

Relation entre la microtexture et l'adhérence

Minh-Tan DO

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Une synthèse des travaux menés au LCPC depuis dix ans sur la microtexture des surfaces de chaussée est présentée. Des progrès ont été accomplis dans la mesure et la caractérisation de la microtexture. Les nouveaux descripteurs de la microtexture ont été intégrés dans un modèle de contact pour le calcul d'un coefficient de frottement à basse vitesse.

L'apport de la relation entre la microtexture et le frottement à basse vitesse à la prévision de l'adhérence est ensuite traité. La variation de l'adhérence avec la vitesse est décrite par une courbe dite de Stribeck. Le modèle descriptif de cette courbe fait clairement apparaître la contribution de la microtexture. Une validation a été effectuée sur un ensemble de revêtements comprenant des routes circulées et des pistes d'essai.

En conclusion, le bilan des recherches sur la microtexture est dressé et les voies de recherche à poursuivre sont indiquées.

DOMAINE : Route.

ABSTRACT

RELATIONSHIP BETWEEN MICROTEXTURE AND SKID RESISTANCE

A summary of research work conducted at LCPC over the past ten years on pavement surface microtexture will be presented. Progress has been made over the years in both measuring and characterizing such microtexture. The most recent microtexture descriptors have been integrated into a contact model for the purpose of computing a low-speed friction coefficient.

The contribution of the relationship between microtexture and low-speed friction in predicting skid resistance will then be approached. The variation in skid resistance with respect to speed will be displayed using a so-called "Stribeck" curve. The descriptive model of this curve clearly reveals the microtexture contribution. A validation procedure has been performed on a set of surfacing materials that spans use on roads exposed to traffic loads as well as test tracks.

In conclusion, an assessment of the research to date on microtexture will be drawn and the avenues of subsequent research identified.

FIELD: Roads.

INTRODUCTION

Le rôle de l'adhérence des revêtements de chaussée dans la sécurité des infrastructures routières n'est plus à démontrer. Pouvoir prédire l'adhérence mobilisable par un véhicule est donc le but recherché par de nombreux acteurs :

- le gestionnaire de la route afin d'anticiper l'entretien de son réseau ;
- l'ingénieur routier afin d'améliorer la qualité antidérapante des revêtements dans le but d'améliorer la sécurité des usagers ;
- le fabricant de pneumatiques afin d'améliorer la qualité de ses produits ;
- le constructeur d'automobiles afin d'alerter ou d'assister le conducteur en cas de mauvaise adhérence.

L'un des facteurs primordiaux influençant l'adhérence est la texture des revêtements de chaussée. Des recherches menées dans les années 1960 ont permis de mettre en évidence l'importance de la qualité des granulats sur l'adhérence et de réduire le risque d'aquaplanage par une meilleure maîtrise de la macrotexture de surface. Ces travaux ne visaient pas encore la prévision de l'adhérence à partir d'indicateurs d'état de chaussée. Une recherche pluriannuelle fut entreprise au LCPC au début des années 1990 dans le but de mieux comprendre l'apport de la microtexture à l'adhérence des chaussées. Deux thématiques ont été définies et associées à deux programmes de recherche : « Contribution de diverses échelles de texture routière à l'adhérence des chaussées » (1996-1999) et « Prévision de l'adhérence à partir d'indicateurs d'état de chaussée » (2000-2004).

Une synthèse des résultats obtenus sur ces thématiques est présentée. Après un rappel sur l'adhérence et ses facteurs influents, trois sujets sont traités :

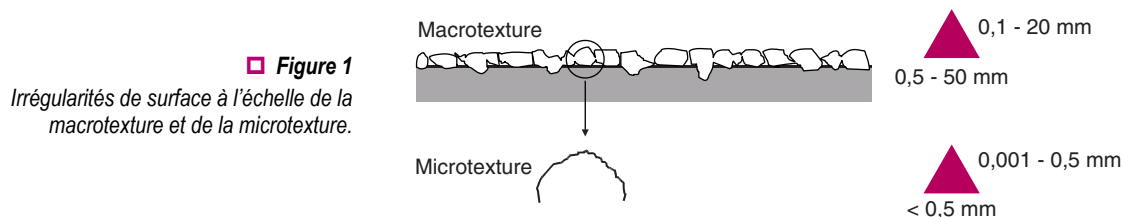
- la mesure et la description de la microtexture ;
- la relation microtexture-adhérence basse vitesse ;
- la prévision de l'adhérence à partir d'indicateurs d'état de chaussée.

RAPPELS SUR L'ADHÉRENCE ET SES FACTEURS INFLUENTS

Définition de la texture

Les surfaces de chaussée sont rugueuses ; cette rugosité peut être observée à deux échelles : une échelle à la dimension des granulats, visible à l'œil nu, et une échelle de rugosité sur les granulats, non visible, mais sensible au toucher. Deux échelles dites « de texture » sont ainsi définies : la macrotexture et la microtexture.

La macrotexture (Fig. 1) correspond à des irrégularités de surface dont les dimensions sont comprises entre 0,1 mm et 20 mm verticalement et entre 0,5 mm et 50 mm horizontalement [1]. La microtexture (cf. Fig. 1) correspond à des irrégularités de surface dont les dimensions sont comprises entre 0,001 mm et 0,5 mm verticalement et inférieures à 0,5 mm horizontalement [1].



Définition de l'adhérence

L'équilibre d'un véhicule lors d'une manœuvre de conduite dépend des forces horizontales de contact développées à l'interface entre les pneumatiques et la surface de chaussée. Ces forces se décomposent en une composante longitudinale F_x (parallèle à la trajectoire du véhicule) et une composante latérale F_y (perpendiculaire à la trajectoire du véhicule). L'adhérence est un terme générique désignant l'étude de ces forces de contact et de leurs facteurs influents. Dans cet article, le terme « adhérence » désignera des « forces de frottement » sans distinction entre leurs orientations. On parlera notamment des coefficients de frottement μ_x et μ_y définis par les formules suivantes :

$$\mu_x = \frac{F_x}{F_z} \quad \mu_y = \frac{F_y}{F_z}$$

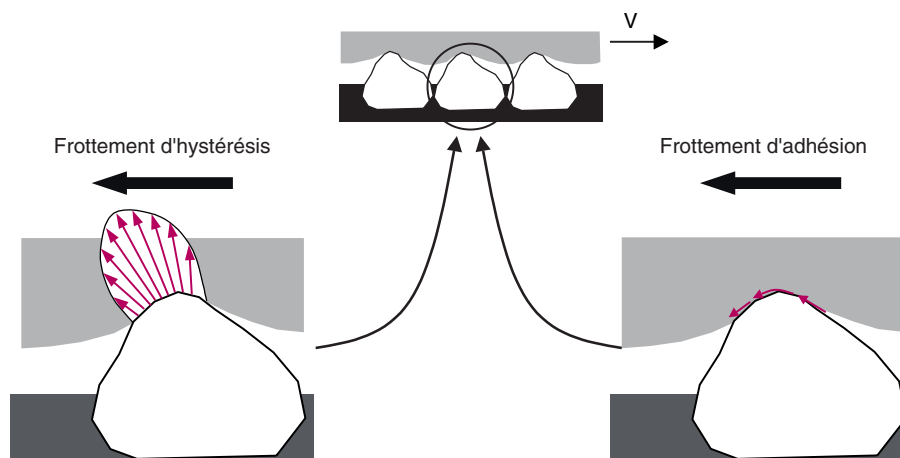
avec

F_z : force normale ; c'est la force verticale exercée entre le pneumatique et la surface de chaussée.

Mécanismes de frottement

Les forces F_x et F_y résultent d'efforts engendrés au niveau du contact entre des pavés de gomme de la bande de roulement du pneumatique et des aspérités de la chaussée (Fig. 2). La résultante des pressions de contact au niveau de chaque pavé comporte une composante verticale qui équilibre la charge normale et une composante horizontale qui s'oppose à l'avancement du pneumatique. Ce phénomène est connu sous le nom d'hystérésis. Lorsque la surface de chaussée est sèche, il se crée également des liaisons de type moléculaire entre la gomme et la chaussée. Ces liaisons sont rompues lorsqu'il y a un mouvement relatif entre le pneumatique et la chaussée. La succession des cycles création-rupture de liaisons est à l'origine de forces horizontales s'opposant, comme dans le cas de l'hystérésis, à l'avancement du pneumatique. Ce phénomène est connu sous le nom d'adhésion. Une description détaillée des mécanismes de frottement est donnée dans la référence [2].

Le poids de chaque composante hystérésis et adhésion dans l'adhérence dépend de nombreux facteurs dont les plus importants sont la nature de la gomme du pneumatique, la présence d'eau à la surface de la chaussée et la texture de la chaussée. Lorsque l'une des surfaces est « contaminée » (eau,



❑ **Figure 2**

Composantes principales des forces de frottement entre un pneumatique et la chaussée.

pollution, etc.), les liaisons deviennent négligeables. On admet donc généralement que le frottement pneumatique/chaussée en présence d'eau provient uniquement de la déformation de la gomme par des aspérités de chaussée.

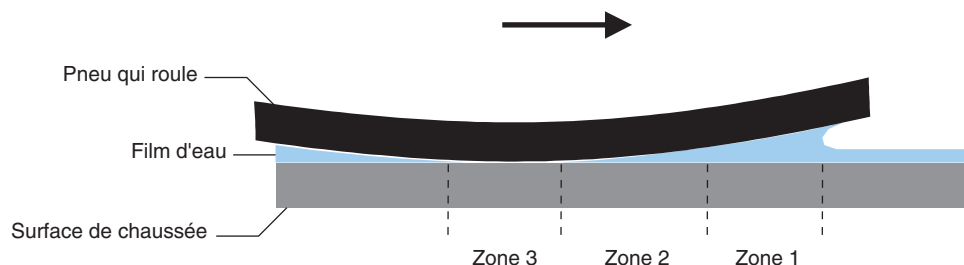
En présence d'eau, l'aire de contact pneumatique/chaussée est décomposée schématiquement en trois zones [3] (Fig. 3) :

- une zone où l'eau s'accumule devant le pneumatique et exerce une pression tendant à le soulever (zone 1) ;
- une zone où l'eau est évacuée progressivement jusqu'à ce que le film d'eau devienne discontinu (zone 2) ;
- une zone où le contact est établi entre le pneumatique et les aspérités de la chaussée (zone 3). Le frottement est essentiellement créé dans cette zone.

Sur chaussée sèche, les valeurs de frottement usuellement rencontrées sont de 1 à 1,3 [4]. Sur chaussée mouillée, la plage est plus large : elle va de 0,1 à 0,9. Cette variation est due à la présence d'eau et aux contributions des textures (macro et micro) de la surface de chaussée.

Rôle de la macrotexture et de la microtexture

Lorsque la chaussée est sèche, le rôle essentiel de la texture est de fournir une aire de contact suffisante afin de développer au maximum la composante d'adhésion. Comme les surfaces de chaussée sont rugueuses, l'aire réelle de contact avec le pneumatique ne représente qu'une fraction de ce qui existerait si la surface était lisse. Les valeurs peuvent aller de 7 à 60 % pour des surfaces très rugueuses à peu rugueuses respectivement [4].

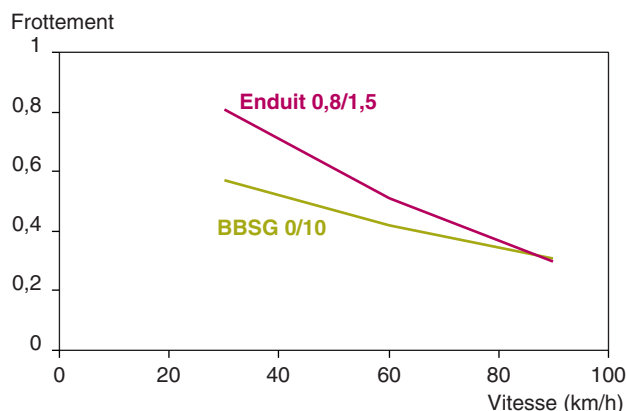


❑ **Figure 3**

Aire de contact entre un pneumatique et la chaussée en présence d'eau.

Figure 4

Exemples de variation du frottement (μ_x) avec la vitesse en présence d'eau (Pistes de référence du LCPC Centre de Nantes).



Lorsque la chaussée est mouillée, il est généralement accepté que la macrotexture permet d'évacuer l'eau afin de réduire les zones 1 et 2 (cf. Fig. 3). Cette influence est visible lorsque l'on observe la variation du frottement avec la vitesse du véhicule. La figure 4 montre deux courbes de variation de μ_x , mesuré à l'aide de l'appareil mlpc® ADHERA en condition roue bloquée, sur deux revêtements : un enduit très fin 0,8/1,5 (dimensions des granulats en mm) et un béton bitumineux semi-grenu (BBSG) 0/10 de profondeurs de texture différentes, respectivement 0,58 et 1,3 en profondeur moyenne de profil (PMP) [1]. La décroissance du frottement avec la vitesse n'est pas la même pour les deux surfaces. La variation de l'adhérence avec la vitesse dépend donc de la macrotexture.

Il est généralement accepté que le niveau d'adhérence dépend de la microtexture, surtout lorsque la vitesse est faible (< 50 km/h). Les courbes de la figure 4 montrent que l'adhérence à 30 km/h est plus élevée sur l'enduit très fin que sur le BBSG, le premier étant plus râpeux que le second. En réalité, le niveau d'adhérence à n'importe quelle vitesse dépend de la microtexture. Cependant, lorsque la vitesse croît, l'eau s'accumule dans l'aire de contact et submerge progressivement la microtexture disponible, rendant son rôle moins important que celui de la macrotexture.

MESURE ET DESCRIPTION DE LA MICROTEXTURE

Trois méthodes sont généralement employées pour mesurer la microtexture d'une chaussée :

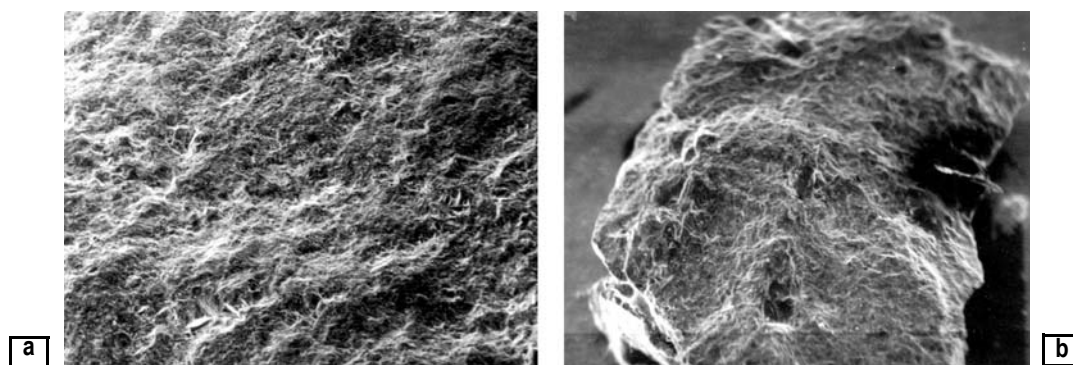
- mesures de frottement à faible vitesse de glissement (méthodes indirectes) ;
- prises d'images de chaussée, éventuellement à différents grossissements (méthodes globales) ;
- relevés de profils ou de cartographies de chaussée (méthodes locales).

Méthodes de mesure indirectes

La séparation des échelles de macro- et microtextures conduit à l'idée selon laquelle l'influence de la macrotexture sur l'adhérence en présence d'eau est prépondérante à vitesse élevée, tandis qu'à basse vitesse la valeur du frottement traduit essentiellement la contribution de la microtexture. Cette idée est le fondement de l'utilisation des valeurs de frottement mesurées à basse vitesse pour évaluer la microtexture d'un revêtement. De nombreux appareils permettent d'effectuer ce type de mesure : on peut citer par exemple le pendule SRT et les appareils SCRIM et ADHERA. Une description de ces appareils peut être trouvée dans [5].

Méthodes de mesure globales

À la plus petite échelle d'observation, les images prises au microscope électronique à balayage (MEB) permettent d'examiner la microtexture à différentes échelles de détails. La Société Michelin [6] définit trois degrés de grossissement : $\times 32$, $\times 320$ et $\times 1\,000$ et une échelle de notation des photos. Les notes dépendent de l'agressivité de la surface jugée visuellement par un opérateur et vont de 0 à 100 pour



■ **Figure 5**

Exemple de notes d'agressivité définies par Michelin.

a - note 6.

b - note 15.

des aspects allant de « lisse » à « très rugueux » respectivement. Un exemple de photographies est présenté sur la figure 5. L'inconvénient majeur de l'utilisation du MEB est la préparation des échantillons à observer. De plus, les prises de photos et leur interprétation demandent un certain degré d'expertise.

La stéréoscopie permet d'obtenir des vues en trois dimensions d'une surface et d'accéder aux informations relatives au relief et à l'angularité. Schonfeld [7] emploie cette technique pour photographier des surfaces de chaussée en laboratoire et sur site. L'auteur propose ensuite une méthode de classification à partir de photographies comportant six paramètres : quatre pour la macrotexture et deux pour la microtexture. Une taille de 2 mm est définie comme limite séparant la macro- et la microtexture. Pour la macrotexture, il s'agit de paramètres décrivant la hauteur, la largeur, l'angularité et la densité des macro-aspérités. Pour la microtexture, il s'agit de paramètres globalisant la taille et l'angularité des micro-aspérités appartenant aux gravillons ou à la matrice de mortier (liant + sable). Pour chaque paramètre, une échelle de notation est associée. La technique de notation de Schonfeld est plus détaillée que celle de la Société Michelin, même si dans leur esprit les deux techniques sont semblables : elles sont fondées sur des appréciations subjectives du degré d'agressivité des surfaces.

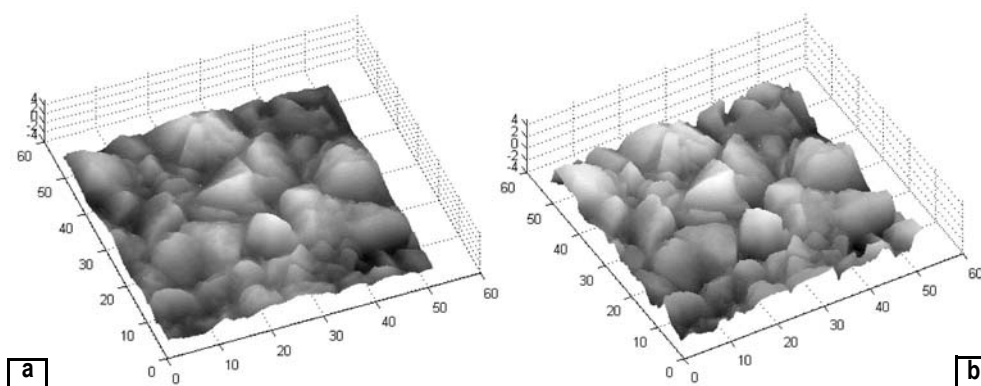
Une collaboration entre le laboratoire « Signal, Image et Communications » (SIC) de l'université de Poitiers et le LCPC a permis de développer un système transportable pour la prise d'images de chaussée. Le prototype est présenté sur la figure 6. Il s'agit d'un appareil de photos à haute résolution (30 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, taille de l'image : 3 000 \times 2 000 pixels) entouré de trois sources lumineuses disposées de manière à fournir des éclairages de la même surface sous trois angles différents. À la résolution maximale (30 $\mu\text{m}/\text{pixel}$), il est possible de prendre des images de 90 mm \times 60 mm. Il s'agit d'une taille d'image et d'une résolution adaptées à l'étude de la microtexture et de l'influence de la macrotexture portante. Les images sont prises séquentiellement puis traitées afin de séparer l'information liée à l'aspect de surface (couleur notamment) et celle liée au relief. Cette technique, appelée « stéréovision photométrique », est fondée sur un modèle décrivant des propriétés photométriques de la surface étudiée (réflexion de lumière). Les modèles utilisés sont détaillés dans [8]. Les images sont ensuite transformées en cartographie de hauteurs. Un exemple de cartographies de surface est présenté sur la figure 7. La ressemblance entre la cartographie issue de l'image et celle relevée effectivement par un capteur laser montre que la technique est prometteuse.

La technique de stéréovision photométrique mise au point par le laboratoire SIC permet de travailler sur des surfaces de chaussée non uniformément colorées, en raison par exemple de la présence de granulats colorés. Cependant, le modèle photométrique de surface nécessite quelques améliorations pour tenir compte de la présence des points spéculaires, notamment sur des surfaces de chaussée neuves.



□ **Figure 6**

Montage expérimental de prises de vue
(Source : Laboratoire SIC).



□ **Figure 7**

Exemple de cartographies de surface.

a - Cartographie convertie de l'image.

b - Cartographie relevée par un capteur laser.

(Source : Laboratoire SIC).

Méthodes de mesure locales

L'emploi des capteurs tactiles de distance pour relever des profils à l'échelle de la microtexture est mentionné dans certains travaux [9]. L'inconvénient de ce type de capteur est le contact direct entre la pointe de diamant et la surface à mesurer induisant des blocages de la pointe au passage dans des creux ou sur une pente importante. Leur utilisation est donc limitée aux surfaces ne possédant pas de macrotexture, par exemple les roches.

On trouve dans la littérature essentiellement des capteurs sans contact utilisant des sources laser. Dans cette famille, deux méthodes de mesure sont employées : projection de profils et balayage.

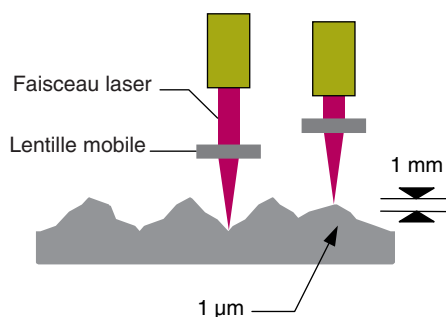
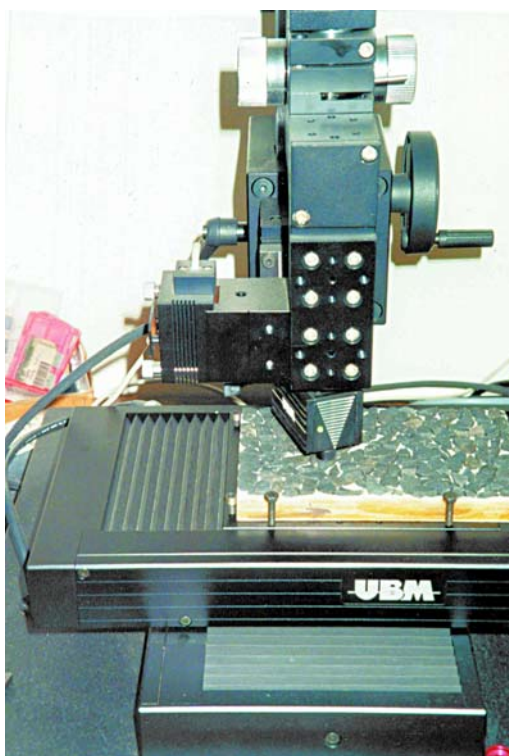
La première méthode consiste à projeter une ligne de lumière sur la surface de mesure puis, à l'aide d'une caméra, à enregistrer ou numériser le profil. Forster [10] mesure des profils de 2 mm de long à la surface d'échantillons de granulats destinés aux essais CPA. L'auteur ne communique pas le pas d'échantillonnage utilisé pour les analyses. Yandell et Sawyer [11] développent un système transportable permettant de mesurer des profils de 60 cm de long avec un pas d'échantillonnage de 50 micromètres.

La seconde méthode consiste à balayer la surface à mesurer avec un capteur projetant un faisceau de lumière sur la surface de mesure. De nombreux types d'appareil existent ; ils sont généralement développés pour la mesure sur des surfaces usinées. Il s'agit de surfaces sans macrotexture ou à macrotexture connue, de type marches d'escalier par exemple, sur lesquelles est « superposée » une microtexture due à l'usinage ou au moulage. Ces surfaces sont de plus diffusantes, c'est-à-dire que la lumière réfléchissante n'a pas une direction privilégiée.

Dans le cadre du programme de recherche sur la contribution des échelles de texture routière sur l'adhérence, le LCPC a utilisé un capteur laser fonctionnant suivant le principe de focalisation dynamique. En chaque point, la lentille de l'objectif se déplace verticalement afin de placer le point de focalisation sur la surface à mesurer (Fig. 8). Le diamètre du faisceau de lumière au point de focalisation est de 1 micromètre.

Une adaptation de ce capteur [12] permet de relever des profils de chaussée dont les caractéristiques typiques sont : longueur = 5 mm ; pas d'échantillonnage = 1 μm . Les mesures sont néanmoins très délicates à cause de la distance de travail du capteur (2 mm de la surface) et de sa profondeur de champ (1 mm). Ce capteur n'est donc utilisable que pour des mesures en laboratoire sur des surfaces relativement planes (avec des gravillons mis à plat, par exemple).

Les progrès accomplis dans la technique des capteurs à laser permettent maintenant de réaliser des mesures de plus en plus fines avec des profondeurs de champ importantes. Ainsi, le LCPC dispose, au sein d'un laboratoire spécialisé dans les études sur la relation texture-adhérence, de deux systèmes équipés de capteurs à laser permettant de relever des profils ou cartographies à différentes échelles (Fig. 9).



□ **Figure 8**
Capteur laser à focalisation dynamique.

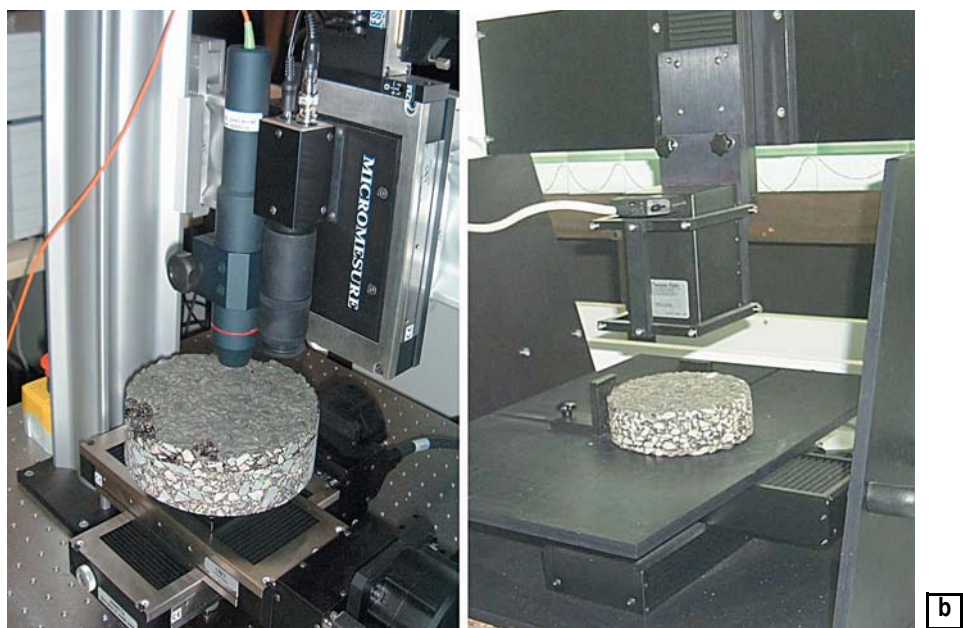


Figure 9
 Systèmes de mesure du laboratoire texture-adhérence du LCPC.
 a - Capteur confocal en champ étendu pour la mesure de la microtexture.
 b - Capteur à front d'onde pour la mesure de la macrotexture.

Les principales caractéristiques de ces deux systèmes sont présentées dans le tableau I. Il est donc possible de relever par exemple une cartographie de chaussée de 50 mm × 50 mm à 100 µm de résolution, puis sur certaines zones hautes (*a priori* en contact avec le pneumatique) de relever des cartographies à 3 µm de résolution. Un exemple de ces relevés est montré sur la figure 10.

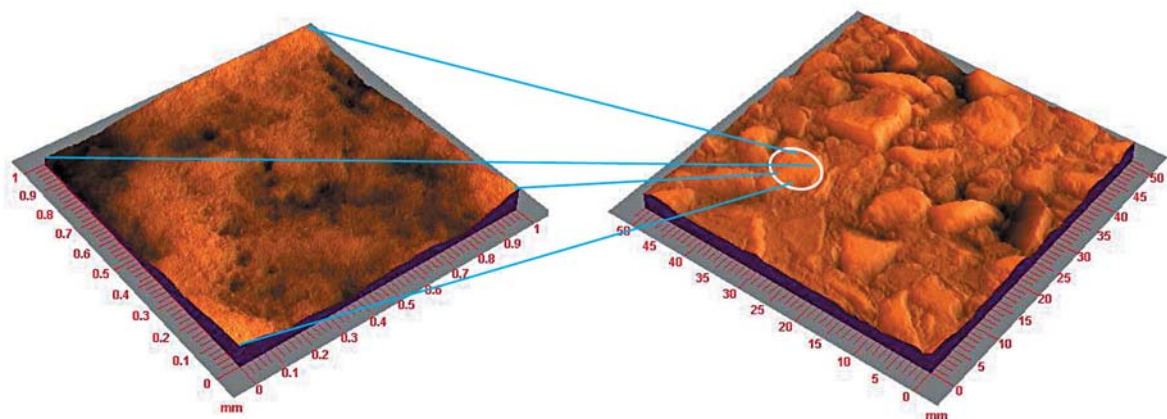


Figure 10
 Exemple de relevés pour une étude multi-échelle de la surface.

TABLEAU I
Caractéristiques des systèmes de mesure de la texture

	Capteur confocal en champ étendu		Capteur à front d'onde
Étendue de mesure (µm)	350	3 000	± 30 000
Erreur de mesure (µm)	± 0,03	± 0,4	± 50
Résolution latérale(µm)	3 (Critère de Rayleigh)	9 (Critère de Rayleigh)	15 (Au centre du champ de mesure)

Descripteurs des profils de microtexture

Les descripteurs calculés à partir de profils de microtexture sont variés. Néanmoins, ils appartiennent généralement à trois familles : taille, forme, densité.

Travaux antérieurs

La taille moyenne des aspérités est caractérisée par le paramètre R_a (moyenne des hauteurs en valeur absolue) ou R_q (écart-type des hauteurs) [13], les deux étant corrélés. Himeno [14] utilise la profondeur moyenne de profil (PMP) dont le calcul est normalisé pour des profils de macrotexture [1]. Forster [10] définit des sommets (points hauts locaux) sur un profil puis calcule leur hauteur par rapport à la vallée (point bas local) voisine immédiate à droite (Fig. 11). Avec la détection de sommets et vallées, il peut calculer également le nombre de sommets et en déduire leur densité.

La forme est souvent caractérisée par la pente moyenne du profil, c’est-à-dire la moyenne des pentes entre deux points successifs du profil [11]. Forster calcule la largeur séparant deux vallées consécutives et définit le rapport entre la hauteur et la largeur comme un facteur de forme (cf. Fig. 11).

Parmi les trois descripteurs définis pour la microtexture (cf. Fig. 11), Forster démontre que la forme est le facteur le plus explicatif du frottement (mesuré à l’aide d’un pendule SRT).

Les profils sont également considérés comme des signaux sur lesquels peuvent s’effectuer des transformations complexes de type transformation de Fourier [15] ou décomposition en ondelettes [14]. L’interprétation des résultats de ces transformations est délicate. Les travaux publiés se limitent généralement à une comparaison subjective entre deux ou trois échantillons. Il est donc difficile de juger la pertinence de ce type d’approche.

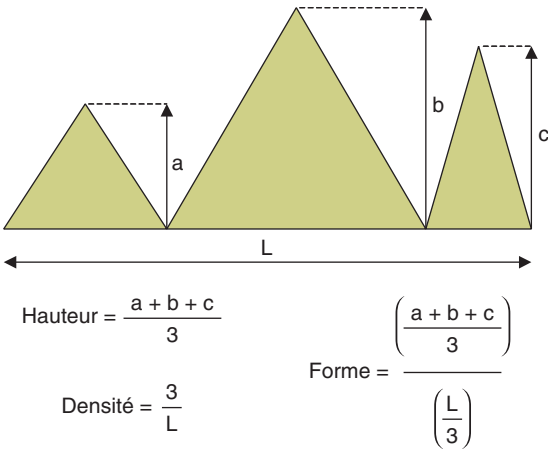


Figure 11
Définition des descripteurs de taille, forme et densité selon Forster [10].

Méthode des indenteurs

Les travaux du LCPC, en collaboration avec le Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) de l'École centrale de Lyon (ECL), sont orientés vers une description de forme. Le principal constat est que le contact pneumatique/chaussée n'est pas établi en tous points de la surface de chaussée, mais seulement au niveau des aspérités appelées « indenteurs » qui déforment le pneumatique. Il s'agit donc de déterminer ces indenteurs et de caractériser leur distribution.

Un indenteur est défini comme une portion de profil comprise entre deux vallées (Fig. 12). Un profil de surface de chaussée comporte plusieurs indenteurs répartis d'une manière aléatoire. Par conséquent, en plus de la forme, deux autres paramètres doivent être considérés pour tenir compte de cette distribution : la densité des indenteurs et le relief créé par leurs positions relatives (espacement et hauteur). La méthode des indenteurs est donc globalement semblable à la description proposée par Forster [10]. Cependant, des différences fondamentales existent entre les deux méthodes, notamment dans la définition des paramètres.

Un schéma des trois paramètres d'indenteur est présenté sur la figure 12. La forme est définie par l'angle 2α au sommet des indenteurs. En réalité, il est préférable de caractériser la forme par la cotangente de l'angle α . En effet, cette fonction est liée à la pression moyenne exercée au sommet des indenteurs [16], qui elle-même est liée à la déformation de la gomme. La densité est définie par le nombre d'indenteurs par unité de longueur de profil. Le relief est défini par l'angle θ formé par le segment reliant les sommets de deux indenteurs consécutifs et l'horizontale.

Le calcul des trois paramètres relief, forme et densité, dépend de la définition des sommets et vallées. Sur un profil comportant N points, un point $n^\circ i$ d'altitude z_i (i variant de 2 à $(N - 1)$) est défini comme un sommet si $(z_{i-1} < z_i \text{ et } z_{i+1} < z_i)$ et comme une vallée si $(z_{i-1} > z_i \text{ et } z_{i+1} > z_i)$. Il s'agit de la définition la plus simple des sommets et vallées. Elle prend en compte tous les indenteurs du profil. Il existe des critères plus complexes permettant de négliger certains indenteurs [17].

L'analyse du relief est effectuée sur la ligne reliant tous les pics (ligne rouge sur la figure 12). L'angle θ caractérisant le relief est déterminé par la formule suivante :

126

$$\theta = \text{Arctg} \left| \frac{z_{k+1} - z_k}{x_{k+1} - x_k} \right| \tag{1}$$

avec

- z_k : altitude du sommet $n^\circ k$;
- x_k : abscisse du sommet $n^\circ k$.

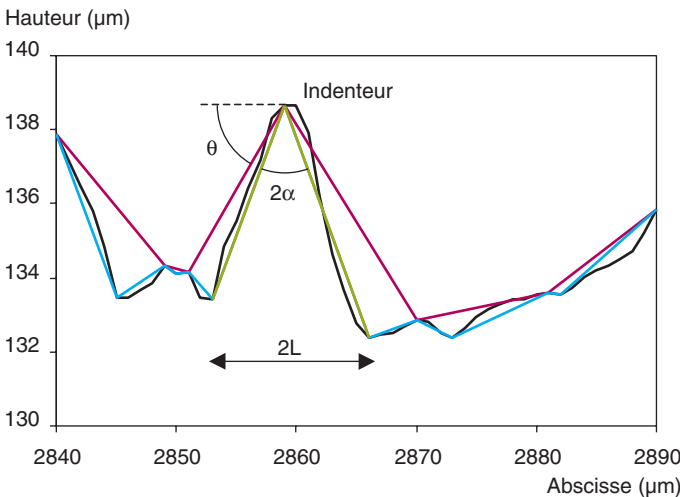


Figure 12
Définition d'un indenteur et de ses caractéristiques

L'analyse de la forme est effectuée sur la ligne reliant tous les sommets et vallées (lignes verte et bleue sur la figure 12). L'angle 2α au sommet des indenteurs est calculé par la formule suivante :

$$\alpha = \frac{1}{2} \times \left[\text{Arctg} \left| \frac{x_m - x_{m-1}}{z_m - z_{m-1}} \right| + \text{Arctg} \left| \frac{x_{m+1} - x_m}{z_{m+1} - z_m} \right| \right] \tag{2}$$

avec

- z_m : altitude de l'extremum n° m ;
- x_m : abscisse de l'extremum n° m.

Les figures 13 et 14 montrent les relations θ – frottement et $\cotg \alpha$ – frottement respectivement. Les mesures de profils et de frottement sont effectuées sur des carottes prélevées sur des routes circulées. Le frottement est mesuré à l'aide de l'appareil SRT. Les profils sont mesurés à l'aide du capteur à focalisation dynamique (cf. Fig. 8) (quinze profils par échantillon ; longueur des profils : 5 mm ; pas d'échantillonnage : 1 μm). Chaque point du graphique représente une surface. La valeur de chaque descripteur représente la moyenne des valeurs obtenues sur tous les indenteurs détectés sur l'ensemble des profils mesurés.

Les variations du frottement avec le relief et la forme des indenteurs sont logiques. En effet, on observe une augmentation du frottement pour des indenteurs pointus ou pour un relief prononcé. On note cependant une certaine dispersion autour de la tendance moyenne.

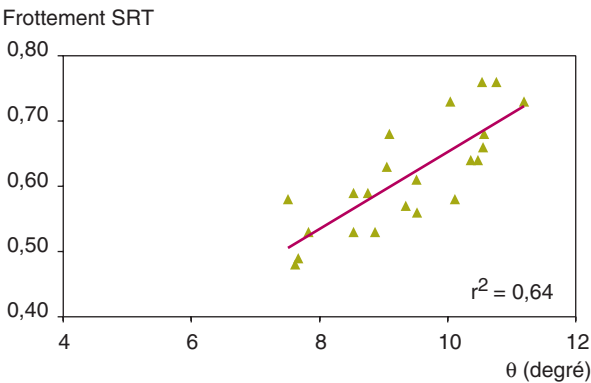


Figure 13
Relation entre le relief et le frottement.

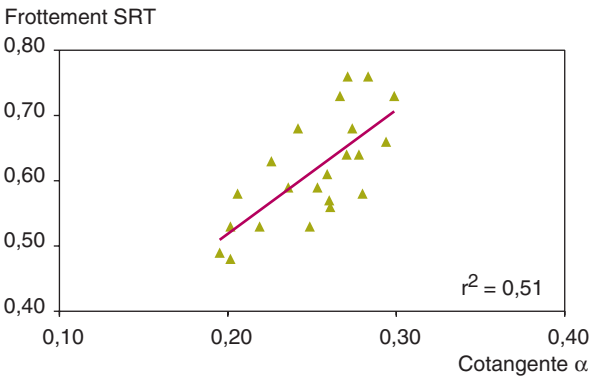


Figure 14
Relation entre la forme et le frottement.

Discussion

La pertinence des descripteurs de microtexture est le plus souvent jugée par leur degré de corrélation avec le frottement. Généralement, les résultats ne sont pas satisfaisants : les corrélations sont faibles, même si elles sont statistiquement significatives.

Le principal problème lorsque l'on veut mesurer des profils de microtexture est la compatibilité entre la résolution et l'étendue de mesure des capteurs. La résolution permet d'atteindre des échelles de plus en plus fines, alors que l'étendue permet de relever des variations de hauteur importantes autour de la ligne moyenne. Généralement, un capteur à haute résolution possède une étendue assez faible, et vice versa. La mesure de la microtexture demande une haute résolution avec, en présence de la macrotexture portante, une étendue importante. Comme ces conditions ne sont pas remplies simultanément, un compromis est donc à rechercher : quelle résolution faut-il adopter pour ne pas négliger trop de détails et en même temps avoir une longueur de profil représentative ?

Cette question renvoie à une question plus fondamentale : à quelle échelle faut-il étudier la microtexture ? On se rend compte que l'échelle « utile » diverge selon les intérêts cherchés : un examen pétrographique demande une résolution de 100 μm , alors qu'une recherche sur l'adhésion entre un pneumatique et une chaussée peut demander une résolution inférieure à 1 μm . Si l'on se réfère aux phénomènes d'entraînement d'eau dans l'aire de contact, les détails de l'échelle 1-10 μm devraient avoir une importance car c'est l'ordre de grandeur du film d'eau dans la zone 3 (cf. Fig. 3).

Les résultats non encore concluants obtenus sur des descripteurs géométriques de la microtexture, conjugués à des méthodes de mesure relativement complexes, ne favorisent pas l'emploi de méthodes directes (globales ou locales) pour la mesure à grand rendement de la microtexture. En réalité, la dispersion observée sur des graphes de corrélation microtexture-frottement suggèrent plusieurs explications :

- les descripteurs proposés ne sont pas, ou tout au moins pas les seuls, explicatifs du frottement (on peut penser par exemple que la fréquence de sollicitation est probablement manquante) ;
- les profils ne contiennent pas, ou pas suffisamment, l'information recherchée ;
- l'échantillonnage n'est pas suffisant.

Des mesures effectuées sur des faces de granulats composant un échantillon destiné à la mesure du coefficient de polissage accéléré (CPA) [18] montrent qu'un grand nombre de profils est nécessaire pour tenir compte de l'hétérogénéité de la microtexture des granulats [10,19]. Blot [19] indique une longueur cumulée (somme de longueurs de tous les profils) de 600 mm. Forster [10] choisit cinq gravillons selon leur fréquence d'apparition sur l'échantillon et relève sept profils de 2 mm de long sur chaque gravillon ; la longueur cumulée est alors de 70 mm. La différence entre les longueurs cumulées citées par les deux auteurs serait liée aux descripteurs géométriques employés.

Les travaux menés ont montré que la longueur d'un profil est très courte (5 mm). Ces profils sont assez « fins » (échantillonnés à 1 μm), mais ne sont peut être pas assez longs pour inclure toutes les échelles de texture « vues » par les pavés de gomme. Pour mettre en correspondance la microtexture et le frottement, il ne faudrait donc pas se limiter uniquement à la mesure de la microtexture, mais étendre les mesures à toutes les échelles en contact avec la gomme. Pour un frottement de type SRT, on pourrait imaginer des profils de quelques centimètres de long pour tenir compte de l'espace situé entre les gravillons qui doit influencer sur l'énergie dissipée.

Des systèmes de type global comme ceux de SIC/LCPC sont prometteurs car le temps de prise d'images est très court (quelques secondes), ce qui permet de prendre plusieurs images de la même chaussée. De plus, les informations sur la macro- et la microtexture sont contenues dans la même image. Même si la résolution de l'appareil photographique (30 $\mu\text{m}/\text{pixel}$) n'était pas aussi élevée que celle d'un capteur à laser (de l'ordre du micron), elle serait peut être suffisante pour distinguer les diverses microtextures routières.

RELATION MICROTEXTURE-ADHÉRENCE À BASSE VITESSE

Cette recherche est conduite par le LCPC dans le prolongement de la collaboration avec le LTDS, qui a démontré que la microtexture influe sur le frottement par la distribution de ses indenteurs. Ces nouvelles connaissances ne donnent cependant qu'une appréciation qualitative de l'apport de la microtexture à l'adhérence. Un modèle théorique permet, d'une part, de décrire des conditions de contact entre un pavé de gomme et un ensemble d'aspérités, et, d'autre part, de calculer, à partir de

la répartition des contraintes, des forces résultant du contact. S'agissant de la modélisation du frottement pneumatique/chaussée, trois questions se posent :

- Quelle échelle de contact le modèle doit-il représenter ?
- Quel type de modèle doit-on utiliser ?
- Quelles sont les hypothèses admissibles ?

De nombreux travaux [20, 21] montrent que l'adhérence conventionnelle peut être calculée à partir de deux données : une donnée sur l'adhérence à basse vitesse et une donnée sur la variation de l'adhérence avec la vitesse. Cette dernière donnée est relativement bien modélisée. Il n'en va pas de même pour l'adhérence à basse vitesse, fortement influencée par la microtexture du revêtement, qui doit être mesurée dans des conditions précises pour la plupart des modèles existants.

Des progrès accomplis dans la compréhension du rôle de la microtexture devraient donc contribuer à l'amélioration des « grands modèles » de prévision. Le modèle à développer est celui permettant de quantifier la relation microtexture-frottement. L'échelle de contact à considérer est donc celle des indenteurs déformant la bande de roulement du pneumatique.

Le frottement pneumatique/chaussée met en jeu de nombreux phénomènes physiques dont certains, à cause de la complexité des calculs, ne peuvent être modélisés qu'à l'aide d'une approche numérique. On peut citer, par exemple, des travaux de Rohde sur la modélisation de l'évacuation du film d'eau entre le pneumatique et la chaussée [22]. Les modèles numériques sont cependant lourds à mettre en œuvre et leur formulation n'est pas toujours explicite en ne faisant pas ressortir les paramètres influents. Un modèle analytique est donc préféré dans le cadre de cette recherche, plus précisément un modèle rhéologique décrivant le contact entre un pavé de gomme et une surface de chaussée. Ce modèle est appelé dans la suite « modèle de Stéfani »*.

S'agissant d'un modèle destiné à l'étude de l'influence de diverses textures routières, et non *a priori* à celle de l'influence de formulations de gomme, la représentation de la chaussée dans le modèle doit être aussi réaliste que possible. La simplification du modèle est donc effectuée au niveau de la gomme : un pavé de gomme est représenté par un solide de Kelvin dont le comportement viscoélastique est décrit par l'association d'un ressort et d'un amortisseur. Le temps de relaxation du solide (rapport viscosité de l'amortisseur/raideur du ressort) est la seule caractéristique de la gomme.

Description du modèle

La géométrie de base du modèle est présentée sur la figure 15. Il s'agit d'étudier la variation des efforts horizontal et vertical exercés par un solide de Kelvin sur le segment ABCD. Pour le contact pneumatique/chaussée, le modèle simule donc la déformation viscoélastique d'un pavé de gomme du pneumatique au passage d'un profil de la chaussée, représenté par le segment ABCD.

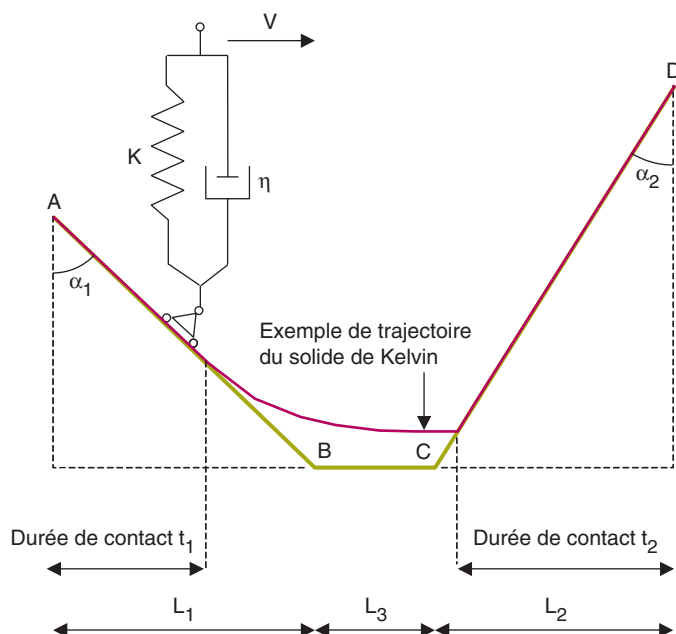
Le solide de Kelvin avançant à une vitesse V est en roulement sans frottement. Le modèle suppose donc que le frottement engendré provient uniquement de la déformation du solide. Cette hypothèse revient à supposer que le frottement pneumatique/chaussée provient uniquement de la déformation de la gomme du pneumatique. Il s'agit d'une hypothèse réaliste car, en présence d'eau sur une surface de chaussée, les liaisons moléculaires entre la gomme et la chaussée sont supposées peu nombreuses voire inexistantes et, en conséquence, la composante d'adhésion du frottement devient négligeable.

La cinématique du contact est déjà développée ailleurs [23]. Elle amène à définir différentes trajectoires du solide de Kelvin en fonction de sa vitesse d'avancement. Ces trajectoires induisent des pertes de contact entre le solide et le segment ABCD. Le modèle permet ensuite de calculer des efforts de contact (horizontal et vertical). Leur intégration sur les durées de contact (t_1 et t_2 dans la figure 15) fournit deux efforts globaux f_h et f_v dans les directions horizontale et verticale respectivement. Un coefficient de frottement (μ) est défini comme :

$$\mu = \frac{f_h}{f_v} \quad (3)$$

Le détail des calculs peut être trouvé dans [23]. Dans cette référence, il a été montré que le modèle de Stéfani fournit des valeurs de frottement proches de celles mesurées à l'aide d'un pendule SRT sur des surfaces composées de gravillons. Il a donc été décidé de poursuivre la validation sur des surfaces routières.

* Modèle développé par Christian Stéfani, chercheur au LCPC.



□ **Figure 15**
Géométrie de base du modèle de Stéfani.

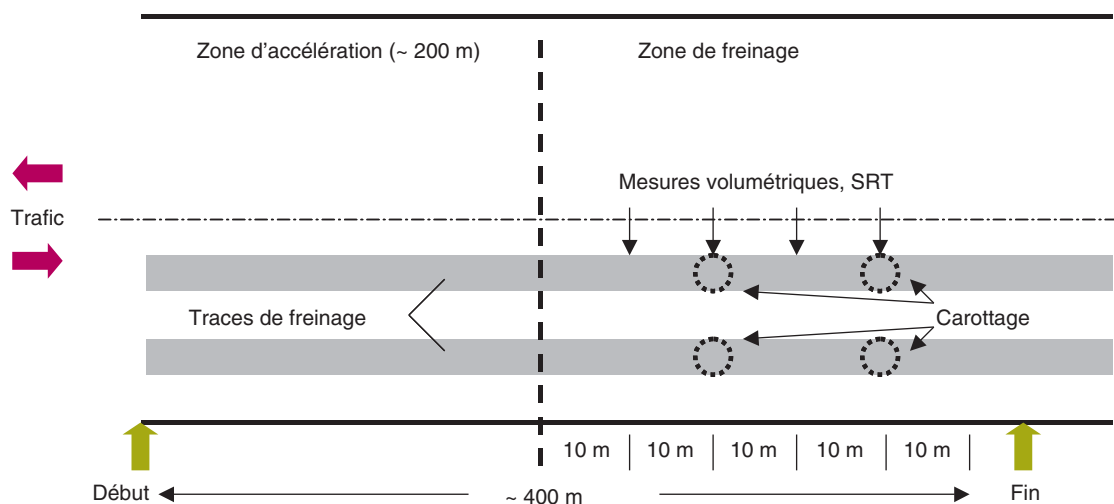
Validation du modèle sur des surfaces routières

130

Campagnes d'essais

Dans le cadre de l'opération de recherche « Adhérence », sept campagnes d'essais sur routes (pistes d'essais et routes circulées) ont été organisées entre 2001 et 2003. L'objectif principal est de rassembler sur le même site le maximum d'informations sur l'adhérence et la texture de la chaussée. Chaque campagne comprend les tâches suivantes :

- mesures d'adhérence : SRT, freinage frontal ;



□ **Figure 16**
Section de test typique.

- mesures de texture : macrotexture (méthode volumétrique, profils) et microtexture (profils et images) ;
- carottage (lorsque c'est possible).

Les essais de freinage et les mesures de la macrotexture sont effectués sur la route. Les mesures de SRT et de profils de microtexture sont menées sur la route ou, de préférence, sur des carottes prélevées dans la chaussée. Les images sont prises sur des carottes. Un schéma illustrant une section de test typique est présenté sur la figure 16.

Les profils de microtexture ont les caractéristiques suivantes :

- sur route : un profil de 200 mm de long échantillonné tous les 10 micromètres ;
- sur carottes : treize profils parallèles de 80 mm de long échantillonnés tous les 10 micromètres.

Calcul du frottement à basse vitesse à partir de la microtexture

Les premières analyses issues de ces campagnes d'essai concernent le calcul du frottement à partir de profils de microtexture et sa comparaison avec le SRT mesuré (Fig. 17).

Ces premiers résultats de comparaison ne sont pas satisfaisants. Toutefois, même si la dispersion est importante (r^2 très faible), on peut dire que la tendance moyenne (représentée par la droite de régression) montre une concordance correcte entre les prévisions et les mesures (points proches de la bissectrice, pente proche de 1).

Sur des images prises à l'aide du système SIC/LCPC, des premières analyses montrent une bonne concordance entre les descripteurs d'images (exprimant le relief de surface) et le frottement SRT [8] (Fig. 18). Ces résultats encourageants confirment d'une part, la nécessité de poursuivre le dévelop-

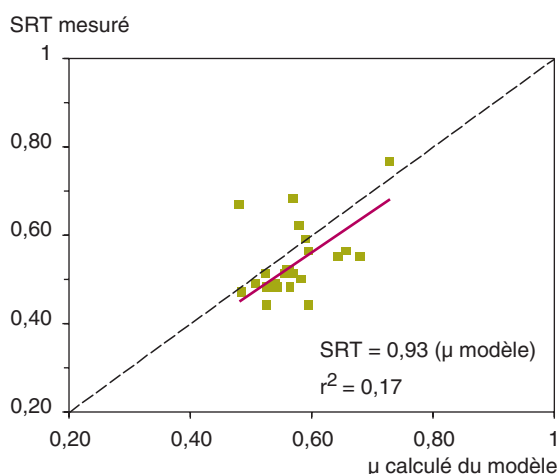


Figure 17
Comparaison entre calcul (modèle de Stéfani) et mesure (pendule SRT).

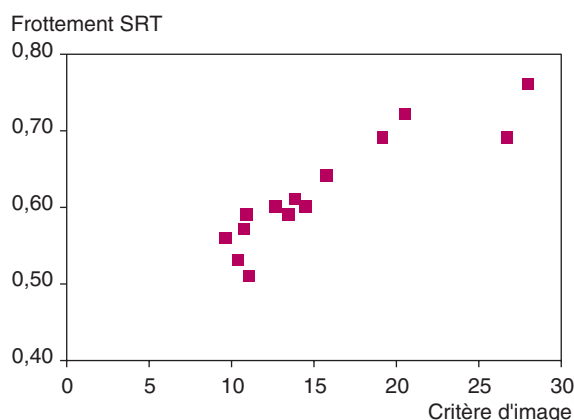


Figure 18
Corrélation entre l'adhérence SRT et les descripteurs d'images.

pement de ce type de système, et, d'autre part, montrent qu'une résolution de l'ordre de la dizaine de microns serait suffisante pour l'étude de la microtexture des chaussées.

PRÉVISION DE L'ADHÉRENCE À PARTIR D'INDICATEURS D'ÉTAT DE CHAUSSEE

Apport de la relation microtexture-adhérence à basse vitesse

La prévision de l'adhérence est un sujet très vaste. On se limitera ici aux discussions sur l'apport de la relation microtexture-adhérence à basse vitesse à l'étude de la dépendance de l'adhérence à la vitesse. Ce dernier aspect est important pour des recherches liées à l'adhérence et à la dynamique des véhicules (harmonisation des matériels de mesure d'adhérence, estimation des distances de freinage, etc.).

Dans un article récent [24], il a été montré que la forme générale de la courbe μ_x – vitesse (pour un glissement de roue fixé) peut être représentée par la formule suivante :

$$\mu_x = \mu_0 \exp \left[- \left(\frac{V}{V_s} \right)^\alpha \right] + \beta V \quad (4)$$

avec

- μ_x : adhérence longitudinale ;
- μ_0 : adhérence à la vitesse théorique nulle ;
- V_s : vitesse dite de « Stribeck » ;
- α : constante déterminant la forme de la courbe adhérence-vitesse ;
- β : constante exprimant le caractère « visqueux » de l'adhérence, négligeable dans le cas des données utilisées dans [24].

On rappelle que le glissement de roue est donné par la formule suivante :

$$\kappa = \frac{V - R\omega}{V} \quad (5)$$

avec

- κ : glissement de roue ;
- V : vitesse du véhicule ;
- R : rayon de la roue ;
- ω : vitesse de rotation de la roue.

On voit que le modèle de variation exponentielle de l'adhérence proposé par l'AIPCR [20] est un cas particulier de la formule (4) ($\alpha = 1$; $\beta = 0$). Lorsque l'exposant (α) est supérieur à 1, quand la quantité d'eau sur la chaussée augmente par exemple, la courbe adhérence-vitesse tend vers une forme en S-inversé (Fig. 19). Il a été montré que l'exposant (α) dépend de la quantité d'eau sur la chaussée (celle dépassant la tête des aspérités de chaussée) et de l'usure des pneumatiques [24]. Sur la base d'essais sur la piste de référence du LCPC à Nantes, la plage de variation de (α) est comprise entre 1 et 3 [24].

Dans [24], il a été montré également que le terme μ_0 (obtenu pour une surface de chaussée par ajustement du modèle sur des mesures d'adhérence à différentes vitesses sur cette même surface) est bien corrélé avec la mesure au pendule SRT. Cette correspondance peut être expliquée par le fait que, selon la forme de la courbe montrée de la figure 19, l'adhérence est presque constante dans la zone des basses vitesses et, par conséquent, μ_0 devrait être du même ordre de grandeur que toute mesure d'adhérence effectuée à des vitesses inférieures à 20 km par heure.

On voit donc ici le lien qui peut être établi entre des modèles reliant la microtexture à l'adhérence à basse vitesse (à l'échelle du contact pavé de gomme/aspérité de chaussée) et ceux traitant des échelles de contact plus importantes (pneumatique/chaussée).

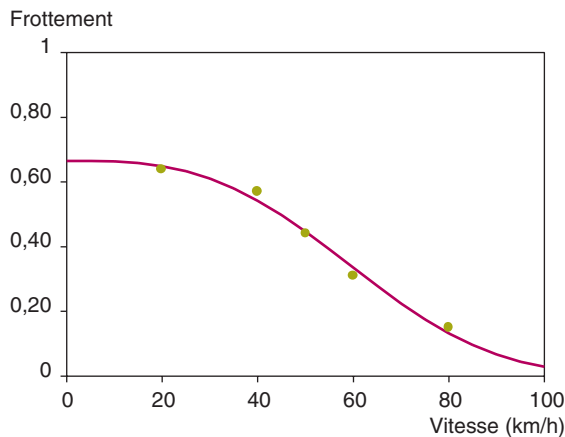


Figure 19

Exemple de variation de l'adhérence avec la vitesse pour des hauteurs d'eau importantes. Mesure roue bloquée, 3 mm d'eau, pneu commercial usé. (La courbe lisse représente l'ajustement de la formule (4) sur les points de mesure).

Calcul de μ_x roue bloquée à partir d'indicateurs de microtexture et de macrotexture

Il s'agit de l'illustration d'une application possible du modèle décrit par la formule (4). Dans ce paragraphe, on utilisera ce modèle pour prédire μ_x obtenu en condition de freinage roue bloquée à deux vitesses différentes. Les essais de freinage font partie des campagnes d'essais sur routes de l'opération de recherche « Adhérence ». La démarche est la suivante :

- calculer μ_0 à partir de la microtexture en utilisant le modèle de Stéfani ;
- calculer V_s à partir de la macrotexture en utilisant la formule empirique suivante (applicable au véhicule ADHERA) [24] :

$$V_s = 117 \cdot \text{PMP}^{0,191} \cdot \kappa^{0,9} \quad (6)$$

- tracer la courbe théorique $\mu_x - V$ pour α égal à 1 et 3 respectivement (la quantité d'eau sur la chaussée n'étant pas connue au moment des essais, ces courbes constituent un fuseau dans lequel devraient se situer les mesures).

Estimation de μ_x roue bloquée à partir d'essais de freinage

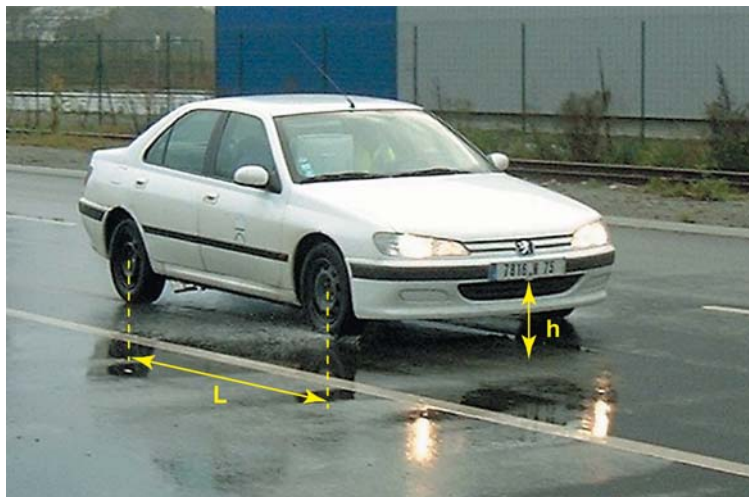
Les essais de freinage sont effectués à l'aide d'un véhicule léger instrumenté (Peugeot 406) du LCPC avec et sans déclenchement du système ABS (Fig. 20). Les décélérations sont enregistrées lors du freinage progressif des deux roues avant du véhicule entre deux vitesses V_1 et V_2 , puis le frein est relâché. Les essais sont effectués à deux plages de vitesse : 90 km/h (V_1) à 70 km/h (V_2), et 60 km/h (V_1) à 40 km/h (V_2).

L'adhérence est estimée à partir de mesures de décélération à l'aide de la formule suivante [4] :

$$\mu_x = \frac{M \left(\left[\frac{V_1^2 - V_2^2}{2 \cdot d} \right] - \left[A + B \cdot \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)^2 \right] \right)}{Z_{av} + M \cdot \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2 \cdot d} \right) \cdot \frac{h}{L}} \quad (7)$$

avec

- μ_x : adhérence estimée ;
- M : masse du véhicule ;
- d : distance de freinage ;
- V_i ($i = 1, 2$) : vitesse d'essai ;
- Z_{av} : charge statique sur l'essieu avant ;
- h : hauteur du centre de gravité du véhicule (cf. Fig. 20) ;



□ **Figure 20**

Véhicule instrumenté du LCPC.

- L : empattement du véhicule (cf. Fig. 20) ;
- A, B : coefficients de résistance au roulement (force de résistance au roulement =

$$M \cdot \left[A + B \cdot \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)^2 \right]$$

Les estimations sont $\mu_{x,\max}$ (respectivement $\mu_{x,\text{bloqué}}$) pour des freinages avec ABS (respectivement sans ABS). Par convention, les vitesses associées sont 80 km/h et 50 km/h pour des décélérations de 90 km/h à 70 km/h et de 60 km/h à 40 km/h respectivement. Des résultats non publiés montrent que ces estimations sont proches (à 5 %) des mesures enregistrées à l'aide de systèmes complexes comme des moyeux dynamométriques.

Prévision de $\mu_{x,\text{bloqué}}$

En l'absence de données sur la PMP, on a utilisé la profondeur moyenne de texture (PMT) [1] obtenue à partir de mesures volumétriques de la macrotexture. Pour des mesures à roue bloquée, le glissement de roue (κ) devient 1. Le fuseau de courbes $\mu_x - V$ est montré sur la figure 21. On y a reporté également les deux points de mesure obtenus sur la même surface. On voit que, malgré quelques approximations (calcul de μ_0 , utilisation de la formule (6) pour le véhicule instrumenté, etc.), les prévisions ont un sens : les mesures se retrouvent dans le fuseau théorique.

CONCLUSIONS

Dans cet article, on a présenté une synthèse des recherches menées au LCPC depuis dix ans sur l'apport de la microtexture à l'adhérence des chaussées. On a regardé notamment :

1. comment mesurer et caractériser la microtexture ;
2. comment relier la microtexture à l'adhérence basse vitesse ;
3. comment utiliser les acquis sur la microtexture pour améliorer la prévision de l'adhérence à partir d'indicateurs d'état de chaussée.

Concernant le premier problème, on a vu que deux techniques de mesure géométrique peuvent compléter des mesures de frottement de type SCRIM ou SRT. La technique locale utilise des capteurs à laser à très haute résolution et permet d'étudier très finement la microtexture. Cependant, l'incompatibilité entre la finesse des détails (liée à la résolution) et l'étendue de la zone mesurée (liée à la profondeur de champ) ne permet pas à ce type de capteurs d'ausculter simultanément la macro- et la

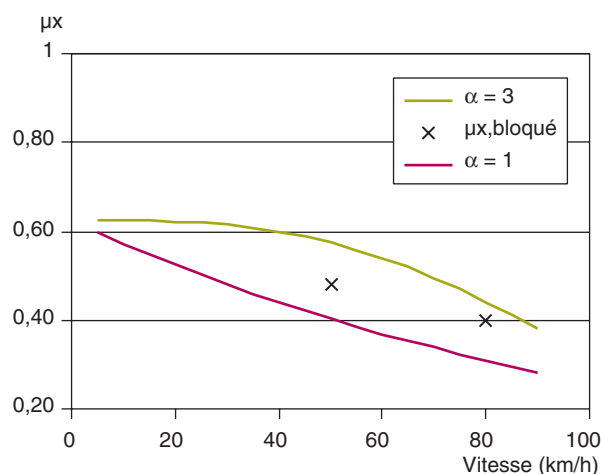


Figure 21

Prévision du $\mu_{x, \text{bloqué}}$ à partir de la macro- et microtexture.
(Pistes de référence LCPC Centre de Nantes. Revêtement en béton bitumineux semi-grenu).

microtexture, condition nécessaire pour l'étude des surfaces de chaussée. De plus, la lenteur des mesures, liée à la finesse recherchée, n'autorise pas des mesures sur la route et un échantillonnage important. La technique globale, longtemps limitée aux observations visuelles des surfaces, trouve maintenant une voie de recherche prometteuse. L'utilisation des appareils photographiques à haute résolution est combinée avec des techniques modernes de traitement d'images pour fournir (en quelques secondes) des relevés de cartographie de hauteurs équivalents à ceux obtenus avec des capteurs à laser (en quelques heures) avec une finesse suffisante pour l'étude des microtextures routières (dizaines de microns). Il s'agit donc d'un bon compromis entre des mesures indirectes, trop dépendantes de l'appareillage, et des mesures locales.

Il est néanmoins nécessaire de conserver les techniques locales pour la compréhension des phénomènes et pour le développement de descripteurs de microtexture. Des méthodes de description de forme peuvent être développées en tenant compte de deux aspects :

- la prise en compte de la seule partie de profil de chaussée intéressant le contact avec le pneumatique ;
- la description des aspérités qui vont déformer la gomme du pneumatique.

Toutes les techniques de description présentées ne font pas l'unanimité ; elles ne sont pas suffisamment explicatives du frottement. Cependant, il est à noter que toutes les analyses ont été effectuées sur des profils de microtexture qui souffrent de problèmes d'échantillonnage (nombre et longueur insuffisants). Avec l'avènement des systèmes d'images comme celui de SIC/LCPC, il faudrait reprendre les analyses sur les cartographies obtenues.

Des modèles analytiques peuvent être développés pour expliquer le rôle de la microtexture dans la génération du frottement par hystérésis (déformation viscoélastique). Le modèle de Stéfani en est un exemple, mais d'autres modèles existent également. La validation de ces modèles souffre encore du problème d'échantillonnage, notamment sur des routes circulées.

Les efforts développés doivent cependant être poursuivis. Des modèles comme celui de Stéfani peuvent être combinés avec des modèles de variation du frottement avec la vitesse pour estimer par exemple l'adhérence disponible lors d'un freinage en ligne droite. La microtexture est donc une composante importante dans la prévision de l'adhérence à partir d'indicateurs d'état de la chaussée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ISO 13473-1, *Characterization of Pavement Texture by Use of Surface Profiles – Part 1 : Determination of Mean Profile Depth*, 1997.
- [2] FOUCARD J., *Rôle du pneumatique dans le phénomène d'adhérence*, article paru dans ce même numéro du Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées.
- [3] MOORE D.F., *The Friction of Pneumatic Tyres*, Elsevier Ed., 1975.
- [4] Société Michelin, *Le Pneu – l'adhérence*, Société de technologie Michelin, septembre 2000, 92 pages.

- [5] GRATIA G., Méthodes et matériels de mesure de l'adhérence, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **185**, mai-juin 1993, pp. 107-119.
- [6] LUCAS J., BEGOU P.-A., Description de la macrotexture et de la microtexture, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **185**, mai-juin 1993, pp. 63-74.
- [7] SCHONFELD R., Photo Interpretation of Pavement Skid Resistance in Practice, *Transportation Research Record*, **523**, 1974, pp. 65-75.
- [8] BEN SLIMANE A., *Caractérisation de textures rugueuses par traitement d'images : application aux revêtements routiers*, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, **2004**.
- [9] YANDELL W.O., A New Theory of Hysteretic Sliding Friction, *Wear*, vol. 17, **1971**, pp. 229-244.
- [10] FORSTER S.W., *Aggregate Microtexture : Profile Measurement and Related Frictional Levels*, Report FHWA/RD-81/107, FHWA, **1981**.
- [11] YANDELL W.O., SAWYER S., Prediction of Tire-Road Friction from Texture Measurements, *Transportation Research Record*, **1435**, 1994, pp. 86-91.
- [12] DO M.-T., *Contribution des échelles de texture routière à l'adhérence des chaussées*, Rapport de synthèse, ERLPC, **CR 35**, 2004, 55 pages.
- [13] AFNOR, **NF E 05-015**, *État de surface des produits – Partie 1 : Généralités, Terminologie, Définitions*, **1984**.
- [14] HIMENO K., NAKAMURA Y., KAWAMURA A., SAITO K., Skid Resistance of Asphalt Pavement Surfaces Related to their Microtexture, *Proceedings of the 4th International Symposium on Pavement Surface Characteristics*, 22-24 mai 2000, Nantes, France, pp. 207-215.
- [15] DAMES J., *The Influence of Polishing Resistance of Sand on Skid Resistance of Asphalt Concrete*, *Surface Characteristics of Roadways : International Research and Technologies*, ASTM STP 1031, W.E. Meyer and J. Reichert, Eds., ASTM, **1990**, pp. 5-13.
- [16] SABEY B.E., Pressure Distribution beneath Spherical and Conical Shapes Pressed into a Rubber Plane, and their Bearing on Coefficient of Friction under Wet Conditions, *Proceedings of the Physical Royal Society*, vol. **71**, **1958**, pp. 979-988.
- [17] FAHL C.F., Motif Combination – A New Approach to Surface Profile Analysis, *Wear*, vol. **83**, **1982**, pp. 165-179.
- [18] AFNOR, *Granulats – Mesure du coefficient de polissage accéléré des gravillons*, **NF P 18-575**, **1990**.
- [19] BLOT G., *Relevés de paramètres de la microtexture des roches avec un microprofilographe*, Rapport LCPC, FAER 1.02.41.7, **1987**.
- [20] WAMBOLD J.C., ANTLE C.E., HENRY J.J., RADO Z., *Expérience internationale AIPCR de comparaison et d'harmonisation des mesures d'adhérence et de texture*, Rapport final, AIPCR Éd., **1995**.
- [21] MANCOSU F., PARRY A., LA TORRE F., Friction Variation Due to Speed and Water Depth, *Proceedings of the 4th International Symposium on Pavement Surface Characteristics*, 22-24 mai 2000, Nantes, France, pp. 249-258.
- [22] ROHDE S.M., On the Effect of Pavement Microtexture on Thin Film Traction, *International Journal of Mechanics Science*, vol. **18**, **1976**, pp. 95-101.
- [23] DO M.-T., ZAHOUANI H., Frottement pneumatique/chaussée : influence de la microtexture des surfaces de chaussée, *Actes des Journées Internationales Francophones de Tribologie (JIFT)*, Association Française de Mécanique, SIRPE Éditeur, **2002**.
- [24] DO M.T., MARSAC P., MOSSET A., Tribology approach to predict the variation of tire/wet road friction with slip speed, *5^e Symposium International sur les Caractéristiques de Surface SURF*, Toronto, juin **2004**.