ÉVALUATION EN LABORATOIRE DE LA MACROTEXTURE DE LA SURFACE DE CHAUSSÉE

M. Ech*** – S. Morel*** – B. Pouteau** – S.Yotte* – D. Breysse*

*Centre de Développement des Géosciences Appliquées, Université Bordeaux 1, avenue des facultés, domaine universitaire, 33405 Talence cedex <u>m.ech@cdga.u-bordeaux1.fr</u>, <u>s.yotte@cdga.u-bordeaux1.fr</u>, <u>d.breysse@cdga.ubordeaux1.fr</u> *** Centre de Recherche & Développement EUROVIA, 2, rue Thierry Sabine, BP 20067, F-33703 Mérignac <u>mech@eurovia.com</u>, <u>bpouteau@eurovia.com</u> *** Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux, UMR 5103, CNRS – INRA – Université Bordeaux I, 69, route d'Arcachon, 33612 Cestas Cedex morel@1rbb3.pierroton.inra.fr

RÉSUMÉ : L'adhérence d'une chaussée est conditionnée par sa texture. Plusieurs échelles de texture existent. Dans cet article on s'intéresse à la macrotexture. Nous proposons d'évaluer en laboratoire la macrotexture d'un béton bitumineux en réalisant une cartographie de la surface à l'aide d'un « profilomètre laser ». Différents indicateurs de texture sont estimés à partir de ces cartographies afin de pouvoir quantifier une évolution de texture due à l'application des cycles de sollicitation mécanique. Un protocole expérimental a été défini et une campagne expérimentale a été réalisée. Cet article décrit la méthode utilisée, présente quelques résultats expérimentaux en les discutant et analysant.

ABSTRACT: Road skid resistance is conditioned by surface texture. Many texture scales exist. In this paper, only the macrotexture is studied. This work proposes to evaluate the asphaltic concrete macrotexture in laboratory, this by scanning specimen surface using a laser profilometer. Then, texture maps are used to calculate surface indicators that allow quantifying the texture evolution happened after surface cyclic solicitation. An experimental procedure was defined and an experimental campaign was done. This paper describes method used, present some experimental results that will be discussed and analysed.

MOTS CLÉS : chaussée, adhérence, macrotexture, cartographie, indicateurs, évolution KEYWORDS: road, skid resistance, macrotexture, mapping, indicators, evolution

Revue. Volume $X - n^{\circ} x/année$, pages 1 à 8

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

1. Introduction

Sur la route, un des facteurs garantissant la sécurité des usagers est l'adhérence pneu-chaussée (Delanne, 1993). L'adhérence d'une chaussée correspond à sa capacité à mobiliser des forces de frottement entre le pneumatique d'un véhicule et la surface de la chaussée sous l'effet des sollicitations engendrées par la conduite. Elle permet la conservation à tout moment de la trajectoire désirée, la réduction des distances de freinage et d'arrêt d'urgence mais aussi la facilitation des manœuvres d'évitement ou de récupération de trajectoire (Cftr – info, 2005).

L'adhérence est conditionnée par la qualité de la couche de roulement, en particulier par sa texture (Cftr – info, 2005). Une description géométrique de la surface de chaussée peut se faire en admettant trois principales échelles de texture : la mégatexture, la macrotexture et la microtexture (Lucas, 1993). Dans cet article nous nous intéressons à la macrotexture qui correspond aux irrégularités de surface dont la gamme de dimensions se situe horizontalement entre 0,5 et 50 mm et verticalement entre 0,2 et 10 mm.

La texture de surface d'une chaussée mouillée ou humide doit permettre l'évacuation de l'eau sous le pneumatique (rôle de la macrotexture) et rétablir des conditions de contact aussi proches que possible de celles rencontrées sur chaussée sèche (rôle de la microtexture) (Hun, 2002).

Nous proposons, dans ce travail, d'évaluer en laboratoire la macrotexture d'un béton bitumineux en réalisant une cartographie de la surface à l'aide d'un profilomètre laser. L'intérêt de cette méthode par rapport aux méthodes classiques (par exemple la PMT (profondeur moyenne de la texture) communément appelé hauteur au sable) réside dans le fait que cette méthode est plus fine et offre plus d'informations sur la surface étudiée. Elle s'inscrit dans une perspective d'optimisation à terme de la composition de l'enrobé.

Le travail expérimental présenté dans cet article est réalisé dans le but de quantifier l'évolution de la texture des éprouvettes en béton bitumineux après sollicitation mécanique. Le choix d'indicateurs fiables quantifiant cette évolution de texture constituera l'originalité de ce travail. Les propriétés relatives à l'organisation spatiale de texture sont étudiées, en se reposant sur le formalisme de la géostatistique, qui permet d'identifier des dimensions caractéristiques de la surface.

2. Procédure expérimentale

2.1. Corps d'épreuves et saisie des données

Les éprouvettes utilisées sont des cylindres de 15 cm de diamètre et de 4 cm d'épaisseur carottées dans des plaques de béton bitumineux (400 mm x 600 mm, 4 cm d'épaisseur). Dans cet article nous présentons les résultats relatifs à 5 éprouvettes fabriquées avec le même matériau et carottées dans une même plaque.

La station de mesure 2D/3D sans contact par balayage laser comprend un capteur laser (gamme de mesure 18mm, résolution verticale : 2 μ m, résolution latérale : 25 μ m), une table de déplacement XY 120 x 120 mm² (précision de positionnement X/Y : 2 μ m), un système de pilotage du système et d'acquisition de données et une caméra vidéo pour visualiser la zone de mesure.

Les cartographies réalisées sont des carrés de $10 \times 11 \text{ cm}^2$ de dimension avec un pas d'échantillonnage de $100 \,\mu\text{m}$ soit pour chaque éprouvette 1000 profils de 1100 points. Les résultats peuvent être visualisés sous forme de cartes en 2D ou en 3D, ce qui permet d'apprécier visuellement la macrotexture de la surface du spécimen.

2.2. Influence des sollicitations mécaniques

La modification de la texture de la surface de l'éprouvette est réalisée à l'aide d'un essai mécanique qui permet d'appliquer des sollicitations cycliques de compression en surface. Cinq éprouvettes ont été testées, une première mesure de texture des éprouvettes a été réalisée à l'état initial. Ensuite les éprouvettes sont soumises à l'essai mécanique en choisissant pour chacune d'elles un niveau de sollicitation variable (nombre de cycles). Après l'essai mécanique, les éprouvettes sont de nouveau scannées et l'évolution de la texture est étudiée en comparant les mesures de texture avant et après l'essai mécanique.

Nous présentons un exemple des cartes obtenues à l'aide du profilomètre laser pour une des éprouvettes avant et après sollicitation mécanique. Les cartes de la Figure 1 offrent une appréciation visuelle (non quantifiable directement) de l'évolution de la texture, où l'on observe nettement un enfoncement de la zone sollicitée (zone verte sur la carte après sollicitation).



Figure 1. Cartographie en 3D pour l'éprouvette (E4) avant et après sollicitation

4 Revue. Volume X – n° x/année

3. Traitement et analyse des résultats

La première étape du traitement de données consiste à corriger par interpolation linéaire les erreurs de mesures (erreurs dues au dépassement du domaine de mesure ou à des problèmes de réflexion du rayon laser) et de redresser les profils pour s'affranchir de l'inclinaison moyenne de la surface. Ensuite une analyse détaillée est faite en calculant pour chacune des surfaces mesurées des indicateurs de rugosité qui sont définis et présentés ci-après, en décrivant brièvement les méthodes utilisées pour ces calculs.

3.1. Indicateurs statistiques de texture

3.1.1. Analyse bidimensionnelle des profils

La littérature (Zygo, 2002) comporte plusieurs indicateurs statistiques permettant de décrire l'état de texture d'une surface. Nous avons retenu ceux les plus fréquemment utilisés qui sont : la moyenne arithmétique R_a , la moyenne géométrique R_q , le coefficient d'asymétrie R_{sk} (skewness) et le coefficient d'applatissement (coefficient de Kurtosis) R_{ku} . Pour un profil donné :

$$R_{a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |z_{i}| \qquad [1] \qquad \qquad R_{q} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} z_{i}^{2}} \qquad [2]$$
$$R_{sk} = \frac{1}{N.R_{q}^{3}} \sum_{i=1}^{N} z_{i}^{3} \qquad [3] \qquad \qquad R_{ku} = \frac{1}{N.R_{q}^{4}} \sum_{i=1}^{N} z_{i}^{4} \qquad [4]$$

où N est le nombre de points du profil et z_i est la distance du point « i » à la ligne moyenne. Pour s'affranchir de l'inclinaison moyenne du profil, on redresse chaque profil par rapport à la ligne moyenne déterminée par la méthode des moindres carrés.

Chaque mesure génère une carte de $1,1 \ge 10^6$ points qui est analysée par profil (ligne par ligne). Il est important d'identifier l'échelle à partir de laquelle la mesure peut être jugée représentative et le degré d'imprécision attachée à chaque échelle. Pour ce faire on choisit une « longueur d'évaluation » sous la forme d'une taille de fenêtre d et l'indicateur de texture est calculé sur cette fenêtre en la faisant glisser sur toutes les origines possibles (points de profil). Ensuite on calcule pour chaque profil et pour chaque taille de fenêtre la moyenne arithmétique et la variance de l'indicateur. L'indicateur global représentant toute la surface analysée sera la moyenne arithmétique de toutes les moyennes arithmétiques trouvées (sur tous les profils), la variance globale retenue est la moyenne arithmétique des variances trouvées. La racine carrée de cette dernière permet de représenter un écart type de l'indicateur sur toute l'éprouvette.

3.1.2. Analyse tridimensionnelle de la surface

Les indicateurs de rugosité sont aussi calculés en 3D en considérant la surface dans son ensemble. On définit, par analogie avec les indicateurs en 2D, les indicateurs de texture en 3D : R_{av} , R_{qv} , R_{skv} et R_{kuv} (l'indice v est pour indiquer que le calcul se fait en volume).

$$R_{a} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} |z(i,j)| \qquad [5] \qquad R_{q} = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} z^{2}(i,j)} \qquad [6]$$

$$R_{sk} = \frac{1}{M \times N \times R_q^3} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} z^3(i,j) \quad [7] \qquad \qquad R_{ku} = \frac{1}{M \times N \times R_q^4} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} z^4(i,j) \quad [8]$$

où M est le nombre de profils, N est le nombre de points pour chaque profil, z(i, j) est la distance du point « (i, j) » à la surface moyenne.

Pour s'affranchir de l'inclinaison moyenne de la surface, on la redresse par rapport au plan moyen déterminé par la méthode des moindres carrés multiples.

Par analogie à la méthode de la bande de taille variable présentée ci-dessus pour les calculs en 2D, nous procédons au calcul des indicateurs sur des zones carrées de taille d x d que l'on déplace sur l'ensemble de l'échantillon pour obtenir une valeur moyenne et un écart type de chaque indicateur à d donné. On fait ensuite varier d pour identifier comment les estimations évoluent avec la dimension de la zone analysée.

3.2. Méthode géostatistique

Les méthodes géostatistiques ont pour but de mettre en évidence des relations spatiales potentiellement existantes entre des données afin d'étudier la structuration de ces dernières (Lopez, 2002). L'outil de base de la géostatistique est le variogramme ou le demi-variogramme dont l'expression discrétisée est la suivante :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i + h) - Z(x_i))^2$$
[9]

 $\gamma(h)$ est le variogramme ou variance incrémentale, *h* est la distance entre deux points, *N*(*h*) est le nombre de couples de points distants de *h* et *Z*(*x*) est une variable aléatoire (dans notre cas l'altitude).

Des informations structurales typiques fournies par un variogramme sont la portée, notée a, représentant la distance entre deux points au-delà de laquelle il n'y a plus de corrélation entre les propriétés de ces points et le palier représentant la limite à partir de laquelle la croissance du variogramme se stabilise. Ces informations permettent d'identifier d'éventuelles dimensions caractéristiques du processus aléatoire (Marache, 2000).

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

4. Résultats expérimentaux

4.1. Variation des indicateurs statistiques avec la longueur d'évaluation - exemples

Nous présentons ici un exemple de résultats montrant les courbes donnant la variation des indicateurs statistiques R_a , R_{sk} avec la taille du domaine d'évaluation (d en 2D et d x d en 3D) pour une éprouvette avant et après sollicitation. Chaque courbe montre la variation d'un indicateur pour une méthode de calcul (2D ou 3D) avec un intervalle de confiance à 95 % en supposant une distribution normale (cette hypothèse est fausse comme l'illustre l'existence de valeurs négatives sur R_a).



Figure 2. Evolution des indicateurs de texture avec la longueur (zone) d'évaluation

D'une manière générale les courbes montent que l'intervalle de confiance diminue quand d augmente. Les indicateurs en 3D se stabilisent plus rapidement que ceux en 2D. En effet, les intervalles de confiance en 2D et 3D ne sont pas calculés de la même manière : en 2D ce sont des écarts types intraprofil- interprofils pondérés tandis qu'en 3D ce sont des écarts types interzones pondérés.

4.2. Evolution des indicateurs statistiques après sollicitation mécanique

Il s'agit de comparer pour chaque éprouvette les indicateurs statistiques calculés avant et après la modification de la texture par sollicitation mécanique. Pour s'affranchir de l'effet de bords (zones non sollicitées), la comparaison porte sur une zone carrée centrale (6 x 6 cm²) de l'éprouvette (de 15 cm de diamètre). Les dimensions d'évaluations retenues sont d = 6 cm en 2D et d x d = 6 x 6 cm² (soit 600 profils de 600 points chacun) en 3D. Pour le calcul en 2dim, l'écart type calculé est l'écart type interprofils. Dans le cas des calculs en 3dim, on ne parle plus de l'écart type car les indicateurs sont calculées uniquement sur la zone d'étude centrale (zone d'étude = zone d'évaluation).



La Figure 3 donne les valeurs trouvées pour les indicateurs de texture avant et après sollicitation pour les éprouvettes : E2, E3, E4, E5, E6 (pour chaque groupe de quatre barres les deux premières correspondent au calcul en 2D et les deux autres au calcul en 3D). Ces éprouvettes ont été sollicitées à des niveaux de sévérité différents. (E3 : 10^4 cycles à 30° C ; E5 et E6 : 10^5 cycles à 30° C, E2 : 10^6 cycles à 30° C + 3x 10^4 cycles à 50° C).

Une première analyse montre nettement l'évolution des indicateurs de texture après sollicitation mécanique. Les valeurs de R_a (R_{av}) ont diminué après sollicitation, la diminution la plus élevée a été observée pour l'éprouvette E4. La valeur absolue de R_{sk} (R_{skv}) a augmenté après sollicitation sauf dans le cas de l'éprouvette E4 où le coefficient d'asymétrie R_{skv} est passé de -1,53 à -1,36. Les indicateurs R_q et R_{ku} présentent les mêmes tendances. De plus des corrélations ont été trouvées entre certains indicateurs (R_a et R_q). Il sera donc possible dans la suite de diminuer le nombre d'indicateurs étudiés.

4.3. Variogramme

Les variogrammes calculés pour toutes les éprouvettes illustrent des phénomènes semblables. La portée du variogramme, de l'ordre de 5 à 10 mm correspond à une échelle représentative de la texture liée à la taille et à l'arrangement des granulats utilisés (taille maximale des granulats = 10 mm). La variance est réduite après chargement sans que la portée soit modifiée. Cette diminution est d'autant plus forte que la sollicitation est sévère (nombre de cycles et température élevées).

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



Figure 4. Variogramme de l'éprouvette E4 avant et après sollicitation

5. Conclusion

Ce travail a permis une évaluation en laboratoire de la macrotexture du béton bitumineux par cartographie laser à l'aide des mesures réalisées sur des carottes. Un logiciel de traitement et d'analyse a été développé. Il permet une traduction de cartes de texture en différents indicateurs statistiques de texture et géostatistique (variogramme) et une quantification des différences de texture dues à l'application de sollicitation mécanique. Ce protocole va être employé pour caractériser les effets de sollicitations sur les enrobés et optimiser la conception de ces matériaux en terme de pérennité de la rugosité.

6. Bibliographie

- Cftr info. Comité français pour les techniques routières. « Mesure de l'adhérence des chaussées routières ». Note *d'information N°11*, mars 2005, 8p..
- Delanne Y.. « Modélisation de la relation adhérence/texture en fonction de la vitesse ». Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°185, mai-juin 1993, p.93-98.
- Hun C.. « Exploitation de la texture d'images de speckle pour caractériser, de façon globale, l'état de surface des chaussées à l'échelle de la microtexture ». *Thèse de doctorat,* Université Louis Pasteur Strasbourg I, décembre 2002.
- LCPC-SETRA, Conception et dimensionnement des structures de chausses. *Guide technique*, Paris, 1994.
- Lopez Ph.. « Comportement mécanique d'une fracture en cisaillement : analyse par plan d'expériences des données mécaniques et morphologiques connues sur une fracture ». *Thèse de doctorat*, Université Bordeaux I, 2000.
- Lucas J., A-Begou P.. « Description de la macrotexture et de la microtexture ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées* N°185, mai juin 1993, p.63-74.
- Marache A.. « Comportement mécanique d'une fracture rocheuse sous contraintes normale et tangentielle ». *Thèse de doctorat*, Université Bordeaux I, 2002.
- Zygo Corporation. MetroPro Surface Texture Parameters. Zygo Corporation, SB-0291, USA, 2002.