

Développement d'une procédure expérimentale contribuant à l'évaluation de la durabilité de la surface de chaussée

Mohsen Ech

CDGA – Université Bordeaux 1 – avenue des facultés – domaine universitaire – 33405 Talence cedex

RESUME. L'adhérence pneu-chaussée est l'un des facteurs principaux qui conditionnent la sécurité routière. Cette adhérence est conditionnée par la texture de chaussée par toutes ses échelles. Le maintien d'un niveau d'adhérence satisfaisant dans le temps nécessite la conservation de la texture de la couche de roulement, donc une bonne résistance de cette dernière aux différents mécanismes de dégradation. Cet article présente une procédure expérimentale développée visant à simuler en laboratoire l'évolution de la macrotexture de chaussée sous contraintes mécaniques verticales répétées à température élevée. L'évolution de la macrotexture est quantifiée en ayant recours à la cartographie laser. Plusieurs indicateurs de texture sont ainsi déterminés en utilisant trois méthodes différentes : statistique, géostatistique et géométrique. Les résultats expérimentaux présentés dans cet article montrent l'influence de la nature du liant et de la température sur l'évolution de la macrotexture.

MOTS-CLÉS : durabilité, enrobé bitumineux, macrotexture.

ABSTRACT. The road skid resistance is one of the principal factors that have significant influence on the traffic safety. This skid resistance is conditioned by the different scales of pavement texture. To maintain an acceptable level of skid resistance during a road service life, it is necessary to conserve the pavement texture in time. Thus, the pavement surface must have a good resistance against the different mechanisms of degradation. This paper presents an experimental procedure aiming to simulate, in laboratory, the pavement macrotexture evolution under repeated vertical loads applied at high temperatures. The laser cartography method is used to quantify the macrotexture evolution. Many texture indicators are determined using three different methods: statistic, geostatistic and geometric. The experimental results presented in this paper show the influence of binder nature and temperature on macrotexture evolution.

KEYWORDS: durability, asphalt concrete, macrotexture.

1. INTRODUCTION

La couche de roulement est la couche supérieure de la chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. La couche de roulement est destinée surtout à remplir son rôle de sécurité et confort pour les passagers et les riverains, ceci pendant toute sa durée de vie. Les conditions du trafic qui deviennent, de plus en plus agressives, ainsi que les impératifs d'économie visent à construire des couches plus minces et plus durables. Ceci était derrière l'apparition de nouvelles techniques, par exemple le développement des liants modifiés par des polymères dans les années 1970 et sa première mise en oeuvre en France dans l'année 1973 (viaduc de Caronte) (RGRA, USIRF, 01). L'objectif de ce travail est de développer une procédure expérimentale simple permettant d'optimiser la formulation des enrobés bitumineux destinés à la construction des couches de roulement. Naturellement, les propriétés de l'enrobé dépendent de plusieurs éléments : la nature du

liant, la nature des granulats, la courbe granulométrique, la mise en œuvre, etc.. Nous nous limitons dans ce travail à étudier l'influence de la nature du liant sur la performance de l'enrobé destiné à la fabrication de la couche de roulement.

2. ANALYSE DU PROBLEME

La sécurité du trafic est la première fonction exigée sur une couche de roulement. On choisit de se limiter à l'étude de la conservation de cette fonction dans le temps. En se situant du côté de la chaussée, la sécurité routière dépend principalement de l'adhérence pneu-chaussée. Des recherches ont pu établir des relations entre les caractéristiques d'adhérence de surface et le risque d'accidents, (Gothié, 1993), (Gothié, 2005), (Patte, 2005). La texture de la surface de chaussée est l'un des facteurs principaux conditionnant l'adhérence pneu-chaussée. On cite plusieurs modèles empiriques (présentés dans (Delanne, 1993)) faisant le lien entre la texture et l'adhérence : Moore (1967), Sabey (1967), Leu-Henry (1978), Yager (1982) et Do (1995).

La conservation d'un bon niveau d'adhérence nécessite donc la conservation de la texture. La texture peut être décrite selon trois échelles principales : la mégatexture, la macrotexture et la microtexture. Une bonne conservation de la texture peut s'expliquer mécaniquement par une meilleure résistance aux mécanismes de dégradations. Le diagramme de la figure 1 montre les effets des mécanismes de dégradation sur les différentes échelles de texture.

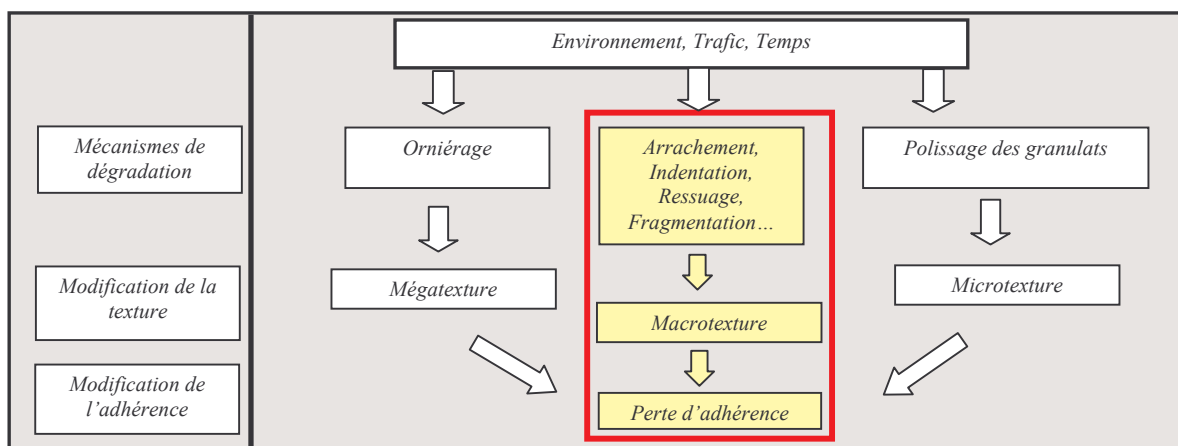


Figure 1. Effet des mécanismes de dégradation sur les différentes échelles de texture

Cette analyse montre que notre domaine d'intérêt correspond à l'échelle de la macrotexture puisque c'est à cette échelle que les propriétés du liant semblent jouer un rôle important. L'orniérage de la surface de chaussée résulte généralement de la déformation de la couche d'assise et non pas de la couche de roulement. La perte de la microtexture provient principalement du polissage des granulats et n'est pas liée concrètement aux propriétés du liant utilisé. L'exclusion de la mégatexture et de la microtexture de notre domaine d'étude est donc justifiée.

Nous retenons deux principaux mécanismes de dégradation de la macrotexture : l'indentation des granulats dans la matrice, un phénomène qui se produit à température élevée, et l'arrachement des granulats favorisé par la présence d'eau (désenrobage). Deux procédures expérimentales ont été développées pour étudier ces mécanismes en laboratoire sur des éprouvettes en béton bitumineux.

Les résultats expérimentaux issus de ces deux procédures expérimentales seront corrélés avec les propriétés mécaniques du liant.

Dans cet article, nous nous limitons à présenter la première procédure expérimentale (simulant l'indentation des granulats à température élevée) en expliquant les différentes méthodes d'analyse et en interprétant brièvement les principaux résultats expérimentaux obtenus.

3. PROCEDURE EXPERIMENTALE ET CORPS D'EPREUVE

Les matériaux utilisés sont des cylindres de 15 cm de diamètre et de 4 cm d'épaisseur carottés dans des plaques de béton bitumineux de dimensions 400 x 600 x 40 mm³. Deux bétons bitumineux ont été testés : un béton bitumineux fabriqué avec un bitume pur et un béton bitumineux (granularité 0/10 mm) fabriqué avec un bitume modifié. Six éprouvettes ont été fabriquées de chaque matériau.

La procédure expérimentale développée comprend un essai mécanique permettant de modifier la face supérieure d'une éprouvette en béton bitumineux par l'application d'un effort vertical sinusoïdal simulant le trafic routier. La charge est transmise à l'éprouvette par l'intermédiaire d'un patin caoutchouteux simulant le pneu. L'amplitude de la charge sinusoïdale appliquée est de 0,6 MPa. Cette amplitude correspond à l'amplitude de la charge appliquée par un pneu d'un véhicule poids lourd sur la surface de chaussée (en France). Pendant l'essai mécanique, l'éprouvette est placée dans un moule métallique assurant son confinement (ce qui est plus proche de la réalité).

La surface de l'éprouvette est scannée à l'aide d'un profilomètre laser (étendue verticale du capteur laser 18 mm, résolution verticale : 2 µm) (Ech et *al.*, 2006). Le suivi de l'évolution de la texture se fait sur une zone centrale carrée de 60 x 60 mm². Le pas d'échantillonnage choisi est de 100 µm. Quatre pas de suivi de l'évolution de la surface de l'éprouvette sont choisis : à l'état initial, après 800, 20000 et 100000 cycles de sollicitation mécanique.

4. METHODES D'ANALYSE DES MESURES DE TEXTURE

Le profilomètre laser permet de donner les résultats sous forme géométrique (cartes) et numériques (relevé topographique). Les données numériques sont utilisées pour déterminer des indicateurs de texture selon les différentes méthodes présentées dans la suite.

4.1. CORRECTION ET REDRESSEMENT

Des erreurs de nature différente peuvent figurer dans les résultats numériques fournis par le profilomètre laser. Ces erreurs sont identifiées, et remplacées par les valeurs résultant de l'interpolation linéaire entre les points voisins (correction en 2D) (Ech et *al.*, 2006). Après l'élimination de ces erreurs, un redressement de la surface est effectué. Le redressement peut se faire en 2D ou en 3D. Le redressement en 2D se fait par rapport à la ligne moyenne déterminée par la méthode des moindres carrées. Le redressement en 3D se fait par rapport à la surface moyenne déterminée par la méthode des moindres carrées multiples.

4.2. INDICATEURS STATISTIQUES DE TEXTURE

Plusieurs indicateurs de texture existent dans la littérature. Parmi les indicateurs adoptés par la norme (ISO 4288 – 1996), nous retenons les quatre indicateurs les plus fréquemment utilisés : la

moyenne arithmétique R_a , la moyenne géométrique R_q , le coefficient d'asymétrie R_{sk} (skewness) et le coefficient d'aplatissement R_{ku} . Par analogie à ces indicateurs en 2D, nous avons défini des indicateurs analogues en 3D. Ces indicateurs seront désignés par : R_{av} , R_{qv} , R_{skv} , et R_{kuv} (l'indice v est pour indiquer que le calcul se fait en volume). Les équations 1 à 4 donne la définition de ces indicateurs.

$$R_{av} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |z(i, j)| \quad [\text{Eq. 1}] \quad R_{qv} = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z^2(i, j)} \quad [\text{Eq. 2}]$$

$$R_{skv} = \frac{1}{M \times N \times R_q^3} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z^3(i, j) \quad [\text{Eq. 3}] \quad R_{kuv} = \frac{1}{M \times N \times R_q^4} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z^4(i, j) \quad [\text{Eq. 4}]$$

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.

Dans la suite, on se limite à présenter les résultats relatifs à l'indicateur R_{av} (en 3D).

Il est important d'identifier l'échelle de la zone d'évaluation à partir de laquelle la mesure peut être jugée représentative. Pour identifier cette échelle, une étude préliminaire a été réalisée. Nous avons scanné des cartes de texture de dimension 100 x 110 mm² sur des éprouvettes similaires à celles présentées dans cette étude. Nous avons procédé ensuite au calcul des indicateurs de texture sur des zones carrées de dimension d x d que l'on déplace sur l'ensemble des échantillons 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. D'après cette analyse, la valeur de d retenue est de 60 mm. Cette valeur de d conduit à une zone de représentativité satisfaisante et située complètement dans la zone sollicitée mécaniquement.

4.2.1. Méthode géostatistique

La méthode géostatistique a pour objet de mettre en évidence des relations spatiales potentiellement existantes entre des données afin d'étudier la structuration de ces dernières. L'outil de base de la géostatistique est le demi-variogramme dont l'expression discrétisée est la suivante (Armstrong, 1997) :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i + h) - Z(x_i))^2 \quad [\text{Eq. 5}]$$

$\gamma(h)$ est le demi-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 (ici l'altitude).

Des informations structurales typiques fournies par un demi-variogramme sont la portée 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 demi-variogramme se stabilise.

4.3. METHODE GEOMETRIQUE : COURBE D'ABBOTT – COURBE DE TAUX DE SURFACE PORTANTE

La norme ISO 13565-2 utilise la courbe d'Abbott pour déterminer des paramètres caractérisant le comportement fonctionnel des pièces métalliques soumises à de fortes contraintes mécaniques. Cette courbe donne pour chaque niveau d'altitude le pourcentage de matière traversée par une ligne parallèle à la ligne de référence du profil étudié et correspondant à ce niveau d'altitude. La méthode normalisée

visé à prévoir l'usure d'une pièce métallique suivant trois critères : le critère de rodage, le critère de fonctionnement et le critère de lubrification. Un paramètre est associé à chacun de ces critères. Ces paramètres sont désignés par R_{pk} , R_k et R_{vk} respectivement. Le critère de rodage correspond aux pics les plus saillants qui vont être usés et disparaître pendant les premières heures de fonctionnement de la pièce. Le critère de fonctionnement représente la quantité de matière disponible à l'usure pendant le fonctionnement de la pièce. Le critère de lubrification détermine les creux disponibles. Ces creux sont utiles pour retenir un lubrifiant nécessaire pour maintenir le bon fonctionnement.

Nous proposons d'utiliser la courbe d'Abbott pour analyser la macrotexture de l'enrobé et d'appliquer la notion de trois critères présentés ci-dessus. Dans ce contexte, R_{pk} correspondrait aux pics saillants de l'enrobé qui vont pénétrer dans le pneu (ou arrachés), R_k à la principale surface de travail entre la chaussée et le pneu et R_{vk} à la capacité de chaussée à évacuer de l'eau. Ce raisonnement pourrait ouvrir la voie pour l'étude des corrélations entre l'adhérence et la texture. Par analogie à la méthode normalisée (ISO 13565-2) qui est une méthode basée sur une analyse profilométrique, nous proposons une analyse similaire en 3D et nous traçons une courbe qu'on va appeler « courbe de taux de surface portante ». Cette courbe donne pour chaque niveau d'altitude le pourcentage de matière traversé par un plan parallèle au plan de référence et se situant à ce niveau d'altitude. La figure 2 est un exemple facilitant la compréhension de la courbe de taux de surface portante. L'exemple montre l'évolution de la surface de contact (S_c) avec l'altitude. Les points $H = 800 \mu\text{m}$ et $H = -10900 \mu\text{m}$ correspondent respectivement au point le plus haut et au point le plus bas de la surface étudiée. La norme (ISO 13565-2) définit un certain nombre de paramètres (tableau 1) dont nous transposons le calcul de 2D en 3D. La figure 3 illustre la méthode de calcul de ces paramètres.

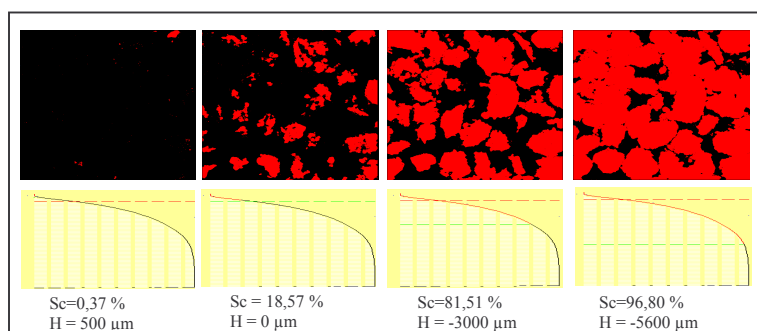


Figure 2. Evolution de la surface de contact avec la profondeur

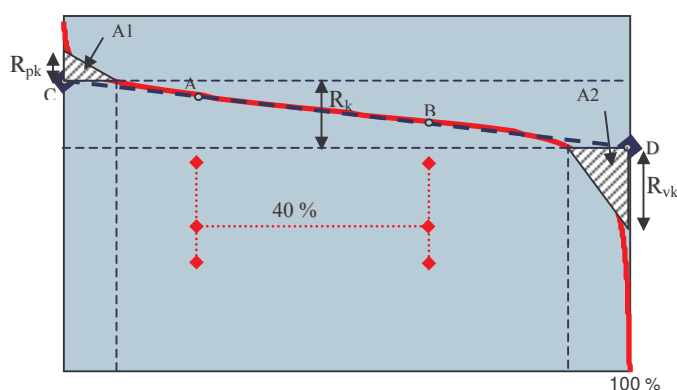


Figure 3. Détermination des paramètres de la courbe d'Abbott

paramètre	signification
R_k	amplitude estimée de la quantité de matière disponible à l'usure et supportant les efforts
R_{pk}	amplitude estimée de la quantité de matière disponible à l'usure et supportant les efforts
$Mr1$	proportion des pics saillants
A1	surface de la portion des pics saillants de la courbe d'Abbott
R_{vk}	amplitude estimée des creux profonds
$100-Mr2$	proportion des creux
A2	surface de la portion des creux de la courbe d'Abbott

Tableau 1. Définition des paramètres de la courbe d'Abbott

5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nous rappelons que deux matériaux ont été testés à deux températures : 35°C et 60°C. Pour chaque matériau, trois éprouvettes ont été testées à chaque température. Ainsi on peut considérer quatre séries de trois éprouvettes chacune (série 1 : enrobé avec bitume pur testé à 35°C (EBP35), série 2 : enrobé avec bitume modifié testé à 60°C (EBM60), série 3 : enrobé avec bitume modifié testé à 35°C (EBM35) et série 4 : enrobé avec bitume modifié testé à 60°C (EBM60)).

5.1. EVOLUTION DES INDICATEURS STATISTIQUES DE TEXTURE

La figure 4 donne les valeurs de l'indicateur R_{av} (absolue et relative à la valeur initiale) en fonction du nombre de cycles (les courbes correspondent à l'évolution de la moyenne de chaque série). Les courbes de la figure 4 montrent une grande influence de la température sur l'évolution de la texture (par exemple après 100000 cycles, les éprouvettes en bitume pur présentent en moyenne une baisse de R_{av} de 28 % environ, cette valeur est proche de 48 % à 60°C). La nature du liant semble aussi un facteur influant mais d'importance inférieure de celle de la température. La plus grande influence du bitume est observée à 60 °C après 800 cycles : 10 % de diminution de R_{av} pour un bitume modifié et 25 % pour un bitume pur. Cet écart de 15% entre les moyennes des éprouvettes de deux matériaux est réduit à 10 % après 20000 cycles et à moins de 4% après 100000 cycles. L'influence de la nature du liant peut être visible aussi à 35 °C (environ 10 % d'écart après 100000 cycles). Ces résultats montrent que l'utilisation d'un bitume modifié (plus dur) permettrait d'améliorer la conservation de la macrotexture : cette amélioration est plus importante par temps chaud (ici 60°C) et aux premiers cycles de sollicitations.

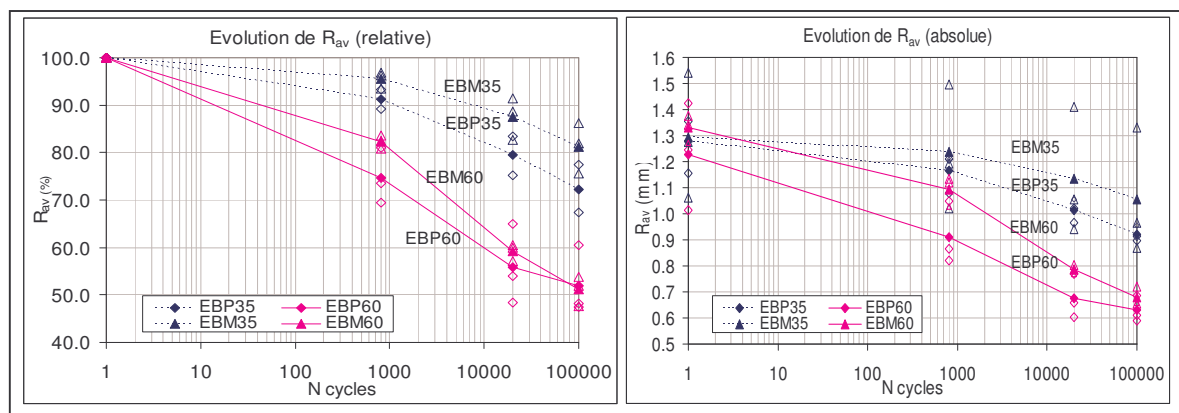


Figure 4. Evolution de la moyenne arithmétique R_{av} (absolue et relative)

5.2. EVOLUTION DU DEMI-VARIOGRAMME

La figure 5 montre un exemple d'évolution du demi-variogramme (calculé dans une direction) avec la sollicitation mécanique. L'exemple présenté correspond à une éprouvette en bitume pur sollicitée à 35 °C. La figure 5 montre une diminution du palier du demi-variogramme avec le nombre de cycles. Concernant la portée, qui est semblée être liée à la taille du granulat, il est difficile de confirmer une variation. La figure 6 donne les valeurs du palier du demi-variogramme en fonction du nombre de cycles. Les courbes correspondent à l'évolution de la moyenne pour chacune des quatre séries : (EBP35, EBP60, EBM35, EBM60). Les courbes montrent une diminution de la variance (palier) du demi-variogramme avec le nombre de cycles. Cette diminution est beaucoup plus importante à 60 °C qu'à 35°C. La nature du liant est un facteur influençant. Les éprouvettes fabriquées avec un bitume

modifié (EBM) présentent généralement une évolution inférieure à celles fabriquées avec un bitume pur EBP (à 35°C et à 60°C). Néanmoins, l'écart entre l'évolution des variances des EBP et EBM augmentent avec le nombre de cycles à 35°C (4,6 % après 800 cycles, 8,3 % après 20000 cycles et 8,6 % après 100000 cycles) et diminue à 60°C (4,34 % après 800 cycles, 7,15 % après 20000 cycles et -1 % après 100000 cycles). Cette analyse montre que l'utilisation d'un bitume modifié (plus dur) permettrait d'améliorer la conservation de la macrotexture. Pourtant par temps chaud (60°C) cette qualité disparaît.

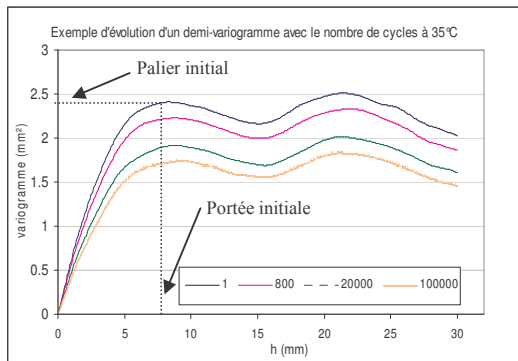


Figure 5. Exemple d'évolution d'un demi-variogramme

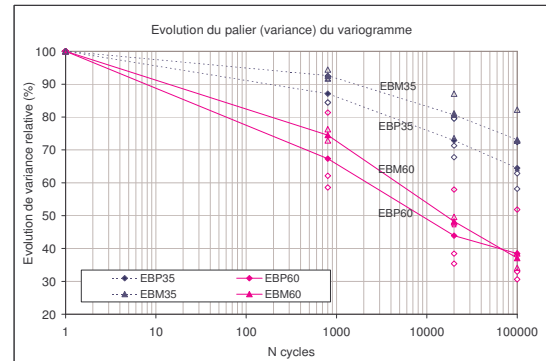


Figure 6. Evolution du palier du demi-variogramme

5.3. EVOLUTION DE LA COURBE DE TAUX DE SURFACE PORTANTE

La figure 7 montre une augmentation de R_{pk} et une diminution de R_k et R_{vk} avec le nombre de cycles. Ces évolutions sont plus importantes à 60 °C. L'augmentation de R_{pk} peut être expliquée par la présence de certains points durs bloqués dans la surface (granulat ne pouvant plus s'indenter dans la matrice). La diminution de R_{vk} signifie une diminution de la profondeur des creux dans la surface. Une diminution de R_k signifie une diminution de l'amplitude du coeur de surface. La nature du liant semble jouer un rôle influençant sur l'évolution des indicateurs R_{pk} et R_k . L'utilisation du bitume modifié peut faire diminuer l'évolution de ces indicateurs et donc contribuer à la stabilité de la macrotexture. Pourtant l'amélioration est décroissante avec le nombre de cycles à 60°C. Ceci rejoint les résultats trouvés par les méthodes statistiques et géostatistiques.

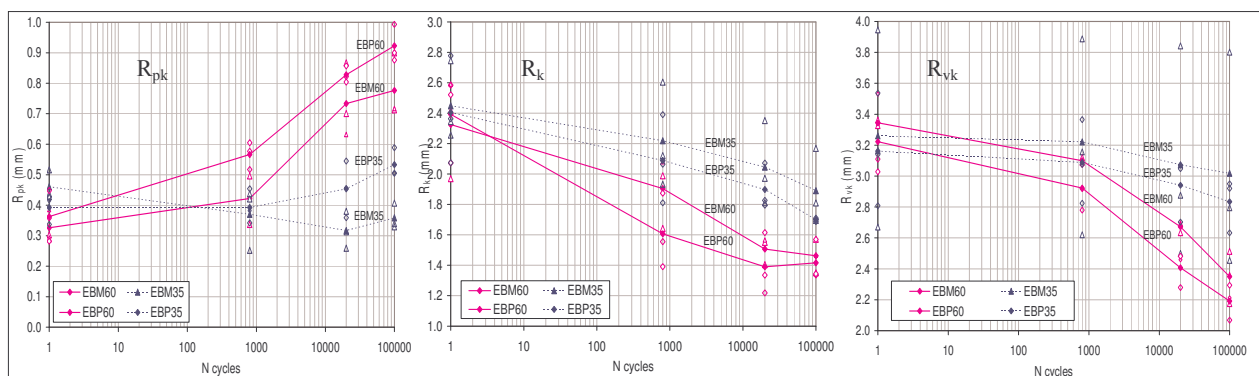


Figure 7. Evolution des paramètres de la courbe de taux de surface portante, les lignes correspondent à l'évolution de la valeur moyenne déterminée à partir des trois valeurs correspondant à trois échantillons

6. CONCLUSIONS

- La procédure expérimentale présentée a permis de modifier la macrotexture des éprouvettes par l'intermédiaire d'un essai mécanique permettant de reproduire en laboratoire les efforts verticaux exercés par le pneu d'un véhicule poids lourd sur la surface de chaussée à température élevée.
- Un logiciel d'analyse de texture a été développé. Il permet de déterminer des indicateurs de texture en utilisant trois méthodes différentes : statistique, géostatistique et géométrique.
- L'analyse des résultats expérimentaux a montré que l'évolution de la macrotexture croît avec le nombre de cycles et la température. Cette évolution se traduit physiquement par une diminution de l'amplitude des creux, une diminution de l'amplitude du plateau et une apparition des pics saillants sur la surface étudiée.
- La nature du liant est un facteur contribuant au maintien de la macrotexture de la surface. Les résultats expérimentaux ont montré que l'évolution de la macrotexture est moins importante pour les éprouvettes fabriquées avec un bitume modifié. Pourtant pour une température trop élevée l'amélioration apportée par l'utilisation d'un bitume modifiée diminue avec le nombre de cycles.

7. PERSPECTIVES

- Des corrélations seront recherchées entre les résultats expérimentaux obtenus et les propriétés mécaniques du bitume (par exemple la viscosité). L'objectif serait de quantifier l'impact de ces propriétés sur la performance d'un enrobé (vis-à-vis la conservation de la macrotexture).
- La richesse d'informations fournies par les différentes méthodes d'analyse de texture notamment la méthode géométrique pourrait contribuer à la modélisation des surfaces de contact pneu-chaussée. Ceci pourrait contribuer à mieux comprendre et quantifier la relation texture-adhérence.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Armstrong A., Carignan J. (1997) « *Géostatistique linéaire, application au domaine minier* », Paris, Les Presses de l'Ecole des Mines, ISBN: 2-911762-07-X.
- Ech M., Morel S., Pouteau B., Yotte S., Breysse D. (2006) « Evaluation en laboratoire de la macrotexture de la surface de chaussée », *24èmes rencontres universitaires de l'AUGC*, La Grande Motte.
- Delanne Y. (1993) « Modélisation de la relation adhérence/texteure en fonction de la vitesse », *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, N°185, mai-juin 1993, p.93-98.
- Delanne Y. (1993) « Modélisation de la relation adhérence/texteure en fonction de la vitesse », *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, no. 185, 1993, p. 93-98.
- Gothié M. (1993) « Influence de l'adhérence sur la sécurité routière », *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, no. 185, 1993, p. 35-38.
- Gothié M. (1995) « Apport à la sécurité routière des caractéristiques de surface des chaussées », *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, no. 22, 2005, p. 5-12.
- Patte L. (2005) « Accidents par perte d'adhérence: relation adhérence-sécurité routière et analyse préalable à l'intervention ». *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, no. 255, 2005, p.199-178.
- RGRA, USIRF (2001), Les enrobes bitumineux. Tome 1, ISBN: 2-913414-40-0.