

Etude du transfert de chaleur à travers une chaussée en régime dynamique fréquentiel: l'influence des paramètres extrinsèques

[Study of the transfer of heat through a road in dynamic frequency regime: the influence of the extrinsic parameters]

Youssou TRAORE^{1,2}, Séni TAMBA², Alassane DIENE², Khatry OULD CHEIKH¹, Moussa DIENG¹, El Hadji Bala Moussa Nyakhaté², Issa DIAGNE¹, and Grégoire SISSOKO¹

¹Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal

²Ecole Polytechnique de Thiès, Thiès, Sénégal

Copyright © 2017 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In this paper, we propose a study of heat transfer through a roadway. The expression of the temperature and heat flux density are obtained from the resolution of the heat equation and the Fourier law in dynamic frequency regime. The influence of extrinsic parameters such as coefficients of convective and radiative heat exchange and cloud cover are presented.

KEYWORDS: heat transfer, roadway, Temperature, heat flow density, dynamic frequency regime.

RÉSUMÉ: Dans cet article, Nous proposons une étude du transfert de chaleur à travers une chaussée. L'expression de la température et de la densité de flux de chaleur sont obtenues à partir de la résolution de l'équation de la chaleur et de la loi de Fourier en régime dynamique fréquentiel. L'influence des paramètres extrinsèques tels que les coefficients d'échanges thermiques convectif et radiatif et de la couverture nuageuse sont présentés.

MOTS-CLEFS: transfert de chaleur, chaussée, température, densité de flux de chaleur, régime dynamique fréquentiel.

1 INTRODUCTION

De plus en plus, nous assistons à une prolifération des constructions de routes au Sénégal et dans la sous régions. Pour certains auteurs [1], les dégradations importantes observées sur les structures routières, ainsi que leur ruine prématurée imposent à l'heure actuelle de se prononcer plus amplement sur la nature des matériaux mis en place. En effet des études ont montré que certains matériaux récupèrent de l'énergie solaire puis s'échauffe [2,3] . Ainsi d'autres auteurs ont proposés des techniques de dimensionnements telles que le dimensionnement rationnel [4] et le dimensionnement par alizé ou des méthodes de dimensionnement semi empiriques [1]. Cependant la construction d'une chaussée doit prendre en compte le comportement mécanique des matériaux utilisés, le trafic auquel elle sera soumise et les conditions climatiques. Le but de cet article est d'étudier le transfert de chaleur à travers les multicouches constituant une structure routière à partir de la température et de la densité de flux de chaleur.

2 PRÉSENTATION DE LA SUPERSTRUCTURE

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches dont leurs propriétés thermophysiques [5] sont différentes comme le montre la figure suivante. Ces différentes couches contribuent aux performances de l'ouvrage et à la résistance globale [6].

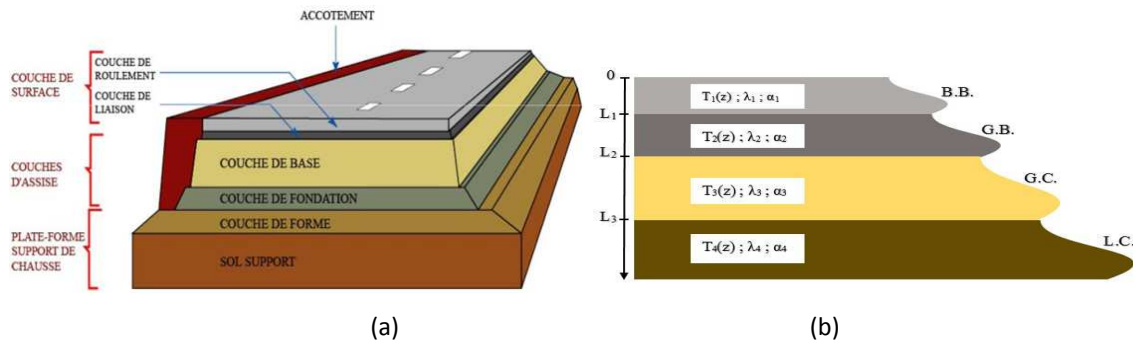


Figure 1 : (a) Représentation d'une chaussée (b) schéma simplifié

3 EXPRESSION DE LA TEMPÉRATURE

Lorsqu'un système est soumis à des sollicitations thermiques, il y'a un phénomène transfert de chaleur régit par l'équation de la chaleur donnée par :

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \Delta T + P_p$$

- ρ ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$) la masse volumique du matériau
- C ($\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) la chaleur spécifique du matériau
- λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) la conduction thermique du matériau
- P_p ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$) le puit de chaleur ou source de chaleur interne
- T la température en un point considéré

En considérant qu'il n'y a pas de production interne [7,8] de chaleur à l'intérieur de la chaussée donc $P_p=0$

Ainsi, nous établissons les équations décrivant le transfert de chaleur à l'intérieur des quatre couches. L'indice i correspond aux différentes couches (i varie de 1 à 4).

$$\frac{\partial^2 T_i(z, h1, h2, \omega, t, Cn)}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha_i} \frac{\partial T_i(z, h1, h2, \omega, t, Cn)}{\partial t} = 0$$

Avec $\alpha_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_1}$ $\alpha_2 = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2}$ $\alpha_3 = \frac{\lambda_3}{\rho_3 c_3}$ $\alpha_4 = \frac{\lambda_4}{\rho_4 c_4}$

- $T_1(z, h1, h2, \omega, t, Cn)$: la température en un point considéré dans le béton bitumineux
- $T_2(z, h1, h2, \omega, t, Cn)$: la température en un point considéré dans le grave bitume
- $T_3(z, h1, h2, \omega, t, Cn)$: la température en un point considéré dans le grave concassé
- $T_4(z, h1, h2, \omega, t, Cn)$: la température en un point considéré dans la latérite ciment

Les conditions aux limites pour les différentes interfaces sont :

- ❖ Interface milieu extérieur et la couche de béton bitumineux :

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = hc(Ta1 - T(0)) + hr(T_s - T(0)) + I_{sol}$$

- hc : coefficient d'échange thermique par convection
- hr : coefficient d'échange thermique par rayonnement
- $Ta1$: température ambiante du milieu
- Ts : température du soleil
- I_{sol} : flux solaire arrivant sur la surface de la première couche

$$I_{sol} = (0.828.I + b). \left(1 - \frac{Cn}{100}\right)$$

Elle combine l'expression du flux solaire I au sommet de l'atmosphère [9] au coefficient d'interception du flux solaire par l'atmosphère $b=-47,4W/m^2$ [10].

- ❖ Interface entre le béton bitumineux et le grave bitume :

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(z)}{\partial z} \Big|_{z=L1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(z)}{\partial z} \Big|_{z=L1}$$

$$T_1(L1) = T_2(L1)$$

- ❖ Interface entre le grave bitume et le grave concassé :

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(z)}{\partial z} \Big|_{z=L2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3(z)}{\partial z} \Big|_{z=L2}$$

$$T_2(L2) = T_3(L2)$$

- ❖ Interface entre le grave concassé et la latérite ciment :

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(z)}{\partial z} \Big|_{z=L3} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4(z)}{\partial z} \Big|_{z=L3}$$

$$T_3(L3) = T_4(L3)$$

- ❖ Interface entre la latérite ciment et la plateforme :

$$-\lambda_4 \frac{\partial T_4(z)}{\partial z} \Big|_{z=L4} = 0$$

$$T_4(L4) = T_p$$

T_p est la température de la plateforme supposée constante dans ce travail.

Et de la température initiale est considéré uniforme à l'intérieur de chaque matériau :

$$T_i = T_{0i}$$

Pour introduire la température initiale T_i , on effectue les changements de variable de température :

$$\begin{cases} \bar{T}_1 = T_1 - T_i \\ \bar{T}_2 = T_2 - T_i \\ \bar{T}_3 = T_3 - T_i \\ \bar{T}_4 = T_4 - T_i \end{cases}$$

Les équations de la chaleur deviennent :

$$\frac{\partial^2 \bar{T}_1(z, hc, hr, \omega, t, Cn)}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial \bar{T}_1(z, hc, hr, \omega, t, Cn)}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \bar{T}_2(z, hc, hr, \omega, t, Cn)}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha_2} \frac{\partial \bar{T}_2(z, hc, hr, \omega, t, Cn)}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \bar{T}_3(z, hc, hr, \omega, t, Cn)}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha_3} \frac{\partial \bar{T}_3(z, hc, hr, \omega, t, Cn)}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \bar{T}_4(z, hc, hr, \omega, t, Cn)}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha_4} \frac{\partial \bar{T}_4(z, hc, hr, \omega, t, Cn)}{\partial t} = 0$$

Pour résoudre les équations, nous allons utiliser la méthode des séparations des variables. Nous allons tenir en compte les changements des variables faites avec les températures. Ainsi on a :

$$\bar{T}_{1,2,3,4}(z, hc, hr, \omega, t, Cn) = X_{1,2,3,4}(z) \cdot Y_{1,2,3,4}(t)$$

Dans le béton bitumineux :

$$T_1(z, hc, hr, \omega, t, Cn) = (A_1 \sinh(\beta_1(\omega) \cdot z) + (B_2 \cdot \cosh(\beta_1(\omega) \cdot z))). e^{i\omega t} + T01$$

Dans le grave bitume :

$$T_2(z, hc, hr, \omega, t, Cn) = (A_2 \sinh(\beta_2(\omega) \cdot z) + (B_2 \cosh(\beta_2(\omega) \cdot z))). e^{i\omega t} + T02$$

Dans le grave concassé :

$$T_3(z, hc, hr, \omega, t, Cn) = (A_3 \sinh(\beta_3(\omega) \cdot z) + (B_3 \cosh(\beta_3(\omega) \cdot z))). e^{i\omega t} + T03$$

Dans la latérite ciment :

$$T_4(z, hc, hr, \omega, t, Cn) = (A_4 \sinh(\beta_4(\omega) \cdot z) + (B_4 \cosh(\beta_4(\omega) \cdot z))). e^{i\omega t} + T04$$

Avec

$$\beta_1(\omega) = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_1}}(i+1)$$

$$\beta_2(\omega) = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_2}}(i+1)$$

$$L_1^*(\omega) = \frac{1}{\beta_1(\omega)}$$

$$L_2^*(\omega) = \frac{1}{\beta_2(\omega)}$$

$$\beta_3(\omega) = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_3}}(i+1)$$

$$\beta_4(\omega) = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_4}}(i+1)$$

$$L_3^*(\omega) = \frac{1}{\beta_3(\omega)}$$

$$L_4^*(\omega) = \frac{1}{\beta_4(\omega)}$$

$L_1^*(\omega)$, $L_2^*(\omega)$, $L_3^*(\omega)$ et $L_4^*(\omega)$ représentent les longueurs caractéristiques de la diffusion thermique des différentes couches.

Les conditions aux limites et initiale ci-dessous, permettent d'obtenir les coefficients A1, B1, A2, B2, A3, B3, A4 et B4.

En tenant comptes des changements de variable, on peut réécrire les conditions aux limites :

❖ Interface milieu extérieur et la couche de béton bitumineux :

$$-\lambda_1 \frac{\partial \bar{T}_1(z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = hc(Ta1 - \bar{T}(0)) + hr(T_s - \bar{T}(0) - T01) + I$$

❖ Interface entre le béton bitumineux et le grave bitume :

$$\lambda_1 \frac{\partial \bar{T}_1(z)}{\partial z} \Big|_{z=L1} = \lambda_2 \frac{\partial \bar{T}_2(z)}{\partial z} \Big|_{z=L1}$$

$$T1(L1) + T01 = \bar{T}2(L1) + T02$$

❖ Interface entre le grave bitume et le grave concassé :

$$-\lambda_2 \frac{\partial \bar{T}_2(z)}{\partial z} \Big|_{z=L2} = -\lambda_3 \frac{\partial \bar{T}_3(z)}{\partial z} \Big|_{z=L2}$$

$$T2(L2) + T02 = T3(L2) + T03$$

Interface entre le grave concassé et la latérite ciment :

$$-\lambda_3 \frac{\partial \bar{T}_3(z)}{\partial z} \Big|_{z=L3} = -\lambda_4 \frac{\partial \bar{T}_4(z)}{\partial z} \Big|_{z=L3}$$

$$T3(L3) + T03 = T4(L3) + T04$$

❖ Interface entre la latérite ciment et la plateforme :

$$-\lambda_4 \frac{\partial \bar{T}_4(z)}{\partial z} \Big|_{z=L_4} = 0$$

$$T_4(L_4) + T_{04} = T_p$$

Nous supposons dans la suite du travail que $T_{01}=T_{02}=T_{03}=T_{04}$ (température initiale avant excitation)

4 EXPRESSION DE LA DENSITÉ DE FLUX DE CHALEUR

La densité de flux thermique est le flux thermique par unité de surface. Elle s'exprime en Watt par mètre carré (W/m^2) donnée par la loi de Fourier donnée par :

$$\vec{\phi}_i = -\lambda_i \cdot \vec{grad}T_i$$

5 RESULTANTS ET DISCUSSIONS

5.1 EVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE ET DE LA DENSITÉ DE FLUX DE CHALEUR EN FONCTION DE LOGARITHME DÉCIMAL DE LA PULSATION

Le phénomène de transfert de chaleur dans une structure routière dépend de la période de sollicitation climatique. Ainsi les figures 2-a et 2-b illustrent la température et la densité de flux de chaleur en fonction de logarithme décimal de la pulsation à travers les différentes couches.

Sur la figure 2, nous notons que pour les faibles fréquences ($\omega < 10^{-6}$), la température dans les couches est maximale est presque constante avoisinant celle du milieu ambiant. Pour ces fréquences les couches se comportent comme des conducteurs correspondant à une saturation thermique. En effet ces fréquences traduisent un régime quasi stique.

Mais à partir d'une certaine fréquence dite fréquence de coupure, nous remarquons une chute de la température jusqu'à celle de l'état initial des couches puis une légère hausse. Sur la première phase, elle traduit un emmagasinement d'énergie puis une phase de restitution. Entre les deux phases, l'énergie est maximale pour différentes couches avec un décalage de l'amplitude maximale.

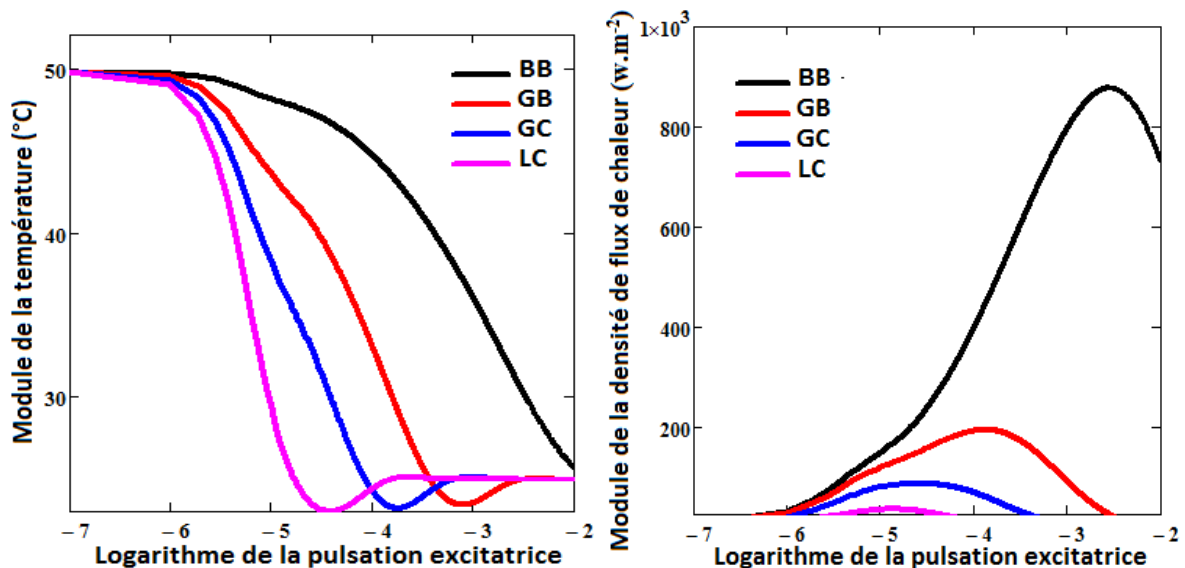


Figure 2-a

Figure 2-b

Figure 2 : Température (figure 2-a) et la densité de flux de chaleur (figure 2-b) en fonction de logarithme décimal de la pulsation. $hc=100$ ($W.m^{-2}.K^{-1}$); $hr=10$ ($W.m^{-2}.K^{-1}$); $cn=10\%$; $l=800$ ($W.m^{-2}$); $x1=0.01m$; $x2=0.08m$; $x3=0.18m$; $x4=0.38m$

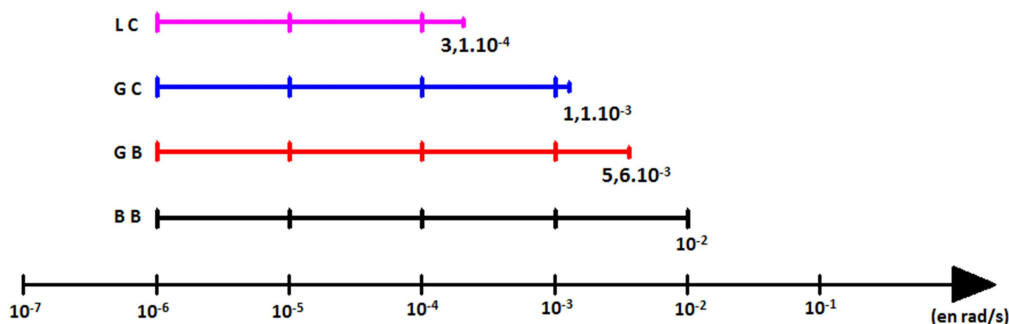


Figure 3 : Bande de fréquence correspondant au régime variable

5.2 LA TEMPÉRATURE ET LA DENSITÉ DE FLUX DE CHALEUR EN FONCTION DE LA PROFONDEUR DE LA STRUCTURE ROUTIÈRE

Les figures suivantes montrent l'impact du coefficient d'échange thermique convectif, du coefficient d'échange thermique radiatif et de la couverture nuageuse sur la température et la densité de flux de chaleur relative à la couche de roulement en béton bitumineux (BB), à la couche de liaison en grave bitume (GB), à la couche de base en grave concassée et à la couche de fondation en latérite ciment (LC). Ces couches sont les éléments constituant notre structure routière.

En absence d'échange thermique par convection, la superstructure composée de BB, de GB, de GC et de LC est à sa température initiale (25°C). Dans cette condition il n'y a pas de réponse thermique contrairement au coefficient d'échange thermique par rayonnement.

Pour h_c différente de zéro et h_r quelconque, la température ainsi que la densité de flux augmentent avec ces grandeurs lorsque nous sommes à la surface de la couche du Béton Bitumineux. En profondeur, elles diminuent progressivement jusqu'à un extrémum où le gradient de la température est nulle. Ainsi le phénomène de transfert de chaleur sur cette partie se fait de proche en proche de la couche la plus externe vers l'intérieur avec la présence d'un puits thermique à partir d'une certaine profondeur. Ainsi nous avons une perte thermique et de l'énergie emmagasiné à travers les différentes couches impliquant leurs propriétés de rétention de chaleur [11]. Il faut aussi noter que les perturbations thermiques n'atteignent pas la dernière couche(LC).

L'influence de la couverture nuageuse montre que l'ensoleillement impact sur la température de même que l'énergie stocké. En effet lorsque la couverture nuageuse est maximale (100%), ce qui correspond à une absence de rayonnement solaire : baisse de température. Nous remarquons que plus cette valeur est faible plus il y'a un bon ensoleillement favorisant une augmentation de température.

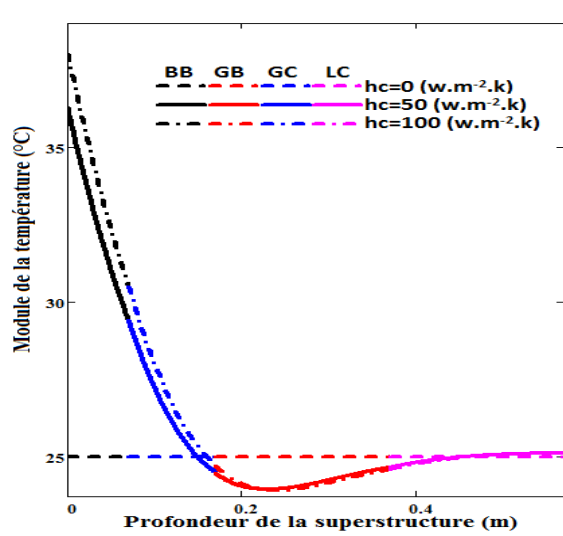


Figure 4.a

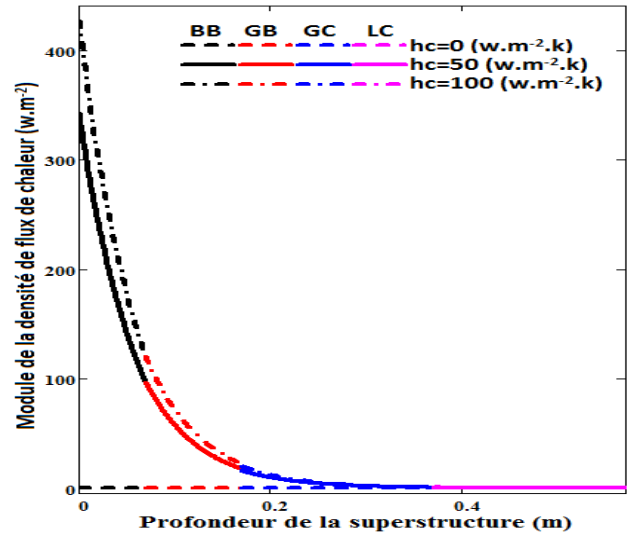


Figure 4.b

Figure 4 : température et la densité de flux de chaleur en fonction de la profondeur de la superstructure pour différentes valeurs du coefficient d'échange par convection

$hr=0 (W.m^{-2}.K^{-1}); Cn=100\%; I=800 (W.m^{-2}); \omega=10^{-4} (rad.s^{-1})$

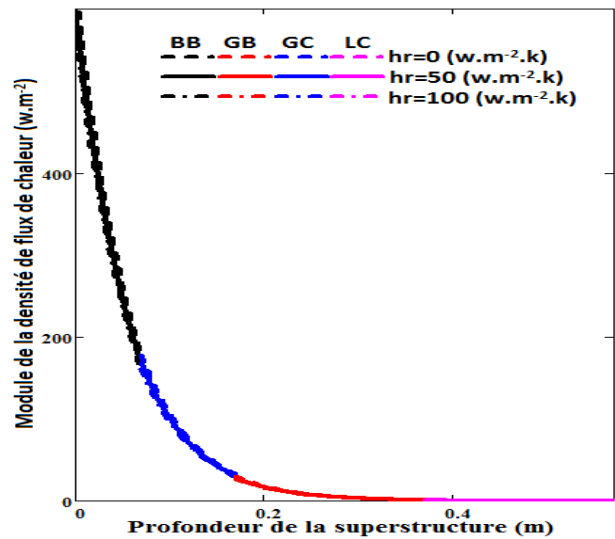
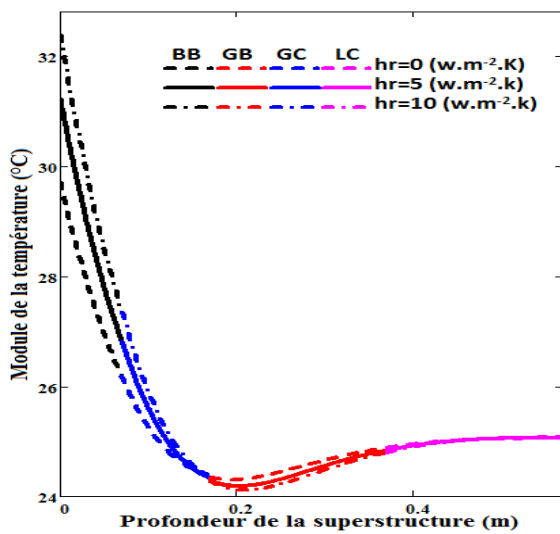


Figure 5 : la température et densité de flux de chaleur en fonction de la profondeur de la superstructure pour différentes valeurs du coefficient d'échange par rayonnement

$hc=100 (W.m^{-2}.K^{-1}); Cn=10\%; I=800 (W.m^{-2}); \omega=10^{-4} (rad.s^{-1}).$

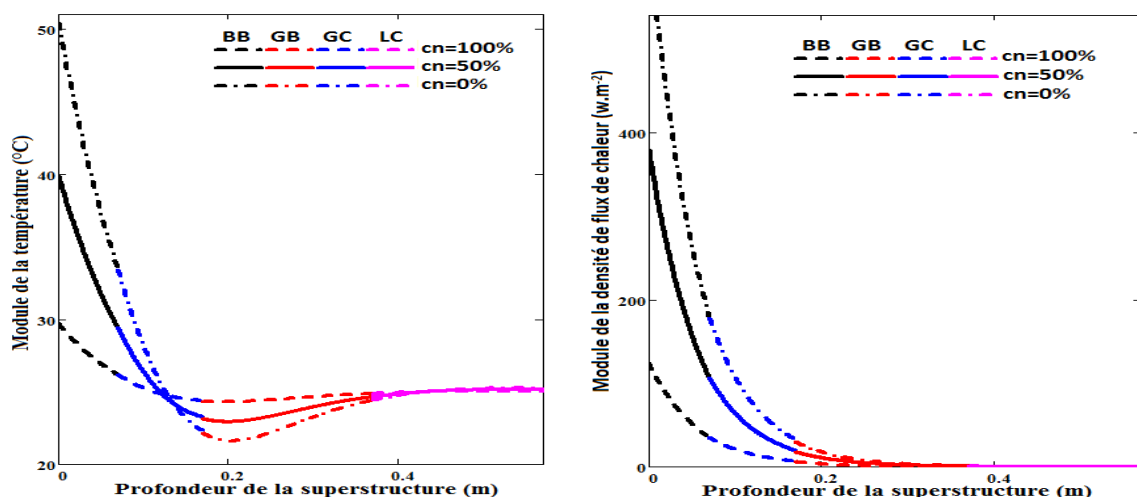


Figure 6 : la température et la densité de flux de chaleur en fonction de la profondeur de la superstructure pour différentes valeurs de la couverture nuageuse.

$$hc=100 (W.m^{-2}.K^{-1}); hr=10 (W.m^{-2}.K^{-1}); l=800 (W.m^{-2}); \omega=10^{-3} (rad.s^{-1}).$$

6 CONCLUSION

Les profils de la température et de la densité de flux de chaleur en fonction de la fréquence puis de la profondeur de la structure routière ont été présentés.

Les paramètres extrinsèques étudiées impactes sur la température de même que l'énergie emmagasiné.

REFERENCES

- [1] M. Fall, B. Senghor, A. Lakhoun « Analyse de la pratique du dimensionnement rationnel des structures de chaussée au Sénégal. Influence des paramètres d'entrée dans les codes de calcul pour le renforcement des chaussées » Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, 2002, 5-13
- [2] G. SISSOKO, M. ADJI, D. AZALINON, V. SAMBOU, A. WEREME, « Characterization by thermal transient phenomena of concrete slab recuperating solar energy » 2001, Journal des Sciences, Vol. 1, N°2, 36-46
- [3] B. FLEUR, I. DIAGNE, M. L. SOW, S. GAYE, G. SISSOKO « Influence du coefficient d'échange thermique sur le comportement d'une dalle en béton récupératrice d'énergie solaire » 2008, Journal des Sciences, Vol. 8, N°2, 99-106
- [4] J. Martinez « Contribution au dimensionnement rationnel des structures de chaussées souples et inverses. Comportement des graves non traitées et des sols supports » Thèse doctorat Ingénieur Etat, Université Montpellier II, 1990
- [5] Y. Jannot, A. Degiovanni, G. Pavet « Thermal conductivity of insulating materials with a three layers device » International Journal of Heat and Mass Transfer 52, Vol. 7, N°3, pp. 48-52, 2007 1105-1111
- [6] SETRA et LCPC, « Conception et dimensionnement des structures de chaussées », Edition 1994.
- [7] J. FOURIER « Théorie analytique de la chaleur » 2004, Editons Jacques Gabay.
- [8] A. DIENG, L. OULD HABIBOULAHY, A. S. MAÏGA, A. DIAO et G. SISSOKO, « Impedance spectroscopy method applied to electrical parametres: determination on bifacial silicom solar cell under magnetic field » 2007, Journal des Sciences, Vol. 7, N° 3, 48-52
- [9] N. B. GUTTMAN, J. D. MATTHEWS, "Computation of extraterrestrial solar radiation, solar elevation angle and true solar time of sunrise and sunset", SOLMET Vol. 2- Final report, National Climatic Center, U.S. Departement of Commerce (1979), pp49-52.
- [10] J. SCHMETZ, « Relationship between solar net radiative fluxes at the top of the atmosphere and at the surface », Journal of the Atmospheric Sciences, 50-8 (1993), pp1125
- [11] Y. TRAORE, I. DIAGNE, C. SARR, M. S. O. BRAHIM, A. K. DIALLO, H. L. DIALLO and G. SISSOKO « Influence of Thermal exchange coefficient on the heat retention rate of a concrete wall contiguous to a thermal insulation tow-plaster » 2016, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 11, N°5, ISSN 1819-6608.