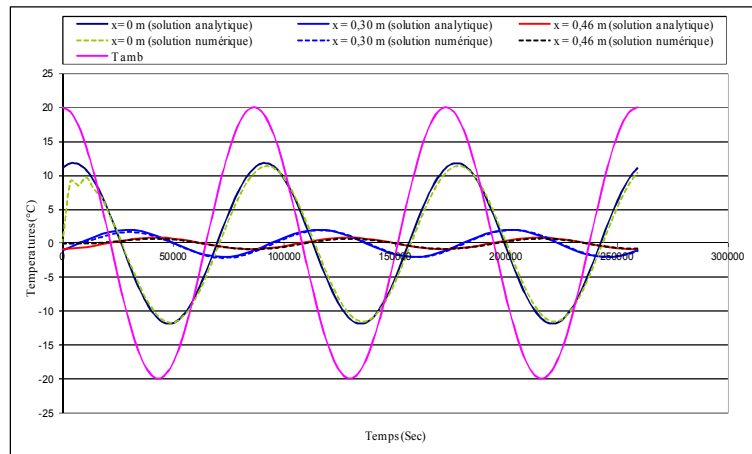


Figure 2. Variation de la température aux différents points (A, B, C)

5.2. Prise en compte de phénomène de l'irradiation solaire

Dans cette deuxième partie de modélisation, nous considérons un corps de chaussée réel (Figure 3.) sur lequel nous appliquons uniquement le flux convectif et l'irradiation solaire CLO. Ce phénomène a été déjà analysé par d'autres chercheurs, [YIN 2011], [MAN 2005], [TAM 2009]. Ici, nous travaillons sur des données extraites d'un fichier de données climatiques pour la ville de Béchar.

Béton, $e_1=0.3\text{m}$, $\lambda = 3.5$, $\rho = 2400$, $C = 1170$
Grave ciment, $e_2=0.16\text{m}$, $\lambda = 1.8$, $\rho = 2405$, $C = 900$
Sol, $e_3=20\text{m}$, $\lambda = 2$, $\rho = 1600$, $C = 900$

Figure 3. Paramètres thermiques de chaque matériau du corps de chaussée (unités SI)

Sur la (Figure 4.), nous mettons en évidence l'influence de l'énergie solaire reçue, qui se traduit par une translation de la courbe de température de surface d'une dizaine de degrés par rapport au cas simplement convectif.

5.3. Prise en compte du rayonnement vers le ciel

De la même manière que le cas précédent, nous présentons ici le résultat de variation de température mais cette fois-ci nous tenons compte en plus du phénomène d'échange radiatif avec le ciel.

Nous représentons dans la figure ci-après aussi une comparaison des variations de température de surface (A), sans et avec l'effet d'échange radiatif avec le ciel.

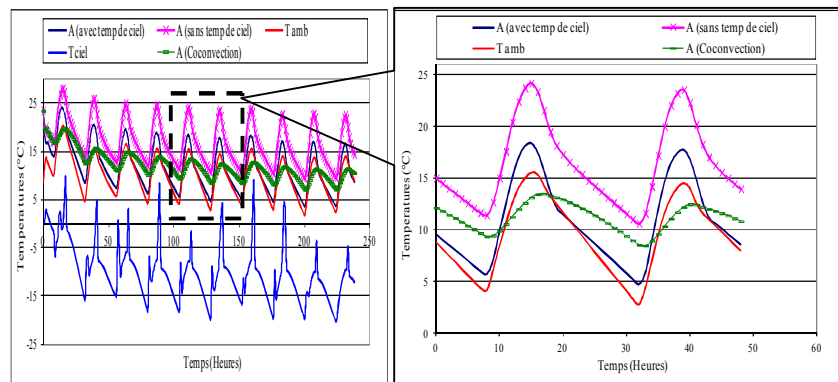


Figure 4. Variation de la température de surface sans et avec l'effet de refroidissement nocturne pendant un nombre de dix cycles du mois de janvier

Nous observons clairement que la température de surface (au point A) baisse lorsqu'on tient compte du rayonnement GLO, lequel agit essentiellement par le biais du refroidissement nocturne. Nous montrons aussi la variation de température aux différents points (A, B, C), en fonction du temps. Ceci se traduit par un déphasage qui augmente en fonction de la profondeur (Figure 5.).

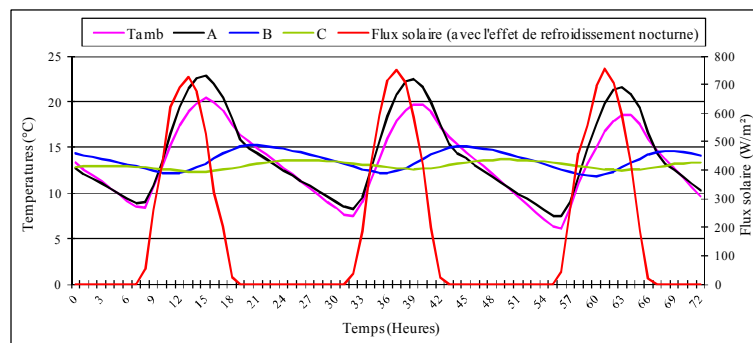


Figure 5. Variation de la température aux différents points (A, B, C) en prise en compte l'effet de refroidissement nocturne (mois janvier).

En parallèle, nous montrons d'après les figures ci-dessus que l'hypothèse proposée par d'autres chercheurs, par exemple [SEG 87], selon laquelle la température de surface correspondrait pratiquement à la température d'air est valide,

sauf au voisinage de midi. En période d'hiver (mois de janvier), il y a une différence entre les deux de 2 à 3K et en été (mois de juillet) de 5 à 7K, d'où des conséquences futures sur le comportement thermomécanique et la fissuration induite.

Afin d'effectuer cette même comparaison aux interfaces (B et C), nous ajoutons un calcul simplifié où on considère que le corps de chaussée est soumis uniquement à une température de surface imposée et égale à la température ambiante (point A). On peut alors commenter l'apport d'un modèle thermique « complet » par rapport au modèle simplifié en profondeur. En effet, l'interface B à 30 cm de profondeur laisse apparaître une signature similaire à celle de la surface nettement plus amortie avec un décalage de 2K au pic. A l'interface C, 16 cm plus bas sous la grave ciment qui est plus isolante, on constate un décalage global de température de 1K.

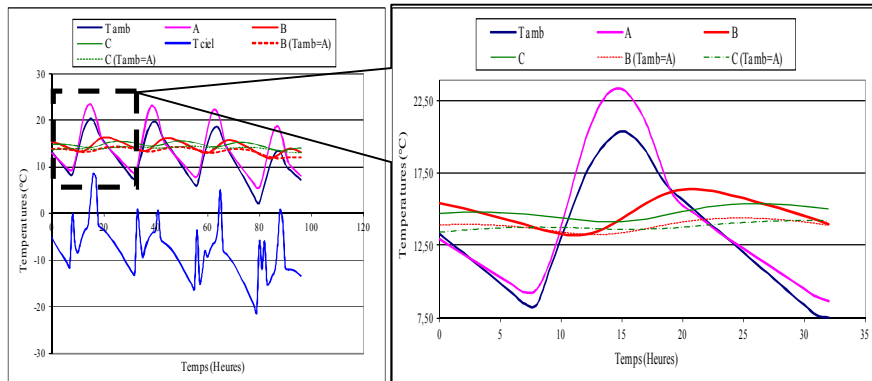


Figure 6. Variation de la température aux points (A,B et C) pour les deux modèles.

De ces résultats on pourra conclure qu'une modélisation simplifiée classiquement souvent retenue dans la littérature est acceptable pour appréhender des pathologies de fissuration en profondeur, cependant s'agissant de gradient et de pathologie de surface il apparaît indispensable de procéder à la modélisation complète proposée ici pour identifier correctement les gradients thermiques proches de la surface.

6. Conclusion

Dans ce travail, nous avons proposé un modèle numérique de thermique transitoire de prédiction de la distribution de température dans un corps de chaussée rigide soumis à des conditions variables réelles relatives au climat de la région de Béchar, Algérie.

Les résultats numériques obtenus dans la première partie confirment la validité du modèle. Dans la deuxième partie, nous montrons aussi l'effet de l'apport solaire où nous mettons l'importance du flux solaire et de la température de ciel, là où ce dernier permet de diminuer le réchauffement de la surface de corps de chaussée. Cette correspondance avec la réalité est importante car elle permet de valider le modèle « complet ».

De ces résultats on pourra conclure qu'une modélisation simplifiée classiquement et souvent retenue dans la littérature est acceptable pour appréhender des pathologies de fissuration en profondeur. Cependant, s'agissant de gradient et de pathologie de surface, il apparaît indispensable de procéder à la modélisation complète proposée ici pour identifier correctement les gradients thermiques proches de la surface.

Les perspectives de ce travail sont de coupler ce modèle thermique « complet » au modèle mécanique destiné à modéliser la fissuration par fatigue thermique des chaussées.

7. Bibliographie

- [AL-ABD 94] Al-Abdul, H.I., Balghunaim, F.A., Asphalt pavement temperature related to arid Saudi environment. *Journal of Material in Civil Engineering*, Volume 6, Issue 1, February 1994, pages 1-14.
- [BIS 72] Bissada, F., Asphalt pavement temperature related to Kuwait climate. Highway Research Record 404, *Transportation Research Board*, Washington, D.C., 1972, pp. 71-85.
- [BRA 80] C. de Bracker – "Les températures dans les structures routières" – *Centre de Recherches Routières* – Vol; XXVI – N° 2 – 1980.
- [CAP 87] M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie', Modèles Théoriques et Expérimentaux, Vol. 1, T1, *Office des Publications Universitaires*, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.
- [CHU 2009] Chung Y, Shin H-C. Characteristics of coefficient of thermal expansion of PCC pavement. In: *Transportation research record 2009 annual meeting CD-ROM*. Washington (DC): National Academy Council; 2008.
- [DEN 2010] Denis Boyer., Sur l'argumentation de l'albédo des toitures de bâtiments pour diminuer la progression des changements climatiques. *Rapport de projet d'études supérieures*. Ecole polytechnique de Montréal; Décembre 2010.
- [HER 2000] Hermansson, A., Simulation model for calculating pavement temperatures including maximum temperature. *Transportation Research Record*, Issue 1699, 2000, pages 134-141.
- [HOF 2002] J. Hofierka and M. Sári, 'The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications', *Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference*, Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- [KAS] Kasten Czeplak, *Solar Energy* Vol. 24, S. 177 - 189, Pergamon Press Ltd.
- [MAN 2005] Manuel J. C.Minhoto – Jorge C. Pais – Paulo A.A. Pereira, Asphalt pavement temperature prediction. *Road Materials and Pavement Design*. Volume X – N° X/2005, pages 1 to n.

- [MAR 84] M. Martin, P. Berdahl, Characteristics of Infrared Sky Radiation in the United States, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California - Berkeley, *Solar Energy* Vol. 33, No. 3/4, pp. 321-336, 1984.
- [MOK 2008] Mokhtari A, Brahimi K, Benziada, Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar. *Revue des énergies renouvelables*. Vol. 11 N°2 (2008) 307-315.
- [REZ 97] Rezqallah H. Ramadhan* Hamad I. Al-abdul wahhab., Temperature variation of flexible and rigid pavement in Eastern Saudi Arabia. *Building and environment*, Vol. 32, No. 4, pp. 367-373, 1997.
- [SEG 87] SEGUIN B. Estimation de l'évapotranspiration par télédétection satellitaire dans l'infrarouge thermique. — *Comptes rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture*, vol. 73, n° 6, 1987, pp. 53-60.
- [SOL 93] Solaimanian M, Kennedy TW. Prediction maximum pavement surface temperature using maximum air temperature and hourly solar radiation. *Transport Res Rec: J Transport Res Board* 1993; 1417:1-11.
- [TAM 2009] Y. Tamene, S. Abboudi et C. Bougriou, Simulation du transfert transitoire à travers un mur multicouche soumis à des conditions de flux solaire et convection. *Revue des énergies Renouvelables*. Vol. 12 N°1 (2009) 117-124.
- [TRNSYS version 16] Logiciel, TRNSYS, 'A Transient System Simulation Program', Manuel d'Utilisation, *Laboratoire d'Energie Solaire*. Université de Wisconsin-Madison, USA, 2006.
- [WILL 77] Williamson, R. H., Effect of environment on pavement temperature. *Proceedings of Third International Conference on Structural of Asphalt Pavements*, Michigan, 1977, volume 1, pp. 144-157.
- [YET 2009] F. Yettou, A. Malek, M. Haddadi et A. Gama, Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie. *Revue des Energies Renouvelables*. Vol. 12 N°2 (2009) 331 – 346.
- [YEZ 88] R. Yezou, Thermique du Bâtiment. *Document de stage CAST*. INSA Lyon, 1988.
- [YIN 2011] Yinghong Qin*, Jacob E. Hiller, Modeling temperature distribution in rigid pavement slabs: impact of air temperature. *Construction and Building Materials*, 25(2011) 3753-3761.