Modélisation de l'influence de la teneur en eau sur les déformations permanentes dans les chaussées souples

Fatima Allou^{*}— Cyrille Chazallon^{*}— Pierre Hornych^{**}— Christophe Petit^{*}

^{*}Laboratoire de Mécanique et Modélisation des Matériaux et Structures du Génie Civil

Université de Limoges, IUT d'Egletons, boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons, France.

<u>allou@egletons.unilim.fr</u>, <u>chazallon@unilim.fr</u> ** LCPC de Nantes, DMSC, 44100 Bouguenais, France pierre.hornych@lcpc.fr

RÉSUMÉ. Les déformations permanentes des matériaux non traités (assise en grave non traitée), causées par la variation de la teneur en eau de ces matériaux, sont l'un des principaux modes de détériorations des chaussées souples. Dans cet article, nous présentons un modèle simplifié pour la prédiction des déformations permanentes des matériaux granulaires non liés des chaussées souples. Ce modèle utilise la théorie de l'état limite pour la détermination des déformations permanentes stabilisées (adaptation ou accommodation), en fonction du nombre de cycles de chargements. Ensuite la validation du modèle avec les résultats d'essais triaxiaux à chargements cycliques, est effectuée sur un matériau granulaire utilisé en couche de base, à différentes teneurs en eau. Une application du modèle pour le calcul par éléments finis des déformations permanentes d'une structure de chaussée est présentée.

ABSTRACT. Permanent deformations of unbound granular layers, caused by unfavourable moisture conditions, are one of the most common mechanisms of deterioration of low traffic pavements. In this paper, we present a simplified model for the prediction of permanent deformations of unbound granular materials. The model uses the shakedown theory to determine the stabilised permanent strains (elastic or plastic shakedown). This model is used to predict results of cyclic triaxial tests performed on a granular base course material, at different moisture contents. An application of the model to finite element calculation of permanent deformations of a pavement structure is presented.

MOTS-CLÉS : chaussée souple, déformations permanentes, teneur en eau, théorie de l'état limite.

KEYWORDS: low traffic pavement, permanent deformations, moisture content, shakedown theory.

Revue. Volume X – n° x/année, pages 1 à X

2 Revue. Volume X – n° x/année

1. Introduction

Le principal mode de détérioration des chaussées souples à faible trafic est l'orniérage, qui se produit dans les couches non traitées et le sol support. Le critère de dimensionnement vis à vis de l'orniérage consiste à limiter la déformation élastique verticale au sommet des couches non liées.

L'objectif de cet article est de proposer une nouvelle approche pour la prédiction des déformations permanentes des graves non traitées des chaussées souples. L'approche utilisée est une adaptation des travaux de Habiballah (Habiballah et al., 2005) (Chazallon et al., 2005), qui sont basés sur la théorie proposée par Zarka (Zarka et al., 1979) pour les structures métalliques soumises à un chargement cyclique. La première partie de cet article présente le modèle de prédiction des déformations permanentes des graves non traitées. Ensuite, on validera le modèle par comparaison avec les résultats d'essais triaxiaux à chargements répétés (TCR) sur la grave non traitée (GNT) des Maraîchères, à deux teneurs en eau. Dans la dernière partie, on présente une application qui consiste en un calcul par éléments finis 2D pour la détermination des déformations permanentes d'une structure de chaussée souple et pour l'évolution de l'ornière en fonction du nombre de cycles de chargements.

2. Modélisation des déformations permanentes des GNT

La déformation totale peut se décomposer en une partie élastique et une partie inélastique. La partie élastique est donnée par :

$$\varepsilon_{ij}^{el}(x,t) = M_{ijkl}\sigma_{kl}^{el}(x,t) + \varepsilon_{ij}^{I}(x,0)$$
^[1]

avec $\varepsilon_{ij}^{el}(x,t)$ est le tenseur des déformations élastiques, $\sigma_{ij}^{el}(x,t)$ est le tenseur des contraintes élastiques, $\varepsilon_{ij}^{I}(x,0)$ est le tenseur des déformations initiales, M_{ijkl} est la matrice d'élasticité.

Les déformations inélastiques sont obtenues par la différence entre les déformations totales et les déformations élastiques, selon l'expression suivante :

$$\varepsilon_{ij}^{ine}(x,t) = M_{ijkl}R_{ij}(x,t) + \varepsilon_{ij}^{p}(x,t)$$
[2]

avec $\varepsilon_{ij}^{ine}(x,t)$ est le tenseur des déformations inélastiques, $R_{ij}(x,t)$ est le tenseur des contraintes résiduelles, $\varepsilon_{ij}^{p}(x,t)$ est le tenseur des déformations plastiques.

Pour la partie plastique, la surface de charge de Drucker-Prager à écrouissage cinématique est utilisée. Son expression est la suivante:

$$f = \sqrt{\frac{1}{2} (S_{ij} - y_{ij})^T} : (S_{ij} - y_{ij}) - \alpha I_1(\sigma_{ij}) - k$$
[3]

où S_{ij} est la partie déviatoire du tenseur des contraintes, I_1 est le premier invariant du tenseur des contraintes, α et k sont les paramètres du modèle ; y_{ij} est un tenseur de contrainte relié aux déformations plastiques par la relation suivante :

$$y_{ij}(x,t) = \left(\frac{2H}{3}\right) \mathcal{E}_{ij}^p(x,t)$$
[4]

où H est le module d'écrouissage.

[5]

La règle d'écoulement est non associée, le potentiel plastique est celui de Von Mises.

Zarka introduit une nouvelle variable interne structurelle afin de calculer les champs inélastiques dans la structure. Son expression est :

$$Y_{ij}(x,t) = \frac{2H}{3}\varepsilon_{ij}^{p}(x,t) - devR_{ij}(x,t)$$

Dans le plan des variables transformées structurelles, la surface de charge $(f(S_{ij}^{el} - Y_{ij}) \le 0)$ est un cercle centré en S_{ij}^{el} . Le problème inélastique peut être écrit en fonction des variables transformées structurelles, selon l'expression suivante :

$$\varepsilon_{ij}^{ine}(x,t) = M'_{ijkl} R_{kl}(x,t) + \frac{3}{2H} Y_{ij}(x,t)$$
[6]

où M'_{ijkl} est la matrice élastique modifiée.

Le tenseur des contraintes résiduelles sera donc :

$$R_{ij}(x,t) = M'_{ijkl} {}^{-1} \left[\varepsilon_{ij}^{ine}(x,t) - \frac{3}{2H} Y_{ij}(x,t) \right]$$
[7]

Finalement, le champ de déformations plastiques est obtenu par l'expression suivante :

4 Revue. Volume $X - n^{\circ} x/année$

$$\varepsilon_{ij}^{p}(x,t) = \frac{3}{2H} (Y_{ij}(x,t) + devR_{ij}(x,t))$$
[8]

Dans le cas d'un chargement cyclique, la réponse élastique d'une structure est défini par :

$$S_{ij}^{el}(x,t) = (1 - \Lambda(t))S_{ij}^{el}_{\min}(x) + \Lambda(t)S_{ij}^{el}_{\max}(x)$$
[9]

où $\Lambda(t)$ est une fonction périodique variant entre 0 et 1 avec le temps; $S_{ij}^{el}_{\min}(x)$ et $S_{ij}^{el}_{\max}(x)$ sont les valeurs minimales et maximales des contraintes élastiques déviatoires.

Le domaine élastique $C(S_{ij}^{el})$, dans le plan des variables internes transformées structurelles, est un cercle de centre S_{ij}^{el} et de rayon r. Le mécanisme plastique est actif seulement si la variable transformée structurelle se trouve sur la limite du convexe $C(S_{ij}^{el})$. La nature de l'état limite de la structure dépend de la réponse élastique. Selon l'amplitude du chargement ΔS_{ij}^{el} , le convexe $C(S_{ij}^{el}) = C_0 + S_{ij}^{el}$ subit une translation linéaire entre $C(S_{ij}^{el}_{min})$ et $C(S_{ij}^{el}_{max})$. S'il existe une partie commune entre les extremums, la structure est adaptée sinon elle est accommodée. Le cycle stabilisé est caractérisé par : $(\varepsilon_{ij}^{p})_{moy}$ et $(\Delta \varepsilon_{ij}^{p})$ (Allou et al., 2006).

Afin de décrire les déformations permanentes des GNT en fonction du nombre de cycle de chargement, une fonction F(N) est appliquée aux déformations plastiques stabilisées $\mathcal{E}_{ij}^{p}(x)$. Son expression est :

$$\overline{\varepsilon_{ij}^{p}(x,N)} = \left[1 - \left(\frac{N}{100}\right)^{-B}\right] \varepsilon_{ij}^{p}(x)$$
[10]

où (N>100 cycles), B est un paramètre qui contrôle la vitesse pour laquelle la déformation plastique tend à se stabiliser.

3. Ajustement des paramètres du modèle

Afin de déterminer les paramètres du modèle de prédiction de déformations permanentes, une campagne d'essais en laboratoire a été effectuée sur la GNT utilisée en couche d'assise dans l'expérience du manège de fatigue (GNT des Maraîchères) au LCPC de Nantes par Hornych (Hornych, 2005). Le programme d'essais est réalisé à deux teneurs en eau (4% et 5%), et comprend trois types d'essais :

- trois essais de cisaillement monotones afin de déterminer la position du sommet du cône de Drucker Prager sur l'axe isotrope ($p^* = k/3\alpha$). L'angle d'ouverture du cône d'élasticité ($\psi = artg(3\alpha\sqrt{3})$) est pris de manière à avoir un domaine élastique initial réduit.

- un essai cyclique pour caractériser le comportement réversible. Le comportement réversible est décrit avec le modèle élastique non linéaire de Boyce modifié par Hornych pour prendre en compte l'orthotropie (Hornych et al., 1998).

- trois essais de déformations permanentes selon la procédure proposée par Gidel (Gidel et al., 2001) pour la détermination des paramètres plastiques (le module d'écrouissage H et le paramètre B).

En utilisant la méthode simplifiée, le module d'écrouissage est déterminé en utilisant les valeurs de déformations plastiques stabilisées issues des simulations du modèle de Hornych (Hornych et al., 1993) d'après les résultats d'essais TCR. Ceci est répété pour chaque palier de chargement. L'évolution du module d'écrouissage est fonction du chargement et prend en compte l'état initial existant dans le matériau. Son expression est :

$$Log\left[\frac{H}{p_a} \cdot \frac{L_{\min}}{L}\right] = a(p,q) \cdot Log\left[\frac{p_{\min}}{\Delta p}\right] + b(p,q)$$
[11]

où p_a est la pression atmosphérique ; a et b sont les paramètres du modèle ; L est la longueur du chemin de contrainte ; L_{min} est la longueur minimale liée à l'état de contraintes initiales.

La même approche est suivi pour déterminer le paramètre B. son expression est :

$$B = c (p,q) \left(\left(\left(\frac{\Delta q}{\Delta p} \right)^2 + 1 \right) / \left(\left(\frac{q}{p} \right)^2_{\min} + 1 \right) \right)^{1/2} + d(p,q) \cdot \frac{L}{L_{\min}}$$
[12]

où c et d sont les paramètres du modèle.

Les expressions des paramètres a, b, c et d, qui interviennent dans les lois d'évolution de H et B, sont fonction du rapport $\frac{q}{p}$, et la procédure pour les déterminer est détaillée dans (Allou et al, 2006).

6 Revue. Volume $X - n^{\circ} x/année$

Sur les figures 8 et 9, on montre les prédictions obtenues avec w=4% et w=5%. On remarque que le modèle conduit à des résultats plus satisfaisants pour les deux teneurs en eau. L'influence de la teneur en eau sur les déformations permanentes dépend fortement du niveau de contraintes appliquées. Pour des faibles niveaux de contraintes, les deux premiers paliers, les déformations permanentes sont identiques pour les deux teneurs en eau. Pour des niveaux plus élevés, les déformations permanentes sont plus importantes pour la teneur en eau de 5%.



Figure 1. Résultat de l'ajustement du modèle sur l'essai triaxial w = 4%



Figure 2. Résultat de l'ajustement du modèle sur l'essai triaxial w = 5%

Modélisation de l'influence de la teneur en eau sur les déformations permanentes

4. Modélisation de l'orniérage d'une structure de chaussées souples

Dans cette partie, on présente la modélisation par éléments finis d'une structure de chaussée souple étudiée sur le manège de fatigue. La structure considérée se compose d'une couche de roulement bitumineuse, une assise en grave non traitée et le sol support. On adopte un comportement élastique linéaire pour la couche de roulement et le sol support, et on considère un comportement élastoplastique pour la couche en grave non traitée. Le modèle est implanté dans le code de calcul Cast3M (Cast3M, 2005). Le calcul est effectué en 2D avec des éléments finis QUA8. La charge due au trafic correspond à un demi essieu standard de 65kN (roue simple). La prise en compte des contraintes initiales non nulles, dans la chaussée, permet de générer un état de contraintes proche de celui issu de l'essai TCR. Pour cela, le chargement initial de la structure est représenté par une charge verticale générée par le poids propre des matériaux constituants la chaussée et une répartition triangulaire latérale générée par la poussée des terres au repos. Les caractéristiques élastiques des matériaux de la chaussée sont déterminées de la manière suivante :

- le module d'élasticité du béton bitumineux est déterminé à partir des essais en laboratoire et correspond à la température moyenne et à la fréquence du chargement enregistré sur la structure de chaussée pendant l'expérience de Juillet 2003 (T= 23°C, f = 12,5Hz). Le coefficient de Poisson est égal à 0,35.
- le comportement réversible de la couche non liée (GNT des Maraîchères) est décrit avec le modèle de Boyce anisotrope utilisant le jeu de paramètre déterminé à partir de l'essai triaxial cyclique.
- le module élastique du sol est déterminé expérimentalement in situ. Le coefficient de Poisson est égal à 0,35.

Les champs des déplacements inélastiques, déformations inélastiques et des déformations plastiques sont calculés à w = 4% et w = 5%. Le déplacement vertical à la surface de la chaussée (profondeur d'ornière) est obtenu par intégration des déformations plastiques selon la direction verticale.

La figure 11 montre la profondeur d'ornière, calculée jusqu'à un million de cycles de chargement, pour les deux teneurs en eau (w = 4% et w = 5%). On remarque que l'effet de la teneur en eau apparaît important par comparaison aux essais en laboratoire.

La profondeur de l'ornière est plus importante pour la teneur en eau de 5%, celle ci augmente de 30% de la teneur en eau de 4% à 5% à 10 000 cycles et de 16% à un million de cycles.

7

8 Revue. Volume X – n° x/année



Figure 3. Profondeur d'ornière fonction du nombre de cycles de chargements

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une méthode de calcul par éléments finis des déformations permanentes des matériaux granulaires non traités pour évaluer le risque d'orniérage des structures de chaussées souples.

La validation du modèle sur des résultats d'essais triaxiaux à chargements répétés est présentée. Les résultats obtenus donnent de bon ajustement pour les deux teneurs en eau, et montrent l'importance du rôle joué par la teneur en eau sur les déformations permanentes des graves non traitées.

Dans la dernière partie de ce travail, nous avons présenté le calcul par éléments finis des déformations permanentes d'une structure de chaussée et l'évolution de l'ornière en fonction du nombre de cycles de chargements, dont les résultats montrent l'influence de la teneur en eau sur la profondeur d'ornière. La validation de ce modèle, par comparaison avec des résultats d'expériences à l'échelle 1 sur des chaussées souples est en cours.

6. Bibliographie

- Allou F., Chazallon C., Hornych P., «Computer method for flexible pavements rut depth evolution with time», to appear in the *International Journal for Numerical and Analytical Methods for Geomaterials*, 2006.
- CAST3M (2005), CAST3M est un code de calcul élément finis développé au Commissariat à l'énergie atomique, France, 2005, http://wwwcast3m.cea.fr/cast3m.
- Chazallon C., Habibballah T., «Finite elements modelling of flexible pavements with the shakedown concept», *International Journal of Road Materials and Pavements Design*, Hermès editor, 2005, n° 6, p 97 117.
- Gidel G., Hornych P., Chauvin J. J., Breysse D., Denis A., «Nouvelle approche pour l'étude des déformations permanentes des graves non traitées à l'appareil triaxial à chargements répétés», *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 2001, n° 233, p. 5-21.
- Habiballah, T., Chazallon, C., «An elastoplastic model based on the shakedown concept for flexible pavements unbound granular materials», *International Journal for Numerical and Analytical Methods for Geomaterials*, Wiley editor, 2005, 29 : 577 - 596.
- Hornych P., Chazallon C., Allou F., Elabd A., «Prediction of permanent deformations of unbound granular materials, in relation with the moisture content», *submitted to the International Journal of Road Materials and Pavement Design*, 2006.
- Hornych P., Rapport interne confidentiel, L.C.P.C. de Nantes, 2005.
- Hornych P., Kazaï A., Piau J. M., «Study of the resilient behaviour of unbound granular materials», *Proc. 5th Int. Conf. on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Trondheim, Norway, 1998, vol. 3, p. 1277 1287.
- Hornych P., Corte J. F., Paute J. L., «Etude des déformations permanentes sous chargements répétés de trois graves non traitées», *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1993, No. 184, pp. 45-55.
- Zarka J., Casier J., «Elastic plastic response of structure to cyclic loading: practical rules», *Mechanics Today*, Vol 6, Ed Nemat-Nasser, Pergamon Press, 1979, pp. 93-198.