

## Orniérage des chaussées : identification des paramètres élasto-plastiques d'un enrobé bitumineux à partir d'un essai structurel

Delphine Cuisinier, Yves Berthaud & Marc François

Laboratoire de Mécanique et Technologie  
Cachan  
cuisinier@lmt.ens-cachan.fr

### Résumé :

*Le béton bitumineux est un matériau hétérogène composé d'un squelette granulaire formant l'ossature rigide et d'un liant bitumineux assurant la cohésion de l'ensemble. L'orniérage est un des principaux modes de dégradation des chaussées bitumineuses. Il se traduit par l'apparition de déformations permanentes longitudinales sous le passage répété des véhicules. Prédire, par le calcul, ce type de dégradations nécessite la connaissance fine du comportement de ce matériau élasto-viscoplastique. Le critère de Drucker-Prager semble adapté pour modéliser la part élasto-plastique des déformations. L'enjeu est donc d'en identifier les paramètres à partir d'essais structurels simples. La mesure des champs de déplacements est réalisée par corrélation d'images numériques. L'expression des déformations plastiques volumiques et déviatoriques cumulées est obtenue par dérivation d'un champ de déplacement mesuré régularisé. L'amplitude de l'angle de frottement interne est alors directement identifiable*

### Abstract :

*Rutting is a permanent deformation in asphalt pavement. In design guides the constitutive continuum model of such a material is linear elastic or visco-elastic. We propose to identify an elasto-plastic model (Drucker-Prager) to foresee rut appearance. A method based on the expression of the deviatoric and volumetric measured plastic strain is used to identify Drucker-Prager model's parameters. It's based on full field measurement method.*

### Mots-clefs :

**bétons bitumineux, corrélation d'images, identification ;**

## 1 Introduction

Le béton bitumineux est de très loin le matériau le plus utilisé pour constituer les couches de surface des structures routières. Il est constitué par un mélange de deux matériaux : des granulats qui représentent l'ossature rigide d'une part et un liant bitumineux assurant la cohésion entre les grains en les mouillant et les enrobant d'un film semi-continu d'autre part. Ainsi, dans la chaussée, les enrobés (ou bétons bitumineux) reprennent et transmettent en profondeur les charges de trafic par contacts inter-granulaires. Ils présentent une sensibilité thermique et cinématique importante, cette propriété étant directement liée à la présence du liant bitumineux visqueux dans le mélange.

L'orniérage est un des principaux modes de dégradation de ces matériaux. Il se traduit par l'apparition de déformations permanentes longitudinales sous le passage répété des véhicules. Il trouve son origine dans le cumul des déformations visqueuses dues au liant bitumineux et des déformations plastiques dues au squelette minéral de l'enrobé (Jolivet *et al.* (2000)). Il est donc associé au comportement irréversible des matériaux bitumineux.

Bien que le choix de matériaux plus appropriés puisse améliorer la résistance des chaussées à l'orniéage, ce problème ne peut pas être totalement éradiqué. Il est alors nécessaire de tenir compte du risque d'orniéage des bétons bitumineux lors du dimensionnement des structures routières.

Dans ce contexte et dans l'objectif de prédire, par le calcul, l'apparition de ces ornières, le travail présenté ici a pour but de fournir un outils d'identification simple et rapide des paramètres de modèles de comportement macroscopique de ce matériau.

## 2 Comportement macroscopique des enrobés bitumineux

En France, le dimensionnement des chaussées est basé sur l'analyse d'une structure multicouche semi-infinie où le béton bitumineux est supposé isotrope. En effet, bien que sa structure composite grenue confère à l'enrobé une structure hétérogène, l'hypothèse d'homogénéité macroscopique du matériau est largement utilisée à l'échelle d'une couche de chaussée et est généralement supposée lors de l'étude du comportement macroscopique des bétons bitumineux. Par ailleurs, le comportement est considéré viscoélastique basé sur le model rhéologique de Huet (1963). Pour identifier les paramètres de ce comportement des éprouvettes trapézoïdales de béton bitumineux encastrée en pied sont soumises à une flexion alternée et répétée (cet essai fait l'objet d'une norme : NF EN 12697-26). Notons que cette analyse vico-élastique n'est donc pas suffisante pour prédire l'apparition des déformations permanentes que sont les ornières.

Considérons donc ici le comportement élasto-viscoplastique macroscopique des bétons bitumineux où la déformation totale est décomposée en une déformation élastique d'une part et une déformation viscoplastique d'autre part. L'identification des paramètres du comportement élastique de ce matériau a été réalisée par ailleurs par minimisation de l'erreur existant entre les champs de déplacement mesurés et analytiques (l'éprouvette étant considérée comme un massif d'enrobé au comportement élastique linéaire et isotrope) (Cuisinier *et al.* (2006)). De nombreux auteurs, Seibi *et al.* (2001) et Masad *et al.* (2003) notamment, modélisent l'écoulement viscoplastique du matériau par la relation de Perzyna (1966) (eq. 1) où  $\Gamma$  est le paramètre de fluidité.  $\langle \phi(f) \rangle$  est une fonction scalaire du critère de plasticité ( $f$ ) qui est non nulle uniquement si  $f$  est nul. Le critère choisi ici est celui de Drucker-Prager (1952)(eq. 2) où  $p$  et  $q$  dépendent du premier et deuxième invariant de la contrainte ( $I_1$  et  $J_2$ ) respectivement (eq. 3).  $c$  et  $\alpha$  sont les paramètres de la loi que l'on cherche à identifier. Le modèle est ici considéré comme associé.

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \Gamma \langle \phi(f) \rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (1)$$

$$f = q + \tan(\alpha)p - c \quad (2)$$

$$p = \frac{I_1}{3}; q = \sqrt{3I_2} \quad (3)$$

Ce type de modèle permet de prendre en compte quelques aspects du comportement des bétons bitumineux : l'influence du temps, le rôle de la part hydrostatique de la contrainte. En effet, le squelette granulaire étant le constituant principal des bétons bitumineux, les mélanges bitumineux présentent certaines propriétés mécaniques proches de celles des matériaux granulaires non liés : le confinement induit une augmentation de la rigidité du matériau par densification du squelette granulaire (Sousa (1994)).

L'objectif est donc de mettre en place une méthode d'identification des paramètres  $\{c, \alpha\}$  du critère de Drucker-Prager (1952) à partir d'essais structuraux simples.

### 3 Essais structuraux réalisés

Un essai de poinçonnement est réalisé sur une éprouvette parallélépipédique confinée dans une boîte rigide lubrifiée. L'éprouvette est ainsi placée dans les mêmes conditions de déformation plane que celles rencontrées dans une chaussée réelle. Le chargement est appliqué sur la largeur entière de l'échantillon. La face vitrée de la boîte permet la prise d'images à intervalles réguliers (fig. 1a). La mesure d'un champ de déplacement irréversible est obtenue par la corrélation de deux images particulières prises avant et après un cycle de chargement-déchargement (fig. 1b).

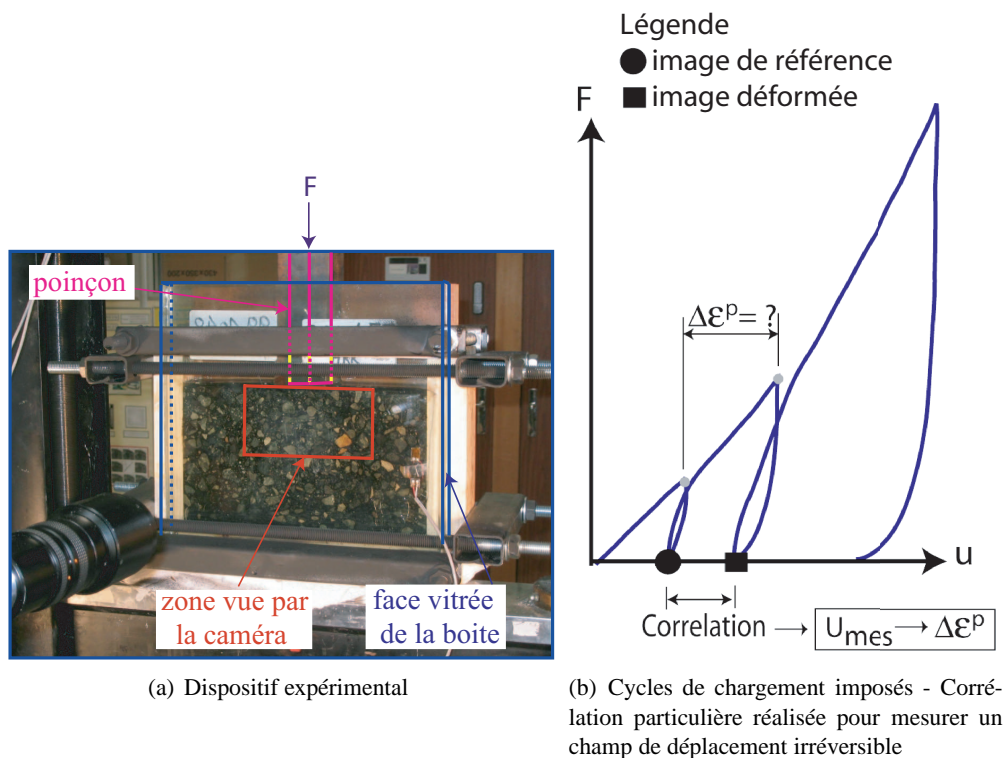


FIG. 1 – Essai de poinçonnement

Cet essai est réalisé à température et vitesse de sollicitations constantes ( $20^{\circ}\text{C}$  et  $10^{-3}\text{mm/s}$ ). Bien que un comportement hystérétique apparaisse (fig. 1b), la part visqueuse du comportement est ici négligée. On considère donc l'écoulement plastique du matériau tel que  $\dot{\varepsilon}^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma}$  où  $\lambda$  est le multiplicateur plastique.

### 4 Identification du paramètre $\alpha$

Afin d'identifier l'angle  $\alpha$  du critère de Drucker-Prager, une discrétisation en temps du taux de déformation plastique est effectuée. L'équation 4 indique l'expression de l'incrément de déformation plastique ( $\Delta\varepsilon^p$ ) alors obtenu. L'équation 5 exprime quant à elle l'incrément de multiplicateur plastique ( $\Delta\lambda$ ) qui dépend de l'incrément de déformation déviatorique plastique mesurée ( $\Delta\varepsilon^p$ ). On peut alors remarquer que l'amplitude de l'incrément de déformation plas-

tique volumique ( $\Delta\varepsilon_V^p$ ) dépend du paramètre  $\alpha$  d'une part et de  $\Delta\lambda$  d'autre part (6). On note donc ici que l'identification du paramètre  $\alpha$  est basée sur l'expression des champs de déformations plastiques volumiques et déviatoriques (eq.7) obtenus par dérivation d'un champ de déplacement irréversible mesuré (par corrélation d'images).

$$\Delta\varepsilon^p = \Delta\lambda \left( \frac{3}{2} \frac{s}{q} + \frac{1}{3} \tan(\alpha) 1 \right) \quad (4)$$

$$\Delta\lambda = \sqrt{\frac{2}{3} \Delta e^p : \Delta e^p} \quad (5)$$

$$\Delta\varepsilon_V^p = \Delta\lambda \tan(\alpha) \quad (6)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{\text{tr}(\Delta\varepsilon^p)}{\sqrt{\frac{2}{3} \Delta e^p : \Delta e^p}} \quad (7)$$

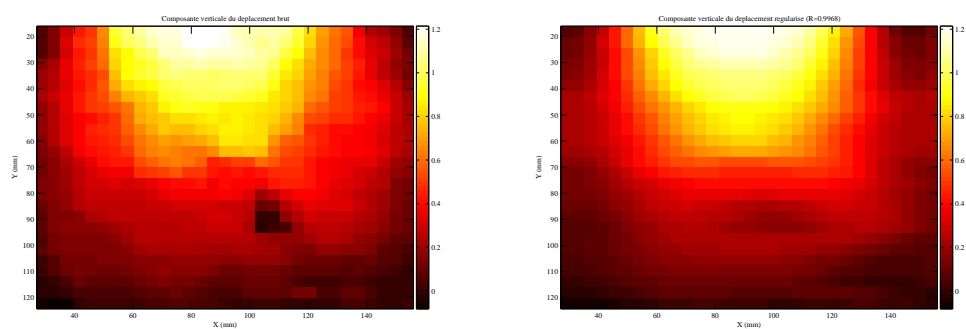
Afin de se libérer des irrégularités de mesure du champ de déplacement (on peut par exemple remarquer une zone foncée sur l'image (fig. 2a) indiquant que, malgré les efforts de lubrification de la face vitrée de la boîte, un grain est resté collé pendant l'essai), l'expression du champ de déformation est réalisée par dérivation d'un champ de déplacement régularisé par un polynôme du second degré (fig. 2).

La figure 3 représente l'amplitude de l'incrément de déformation plastique volumique ( $\Delta\varepsilon_V^p$ ) en fonction de l'incrément de multiplicateur plastique ( $\Delta\lambda$ ).

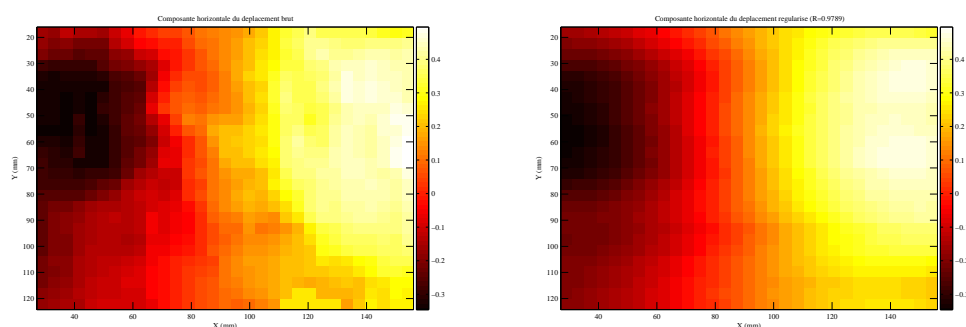
L'angle  $\alpha$  que nous retiendrons est celui que fait la régression linéaire ( $R = 0.9038$ ) tracée avec l'horizontale (fig.3), soit  $\alpha = 49^\circ$ . Cette valeur correspond aux ordres de grandeur de ce paramètre dans la littérature (Yan X.L. *et al.* (1997)). Notons néanmoins que la répartition des déformations volumiques plastiques semble chahutée dans la gamme des déformations déviatoriques faibles. Cette remarque trouve son origine dans le caractère dilatant de ce matériau. La figure fig.3 ne permet néanmoins pas quantifier cette dilatance avec précision. La prise en compte d'un modèle de Drucker-Prager linéaire associé trouve donc ici ses limites.

## 5 Conclusion

Le risque d'apparition d'ornières en surface des chaussées bitumineuses nécessite l'étude du comportement élasto-viscoplastique de l'enrobé. Le confinement jouant un rôle important sur le comportement de ce matériau, le critère de Drucker-Prager semble adapté pour modéliser la part élasto-plastique des déformations. L'identification des paramètres de ce modèle est donc un enjeu majeur. La mesure du paramètre  $\alpha$  est réalisée à partir de l'expression des incréments de déformations plastiques volumique et déviatorique cumulée obtenus par dérivation du champ de déplacement irréversible mesuré. La valeur de cet angle obtenue par cette méthode rejoint les ordres de grandeur de ce paramètre rencontrés dans la littérature. L'identification du second paramètre ( $c$ ) de ce critère sera réalisée par minimisation d'une erreur existant entre le champ de déplacement irréversible mesuré et un même champ obtenu par éléments finis. L'amplitude de ce paramètre est alors la valeur qui minimise l'erreur exprimée.



(a) Composante verticale du déplacement mesuré (b) Composante verticale du déplacement régularisé (R=0.9968)



(c) Composante horizontale du déplacement mesuré (d) Composante horizontale du déplacement régularisé (R=0.9789)

FIG. 2 – Champs de la composante verticale (a et b) et horizontale (c et d) du déplacement en mm (mesuré et régularisé)

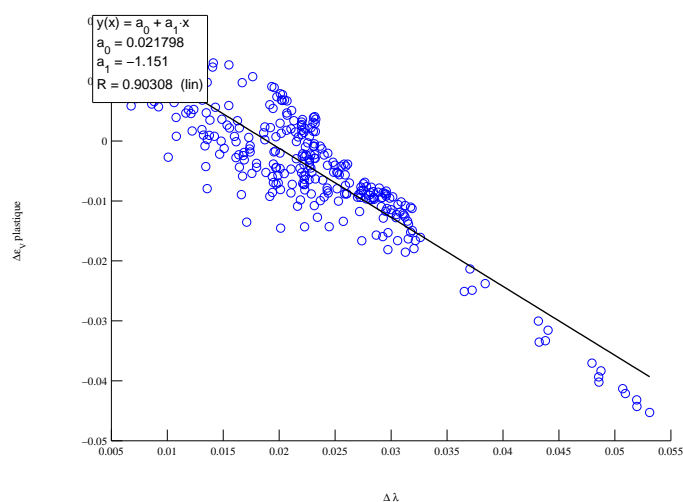


FIG. 3 – Amplitude de l'incrément de déformation plastique volumique ( $\Delta\varepsilon_V^p$ ) en fonction de l'incrément de multiplicateur plastique ( $\Delta\lambda$ )

## Références

- Cuisinier D. *et al.* 2006 Utilisation de la corrélation d'images pour déterminer les paramètres élastiques d'un enrobé bitumeux *Colloque National Mecamat / Ecole de Mécanique des Matériaux "Approches multiéchelles en mécanique des matériaux"*
- Drucker D.C. et Prager W. 1952 Soil mechanics and plastic analysis or limited design *Quarterly Applied Mathematics* **10(2)** pp. 157-165
- Huet C. 1963 Etude par une méthode d'impédance du comportement visco-élastique des matériaux hydrocarbonés *Thèse de docteur ingénieur, Faculté des sciences de l'Université de Paris*
- Jolivet Y. *et al.* 2000 Précautions dans l'interprétation des résultats d'orniérage obtenus avec le simulateur de trafic LCPC, *Second Euroasphalt and Eurobitume Congress* pp. 369-376
- Masad E.A., Little D.N., Tashman L., Saadeh S.I, Al-Rousan T. et Sukhwani R. 2003 Evaluation of aggregate characteristics affecting HMA concrete performance *Rapport technique, Texas Transportation Institute, The Texas A& M University System College Station*
- Perzyna P. 1966 Fundamental problems in viscoplasticity *Advances in Applied Mechanics* **9** pp. 243-377
- Seibi A.C, Sharma M.G, Ali G.A et Kenis W.J. 2001 Constitutive Relations for Asphalt Concrete under High Rates of loading *Transportation Research Record 1767, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C* pp. 111-119
- Sousa J.B et Weissman S.L. 1994 Modeling permanent deformation of asphalt-aggregate mixes *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **63** pp. 224-257
- Yan X.L et Lu W. 1997 Expérimentation et analyse des paramètres intrinsèques des enrobés bitumineux *Mechanical Tests for Bituminous Materials, Di Benedetto & Francken (eds), RI-LEM* pp. 329-333