



HAL
open science

Modélisation de chaussées viscoélastiques

Denis Duhamel, Vu Hieu Nguyen, Armelle Chabot, Philippe Tamagny

► **To cite this version:**

Denis Duhamel, Vu Hieu Nguyen, Armelle Chabot, Philippe Tamagny. Modélisation de chaussées viscoélastiques. 16ème Congrès Français de Mécanique, Sep 2003, NICE, France. 6p. hal-01561665

HAL Id: hal-01561665

<https://hal.science/hal-01561665>

Submitted on 25 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation de chaussées viscoélastiques

D. Duhamel*, V.H. Nguyen*, A. Chabot**, P. Tamagny**

**Laboratoire Analyse des Matériaux et Identification
Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
6 et 8 Avenue Blaise Pascal – Cité Descartes – Champs sur Marne
77455 Marne la Vallée
<http://www.enpc.fr>*

*** Division Matériaux et Structures de Chaussées
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes, Route de Bouaye BP 4129, 44341 Bouguenais Cedex, France
<http://www.lcpc.fr>
email de l'auteur à contacter : duhamel@lami.enpc.fr*

Résumé :

Le dimensionnement des chaussées françaises utilise le modèle élastique de Burmister qui donne de bons champs de contraintes et de déformations dans le cas de chaussées soumises à de forts trafics de poids lourds. Par contre, pour l'étude des chaussées souples à faible trafic ou soumises à de forts gradients de température, il est nécessaire de prendre en compte le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux. Dans ce papier, un modèle de structure multicouche semi-infinie prenant en compte la loi de comportement thermo-viscoélastique de Huet-Sayegh est présenté. La méthode utilisée consiste à se positionner dans le repère de la charge roulante puis par double transformation de Fourier, à poser le problème dans l'espace des nombres d'onde horizontaux et à le résoudre analytiquement suivant l'épaisseur. On étudie ensuite les déplacements et les contraintes en différents points de la chaussée en fonction du chargement, de la température ou de la vitesse des véhicules.

Abstract :

The calculation of French roads uses the Burmister elastic model and gives good stress and strain fields for roads with high lorry traffics. On the contrary, to study soft roads with small traffic or with high temperature gradients, it is necessary to take into account the viscoelastic behaviour of asphalt materials. In this paper, a model for a semi-infinite multilayer taking into account the thermo-viscoelastic Huet-Sayegh constitutive relation is presented. The proposed method consists in positioning in the moving load reference system then using a double Fourier transform. We set the problem in the horizontal wavenumber domain and we solve it analytically along the depth. Then one can calculate the displacements and the stresses in different positions in the road according to the intensity of the load, the temperature or the speed of the vehicles.

Mots-clefs : chaussée, viscoélastique, charge roulante

1 Introduction

Les sols en place étant incapables de supporter les charges induites par le trafic, la chaussée a pour rôle de diminuer, grâce à l'apport de couches de matériaux, les contraintes au niveau du sol support, de manière à permettre la circulation et le stationnement des véhicules. La chaussée se présente sous forme d'un empilement de couches, qui ont chacune un rôle bien défini et est composée de deux parties fondamentales : le corps de la chaussée et la couche de roulement. Le corps de chaussées, aussi appelé les assises, permet de répartir les charges induites par les véhicules pour les amener à un niveau compatible avec les caractéristiques du

sol support. Il peut être constitué de deux sous-couches, appelées couche de base et couche de fondation, de nature distincte ou non, en fonction de l'environnement et du trafic subi par la structure. La couche de roulement, qui peut être une couche d'enrobé ou une simple couche d'enduit superficiel, a pour but de protéger les assises des infiltrations d'eau et de l'agressivité du trafic.

La méthode de dimensionnement des chaussées françaises utilise le modèle élastique de Burmister de structure multicouche semi-infinie (1943). Ce modèle est programmé dans de nombreux codes comme ALIZE du LCPC décrit dans Autret *et al.* (1982). Il donne de façon semi-analytique de relativement bons champs de contraintes et de déformations dans le cas de chaussées soumises à de fort trafic de poids lourds. Par contre, pour l'étude des chaussées souples à faible trafic ou soumises à de forts gradients de température, il est nécessaire de prendre en compte le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux.

Dans ce papier, un modèle de structure multicouche semi-infinie prenant en compte la loi de comportement thermo-viscoélastique de Huet-Sayegh (1963) est présenté. La méthode utilisée consiste, par double transformation de Fourier, à poser le problème dans l'espace des nombres d'onde horizontaux et à le résoudre analytiquement suivant l'épaisseur. La solution, dans le repère de la charge roulante, est ainsi obtenue par addition d'une double transformation de Fourier inverse hors du point d'origine du repère et d'une technique d'intégration spécifique sous ce point singulier. On peut ensuite étudier les déplacements et les contraintes en différents points de la chaussée en fonction du chargement, de la température ou de la vitesse des véhicules.

2 Méthode de calcul

La structure de chaussée est un demi-espace multicouche constitué de couches élastiques ou d'enrobés bitumineux qui ont des comportements thermoviscoélastiques caractérisés par le modèle de Huet & Sayegh (1963).

Ce modèle rhéologique est constitué de deux branches parallèles. La première possède un ressort et deux amortisseurs paraboliques correspondant à l'élasticité instantanée et retardée de l'enrobé. La seconde est constituée d'un ressort correspondant au comportement statique ou à long terme de l'enrobé (FIG.1).

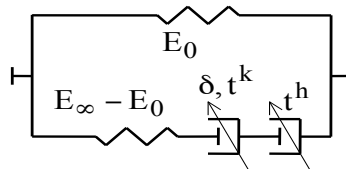


FIG. 1 – Schéma du modèle rhéologique de Huet-Sayegh (1963).

E_∞ est le module élastique instantané, E_0 le module élastique statique, k et h sont les exposants des amortisseurs paraboliques ($1 > h > k > 0$) et δ est un coefficient sans dimension, positif, pondérant l'apport du premier amortisseur dans le comportement. Le comportement thermo-visco-élastique est alors caractérisé, à une fréquence de sollicitation ω et une température θ , par le module complexe :

$$E^*(\omega, \theta) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(-j\omega\tau(\theta))^{-k} + (-j\omega\tau(\theta))^{-h}} \quad (1)$$

$\tau(\theta) = \exp(A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2)$ est une fonction de la température dépendant des trois paramètres scalaires A_0 , A_1 et A_3 . Dans le reste de l'article, nous considérerons la température comme

uniforme et constante et nous omettrons d'indiquer la dépendance en θ des différentes grandeurs.

Le chargement est une charge constante uniformément répartie sur un rectangle $[-a, a] \times [-b, b]$, de résultante $f_0 = 4abp_0$, se déplaçant à la vitesse constante V (FIG. 2).

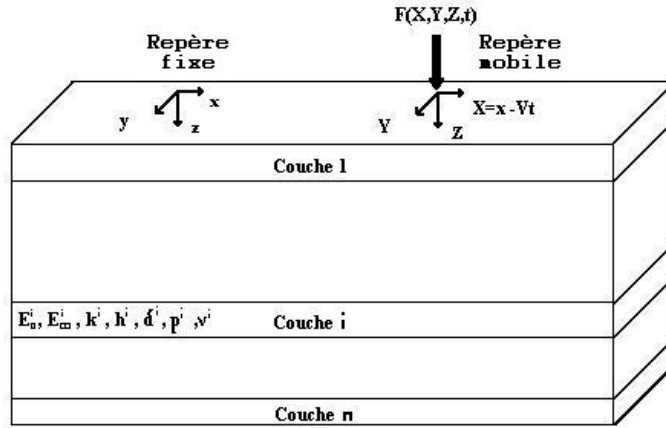


FIG. 2 – Charge mobile sur un demi-espace stratifié avec le modèle de Huet & Sayegh

Dans un repère fixe, l'équation d'équilibre de champ s'écrit dans chaque couche i :

$$\text{Div}(\underline{\underline{\sigma}}(x, y, z, t)) = \rho_i \frac{\partial^2 u(x, y, z, t)}{\partial t^2} \quad (2)$$

où $u(x, y, z, t)$ est le vecteur déplacement, ρ_i la masse volumique du matériaux de la couche i et $\sigma(x, y, z, t)$ le tenseur des contraintes de Cauchy.

Les conditions aux limites sont

- ⊖ pour la surface libre : $\sigma(z=0) \cdot n = p_0$ où n est la normale extérieure
- ⊖ à l'interface entre la couche i et la couche $i+1$: $\sigma(x, y, z_i^+, t) \cdot n = \sigma(x, y, z_i^-, t) \cdot n$ et $u(x, y, z_i^+, t) = u(x, y, z_i^-, t)$ (collage parfait des couches)
- ⊖ en $z = +\infty$, on a la condition de Sommerfeld : $\sigma(x, y, +\infty, t) = 0$ et $u(x, y, +\infty, t) = 0$

Le passage dans le repère de la charge mobile se fait par le changement de variables $(x, y, z) \rightarrow (X - Vt, Y, Z)$ qui conduit, en régime stationnaire, à la relation suivante :

$$\text{Div}(\sigma(X, Y, Z)) = \rho_i V^2 \frac{\partial^2 u(X, Y, Z)}{\partial X^2} \quad (3)$$

On définit ensuite la transformée de Fourier A^* d'un champ tensoriel A quelconque par la relation:

$$a(X, Y, Z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A^*(k_1, k_2, Z) \exp(-jk_1 X) \exp(-jk_2 Y) dk_1 dk_2 \quad (4)$$

Il est alors possible, pour chaque couche i , d'écrire les relations de comportement viscoélastique dans l'espace de la transformée de Fourier sous une forme multiplicative semblable aux relations de l'élasticité dans l'espace euclidien.

$$\sigma^*(k_1, k_2, Z) = 2\mu_i^*(kV)\varepsilon^*(k_1, k_2, Z) + \lambda_i^*(kV)\text{tr}(\varepsilon^*(k_1, k_2, Z)) \quad (5)$$

où $\lambda_i^*(kV)$ et $\mu_i^*(kV)$ dépendent du module complexe $E_i^*(kV)$ de la couche i comme les coefficients de Lamé dans le cas élastique.

En introduisant le comportement (5) dans l'équation de champ (2), Nguyen (2002) donne, dans l'espace de Fourier, l'équation d'équilibre de chaque couche i sous la forme:

$$A_i \frac{\partial^2 U^*}{\partial Z^2} + jB_i \frac{\partial U^*}{\partial Z} - C_i U^* = 0 \quad (6)$$

avec :

$$A_i = \begin{pmatrix} c_{si}^2 & 0 & 0 \\ 0 & c_{si}^2 & 0 \\ 0 & 0 & c_{pi}^2 \end{pmatrix} \quad B_i = \begin{pmatrix} 0 & 0 & k_1(c_{pi}^2 - c_{si}^2) \\ 0 & 0 & k_2(c_{pi}^2 - c_{si}^2) \\ k_1(c_{pi}^2 - c_{si}^2) & k_2(c_{pi}^2 - c_{si}^2) & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$C_i = \begin{pmatrix} k_1^2(c_{pi}^2 - V^2) + k_2^2 c_{si}^2 & k_1 k_2 (c_{pi}^2 - c_{si}^2) & 0 \\ k_1 k_2 (c_{pi}^2 - c_{si}^2) & k_1^2(c_{si}^2 - V^2) + k_2^2 c_{pi}^2 & 0 \\ 0 & 0 & k_1^2(c_{si}^2 - V^2) + k_2^2 c_{si}^2 \end{pmatrix}$$

où c_{pi} et c_{si} sont les vitesses des ondes longitudinales et transverses dans la couche i . La résolution de l'équation (6) donne un champ de déplacement dans la couche i paramétré par 6 constantes complexes $(\beta_{1i}^-, \beta_{1i}^+, \beta_{2i}^-, \beta_{2i}^+, \beta_{3i}^-, \beta_{3i}^+)$, de la forme :

$$\begin{aligned} U_1^* &= k_1 \beta_{1i}^- e^{-\kappa_p Z} + \kappa_s \beta_{3i}^- e^{-\kappa_s Z} + k_1 \beta_{1i}^+ e^{\kappa_p Z} - \kappa_s \beta_{3i}^+ e^{\kappa_s Z} \\ U_2^* &= k_2 \beta_{1i}^- e^{-\kappa_p Z} + \kappa_s \beta_{2i}^- e^{-\kappa_s Z} + k_2 \beta_{1i}^+ e^{\kappa_p Z} - \kappa_s \beta_{2i}^+ e^{\kappa_s Z} \\ U_3^* &= j\kappa_p \beta_{1i}^- e^{-\kappa_p Z} + jk_2 \beta_{2i}^- e^{-\kappa_s Z} + jk_1 \beta_{3i}^- e^{-\kappa_s Z} - j\kappa_p \beta_{1i}^+ e^{\kappa_p Z} \\ &\quad + jk_2 \beta_{2i}^+ e^{\kappa_s Z} + jk_1 \beta_{3i}^+ e^{\kappa_s Z} \end{aligned} \quad (8)$$

avec

$$\kappa_p = \sqrt{\left(1 - \frac{V^2}{c_p^2}\right)k_1^2 + k_2^2} \quad \text{et} \quad \kappa_s = \sqrt{\left(1 - \frac{V^2}{c_s^2}\right)k_1^2 + k_2^2} \quad (9)$$

Les relations de continuité des déplacements et des contraintes sont écrites à chaque interface ainsi que les conditions à l'infini et sur la surface libre. On obtient les amplitudes des ondes dans la première couche puis dans chacune des autres couches. Les champs de déplacement et de contrainte dans le domaine des nombres d'onde s'en déduisent. Ensuite une double transformation inverse de Fourier permet de déterminer les champs de déplacement et de contrainte dans le domaine réel. Les détails du calcul sont donnés dans Nguyen (2002).

3 Validation et résultats

Trois structures différentes ont été étudiées. Les résultats sont à chaque fois présentés en comparaison avec des résultats obtenus par d'autres approches. Les conditions de chargement sont les mêmes pour les trois calculs ; charge roulante de 65 kN répartie sur une surface carrée

de côté $a=b=0.22158$ m (essieu de référence de la méthode française de dimensionnement de chaussées), vitesse de la charge suivant l'axe x de 5 ms^{-1} . Les constantes de la fonction $\tau(\theta)$ sont : $A_0 = -0.342$, $A_1 = -0.401$, $A_2 = 0.002954$. La température θ est de 15 C .

La première validation est menée sur le cas du demi-espace infini avec un matériau visco-élastique de coefficient de poisson 0.35 , de modules $E_0 = 70 \text{ Mpa}$ et $E_v = 29914 \text{ Mpa}$ et dont la partie amortissement est dégénérée : $\delta = 0$, $h=0$. Le matériau est donc équivalent à un matériau élastique de raideur 14992 Mpa (FIG. 3a). La seconde validation est faite sur un matériau de mêmes caractéristiques, sauf le coefficient h qui vaut 0.3 (FIG. 3b). Les courbes de déplacement vertical en fonction de x sont données aux profondeurs $z_1 = -0.0167 \text{ m}$ et $z_2 = -0.2444 \text{ m}$.

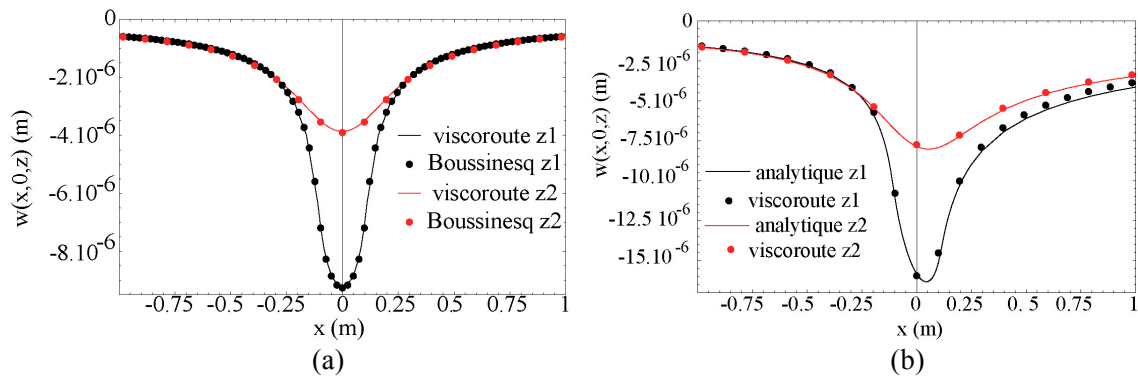


FIG. 3 – Demi-espace élastique (a) et visco-élastique (b)

La concordance avec la solution analytique de Boussinesq donnée dans Johnson (1992) dans le cas élastique et la solution semi-analytique développée par Chabot et Piau (2001) dans le cas visco-élastique est très bonne.

Une seconde validation est présentée en figure 4. La structure est constituée d'une couche visco-élastique de 0.08 m collée sur une couche de 0.24 m de grave-bitume élastique ($\nu=0.35$, $E=10000 \text{ Mpa}$) sur un massif de sol également élastique ($\nu=0.35$, $E=50 \text{ Mpa}$). On compare les résultats avec ceux d'un calcul aux éléments finis avec le module CVCR du code César-LCPC. Une profondeur de sol de 15 m a été modélisée, et les conditions limites en déplacement ont été repoussées à 10 m de part et d'autre de la charge. La symétrie du problème par rapport au plan xOz a été exploitée. Les résultats sont aux côtes $z_3 = -0.0167 \text{ m}$ et $z_4 = -0.37 \text{ m}$.

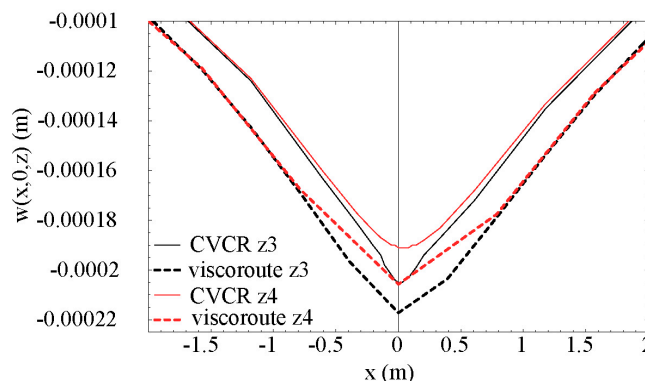


FIG. 4 – Déplacements verticaux pour le tricouche viscoélastique

La concordance est satisfaisante, la raideur supérieure du calcul aux éléments finis pouvant s'expliquer par le faible nombre d'éléments utilisés dans la discrétisation du sol.

4 Conclusions

La validation des calculs viscoélastiques est obtenue par comparaison avec une solution quasi-analytique développée au LCPC par Chabot et Piau (2001) dans le cas d'un massif semi-infini et des calculs utilisant le module éléments finis CVCR (Calcul Visco-élastique sous Charge Roulante) de Heck *et al.* (1998) dans le cas de structures composées de plusieurs couches de chaussées reposant sur un sol semi-infini élastique. L'intérêt de la méthode proposée par rapport aux deux autres réside essentiellement dans la rapidité d'obtention de la solution tout en pouvant traiter une structure multicouches suivant l'épaisseur. Un logiciel nommé VISCOROUTE reposant sur cette modélisation est en cours de développement. Il est en particulier destiné à l'analyse des dégradations spécifiques des chaussées aéronautiques.

Références

- Autret, P., Baucheron de Boissoudy, A., Marchand, J. P. 1982, ALIZE III Practice. In *Proc. 5th int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavements*, Delft, 174-191.
- Burmister, D. M. 1943, The theory of stresses and displacements in layered systems and applications of the design of airport run ways. In *Proceedings of the Highway Research Board*, **23**, 126-148.
- Chabot, A., Piau, J. M. 2001 Calcul semi-analytique d'un massif viscoélastique soumis à une charge roulante rectangulaire. *1ère Conférence Internationale Albert Caquot*, 3-5 Octobre, Paris.
- Heck, J. V., Piau, J. M., Gramsammer, J. C., Kerzreho, J. P., Odéon, H. 1998 Thermo-visco-elastic modelling of pavements behaviour and comparison with experimental data from LCPC test track. In *Proc. 5th Conference on Bearing Capacity on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Trondheim, Norway.
- Huet, C. 1963 Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés. *Thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté des sciences de Paris*.
- Johnson, K.L. 1992 Contact mechanics. *Cambridge University Press*.
- Nguyen, V.H. 2002 Comportement dynamique de structures non-linéaires soumises à des charges mobiles. *Thèse de doctorat de l'ENPC*.
- Sayegh, G. 1963 Variation des modules de quelques bitumes purs et bétons bitumineux. In *Conférence au Groupe Français de Rhéologie*, 51-74.