



**HAL**  
open science

## Frottement Pneumatique / Chaussée – Influence de la microtexture des surfaces de chaussée

Minh Tan Do, Hassan Zahouani

► **To cite this version:**

Minh Tan Do, Hassan Zahouani. Frottement Pneumatique / Chaussée – Influence de la microtexture des surfaces de chaussée. JFT (Journées Internationales Francophones de Tribologie), May 2001, France. 15p, tableaux, ill., schémas, graphiques, bibliogr. hal-00851303

**HAL Id: hal-00851303**

**<https://hal.science/hal-00851303>**

Submitted on 13 Aug 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# FROTTEMENT PNEUMATIQUE / CHAUSSEE – *Influence de la microtexture des surfaces de chaussée*

Par

**Minh-Tan DO**

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)  
Route de Bouaye – BP 4129  
44341 BOUGUENAIS

et

**Hassan ZAHOUANI**

Ecole Centrale de Lyon (ECL)  
Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) – URA 855  
36, avenue Guy de Collongue – BP 163  
69131 ECULLY

## 1. INTRODUCTION

L'adhérence d'une chaussée correspond à sa capacité à mobiliser des forces de frottement entre le pneumatique d'un véhicule et la surface du revêtement de la chaussée sous l'effet des sollicitations engendrées par la conduite : accélérations, freinages, changements de direction, etc. Elle permet :

- de conserver à tout moment la trajectoire désirée, notamment en virage ;
- de réduire les distances de freinage et d'arrêt d'urgence ;
- de faciliter les manœuvres d'évitement ou de récupération de trajectoire.

L'adhérence des chaussées dépend non seulement des caractéristiques du revêtement de la chaussée, mais également des facteurs liés au véhicule (suspension, vitesse, etc.), aux pneumatiques (pression de gonflage, profondeur de sculptures, etc.) et à l'état de la surface de la chaussée (déformations, épaisseur d'eau, pollution, etc.). Les facteurs liés aux surfaces de chaussée, et en particulier ceux relatifs à la texture, sont ceux sur lesquels les ingénieurs routiers peuvent agir.

La texture des surfaces de chaussée permet l'évacuation de l'eau sous le pneumatique et de rétablir des conditions de contact aussi proches que possible de celles rencontrées sur chaussées sèches. Les aspérités composant la texture des surfaces de chaussée se classent selon deux échelles, en fonction de leurs dimensions horizontales et verticales :

- l'échelle de la macrotexture couvre les aspérités dont la gamme de dimensions est de 0,5 mm à 50 mm horizontalement et de 0,2 mm à 10 mm verticalement ;

- l'échelle de la microtexture couvre les aspérités dont les dimensions sont inférieures à 0,5 mm horizontalement et à 0,2 mm verticalement.

La présence de la microtexture est primordiale pour rompre les films d'eau d'épaisseur inférieure à 0,1 mm dont la présence dans l'aire de contact pneumatique/chaussée réduit le frottement à des valeurs quasi nulles. Lorsque le contact avec le pneumatique est établi, les pavés de gomme de la bande de roulement sont déformés par les aspérités de la chaussée : ces déformations de type viscoélastique sont à l'origine du frottement d'hystérésis, qui constitue la part essentielle du frottement entre le pneumatique et la chaussée en présence d'eau.

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) développe depuis quelques années des recherches visant à mieux comprendre l'apport des échelles de texture, allant du micron au centimètre, au frottement pneumatique/chaussée. Cet article présente les résultats d'une part sur la détermination de descripteurs pertinents permettant d'étudier l'influence de la microtexture des revêtements de chaussée sur le frottement, issus d'une collaboration entre le LCPC et le Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) de l'Ecole Centrale de Lyon (ECL), et d'autre part sur le développement d'un modèle permettant d'estimer le frottement à partir de données de texture.

## 2. DEMARCHE

La démarche consiste à identifier, à partir de méthodes de caractérisation existantes, des descripteurs explicatifs du frottement. La validation de ces descripteurs par corrélation avec le frottement permet de confirmer leur pertinence.

Un modèle rhéologique est ensuite développé, dont la géométrie intègre les descripteurs identifiés, pour décrire le contact entre un pavé de gomme et des aspérités de chaussée. La validation du modèle est basée sur des comparaisons entre le frottement calculé par le modèle et le frottement mesuré.

## 3. PROGRAMME EXPERIMENTAL

### 3.1 *Echantillons*

Les échantillons utilisés sont des plaquettes rectangulaires de 100 mm × 150 mm dont la surface est constituée de gravillons fixés dans une matrice de résine (Fig. 1). Les gravillons, de tailles variant entre 6 mm et 10 mm, proviennent de 13 carrières. Treize plaquettes sont fabriquées, chacune étant composée de gravillons provenant de la même carrière.

La fabrication des plaquettes consiste à disposer des gravillons dans un moule rectangulaire à fond plat à l'aide d'un dispositif mécanisé, puis à remplir le moule avec un sable fin puis une résine à prise rapide. Cette procédure de fabrication, dont une description détaillée est donnée dans la référence [1], permet d'avoir des surfaces à tester, se trouvant en fond de moule, relativement planes. Cette géométrie accentue l'influence de la microtexture des gravillons sur le frottement généré par le glissement d'un pavé de gomme sur la surface des plaquettes. En première approximation, on peut considérer qu'une différence de valeurs de frottement entre deux plaquettes est due essentiellement à leur microtexture.



Figure 1 – Echantillons utilisés

Après démoulage, les plaquettes sont soumises à des cycles de polissage en laboratoire. L'action de polissage consiste à projeter sur les surfaces, avec une pression de 10 MPa, un mélange d'eau et d'abrasifs fins. La projection est faite à l'aide d'une buse animée d'un mouvement de balayage au-dessus des surfaces (Fig. 2). La procédure est décrite dans la référence [1].

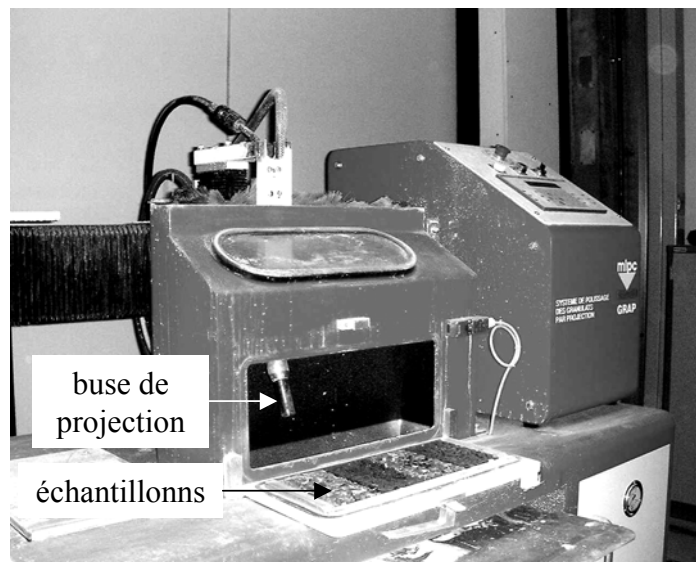


Figure 2 – Appareil de polissage par projection

Ce traitement fait évoluer la microtexture des gravillons : les gravillons provenant des roches peu polissables conservent leur microtexture initiale ; ceux provenant des roches très polissables perdent leur microtexture initiale et deviennent très lisses. Le polissage en laboratoire permet donc d'accentuer la différence de microtexture entre les 13 plaquettes.

## 3.2 Mesures

### 3.2.1 Mesures de frottement

Les mesures de frottement sont faites à l'aide d'un dispositif appelé « pendule SRT » [2]. Un pendule portant à son extrémité un patin de caoutchouc est lâché sans élan d'une position horizontale fixe (Fig. 3). Après une rotation d'un quart de tour, le patin entre en contact avec la surface de la chaussée à mesurer avec une vitesse de glissement de l'ordre de 3 m/s. Un ressort applique le patin sur cette surface avec une force déterminée. Un dispositif de

réglage permet de maintenir la longueur de glissement dans des limites déterminées ( $126 \pm 1$  mm). La hauteur maximale de remontée du pendule, qui dépend de l'énergie absorbée par le frottement, est repérée par une aiguille placée devant un cadran gradué directement en valeurs de « coefficient de frottement mesuré avec le pendule » ou plus simplement « frottement SRT ».

Malgré son principe de mesure simple, l'estimation du frottement à l'aide du pendule SRT est représentative des conditions d'usage : les valeurs de frottement SRT sont bien corrélées avec celles de distance d'arrêt nécessaire à un véhicule freinant à 50 km/h (résultats non publiés).

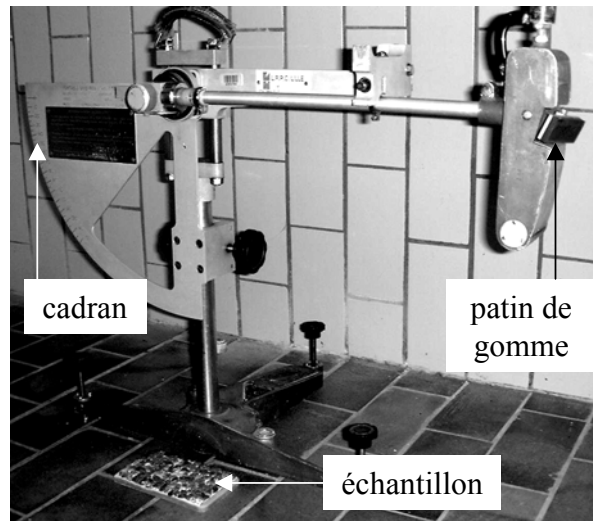


Figure 3 – Pendule SRT

### 3.2.2 Mesures de microtexture

Les mesures de microtexture sont faites à l'aide d'un capteur tactile du LTDS. Le rayon de la pointe de contact est de  $2 \mu\text{m}$ . La profondeur de champ du capteur est de 6 mm.

Pour éviter un blocage éventuel de la pointe de contact lors de son déplacement sur les surfaces à tester, l'espace entre les gravillons est rempli avec une résine. Sur chaque plaquette, 15 profils sont mesurés dans une zone correspondant à l'aire de frottement du pendule SRT ( $\approx 75 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ ). La longueur des profils varie entre 12 et 25 mm en fonction de la nature des surfaces à mesurer, cumulant une longueur totale d'environ 300 mm. Le pas d'échantillonnage est de  $4 \mu\text{m}$ .

## 4. RESULTATS

### *4.1 Description de la microtexture*

#### 4.1.1 Définition des paramètres descripteurs

La recherche de descripteurs géométriques pertinents pour étudier la relation entre la microtexture et le frottement est focalisée sur la partie utile des profils de microtexture : il

s'agit d'aspérités de profil appelées « indenteurs » dont les sommets sont susceptibles de toucher le pneumatique.

Un indenteur doit accomplir deux fonctions dans l'aire de contact entre le pneumatique et la chaussée : rompre le film d'eau et, lorsque le contact est établi, déformer la gomme du pneumatique pour générer le frottement. Ces deux fonctions dépendent de la forme des indenteurs [3][4] : un indenteur de forme pointue accélère l'écoulement de l'eau et exerce une pression élevée qui facilite la rupture du film d'eau et accroît la déformation de la gomme du pneumatique.

La plupart des méthodes existantes se limitent à la caractérisation de la forme d'un indenteur isolé. Or le profil d'une surface de chaussée comporte plusieurs indenteurs qui sont répartis d'une manière aléatoire. Une caractérisation complète devrait donc tenir compte de deux autres paramètres : la densité des indenteurs et le relief créé par leurs positions relatives (espacement et hauteur).

Sur le profil présenté dans la figure 4, un indenteur est défini comme un triangle formé par un sommet et ses deux vallées voisines. La forme de l'indenteur est caractérisée par la cotangente du  $\frac{1}{2}$  angle ( $\alpha$ ) au sommet de l'indenteur. Le relief créé par la disposition des indenteurs est caractérisé par l'angle ( $\theta$ ) qui n'est autre que la pente locale des segments reliant les sommets de deux indenteurs consécutifs. La densité d'indenteurs est définie comme étant le nombre d'indenteurs par unité de longueur de profil.

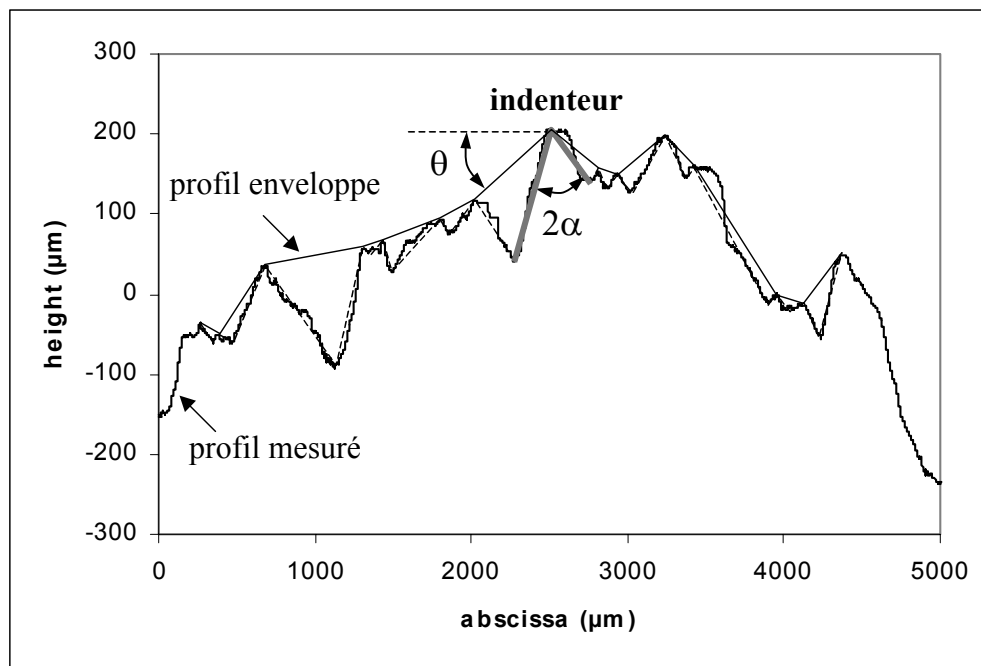


Figure 4 – Définition des paramètres de forme et relief

Les sommets (resp. vallées) sont définis comme étant des points de profil plus hauts (resp. plus bas) que leurs voisins de droite et de gauche. Les formules de calcul de  $\theta$  et  $\alpha$  sont les suivantes :

$$(1) \quad \theta = \tan^{-1} \left| \frac{z_{s+1} - z_s}{x_{s+1} - x_s} \right|$$

avec  $z_s, x_s$  : hauteur et abscisse du  $s^{\text{ème}}$  sommet.

$$(2) \quad \alpha = \frac{1}{2} \times \left[ \tan^{-1} \left| \frac{x_e - x_{e-1}}{z_e - z_{e-1}} \right| + \tan^{-1} \left| \frac{x_{e+1} - x_e}{z_{e+1} - z_e} \right| \right]$$

avec  $z_e, x_e$  : hauteur et abscisse du  $e^{\text{ème}}$  extremum.

#### 4.1.2 Relation microtexture – frottement

Un programme est développé sous Matlab® pour déterminer la forme et le relief des indenteurs à partir de profils de microtexture. Comme le pas d'échantillonnage est de 4  $\mu\text{m}$ , le plus petit indenteur qui puisse être détecté a une largeur de 8  $\mu\text{m}$ . Sur chaque profil, le programme détecte tous les indenteurs puis calcule pour chaque indenteur les valeurs de  $\cotg(\alpha)$  et  $(\theta)$  associées. A partir de l'ensemble des valeurs de  $\cotg(\alpha)$  et  $(\theta)$  des 15 profils mesurés sur une plaquette, le programme calcule les valeurs moyennes respectives qui caractériseront la microtexture de la surface de cette plaquette.

Les valeurs moyennes de  $\cotg(\alpha)$  et  $(\theta)$  sont ensuite corrélées aux valeurs de frottement SRT. Les figures 5 et 6 montrent qu'il existe des relations étroites entre le frottement et les descripteurs de forme et relief, confirmant la pertinence de ces descripteurs. Par ailleurs, les tendances sont logiques : elles montrent que la présence d'aspérités pointues et mises en relief induit des valeurs de frottement élevées.

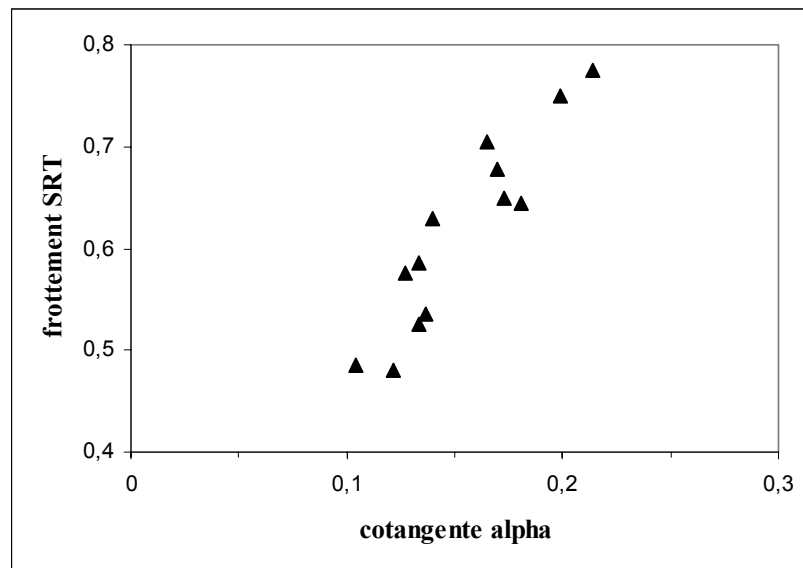


Figure 5 – Relation entre la forme des indenteurs et le frottement

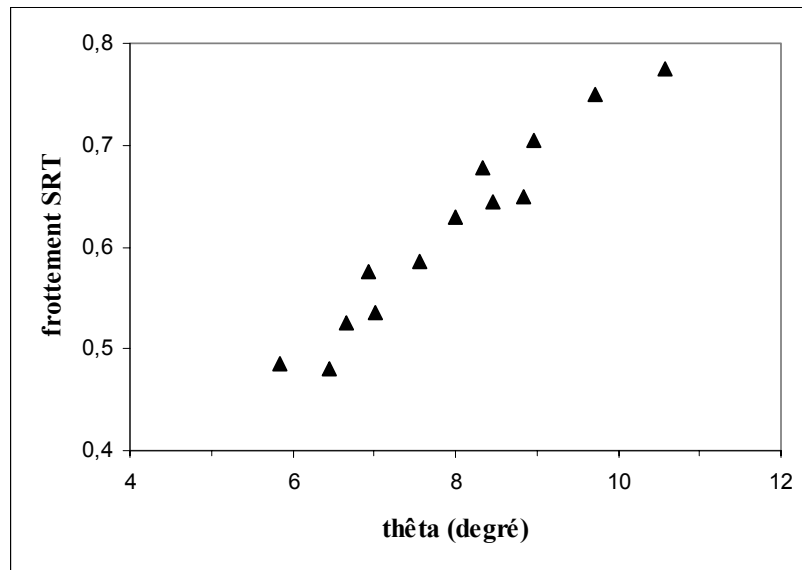


Figure 6 – Relation entre le relief créé par les indenteurs et le frottement

## 4.2 *Modèle de contact*

Le frottement SRT est représenté un modèle rhéologique, appelé « modèle de Stéfani », décrivant le contact entre un solide de Kelvin et un « motif » de profil de chaussée. L'usage de ce type de modèle est motivé par sa simplicité et par la possibilité d'y inclure les descripteurs angulaires développés dans le paragraphe 4.1.

### 4.2.1 Géométrie du modèle

La géométrie de base du modèle est présentée dans la figure 7. Il s'agit d'étudier la variation des efforts horizontal et vertical exercés par le solide de Kelvin sur un « motif ». Un motif est composé de deux pics séparés par une vallée de largeur  $l_3$ . Les deux pics sont repérés respectivement par les angles  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ , les largeurs  $l_1$  et  $l_2$ , et l'angle  $\theta_{12}$ .

Le solide de Kelvin avançant à une vitesse  $V$  est en roulement sans frottement sur le motif. Le modèle suppose donc que le frottement généré lors du passage du solide de Kelvin sur le motif provient uniquement de la déformation du solide, autrement dit, on suppose que le frottement SRT provienne uniquement de la déformation de la gomme du patin. 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 étant peu nombreuses voire inexistantes, la composante d'adhésion du frottement devient négligeable.



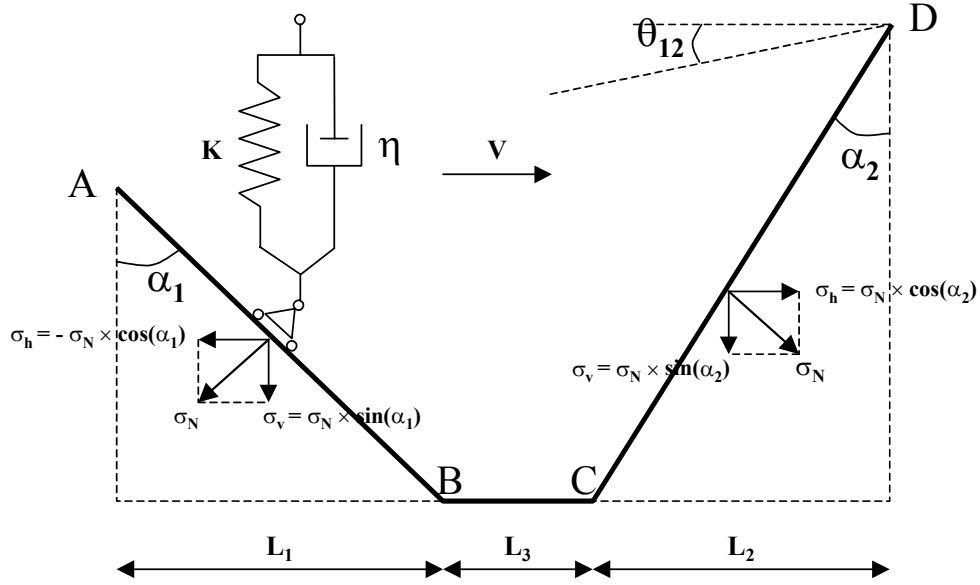


Figure 7 – Géométrie de base du modèle de Stéfani

#### 4.2.2 Cinématique du contact

S'agissant d'un solide de Kelvin, la relation entre l'effort  $\sigma_v$  et le déplacement  $\varepsilon$  s'écrit :

$$(3) \quad \sigma_v = E \times \varepsilon + \eta \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$$

Sur le segment AB, le déplacement s'écrit (Fig. 8) :

$$(4) \quad \varepsilon = h_0 + h(t) = h_0 + \frac{l_1 - V \times t}{\tan(\alpha_1)}$$

L'équation (4) exprime le fait que le déplacement à un instant  $t$ ,  $t = 0$  en A, est égal à la hauteur à laquelle se trouve le solide de Kelvin sur la pente AB, ajoutée d'un déplacement initial  $h_0$ . On retrouve effectivement  $h(t = 0) = h_A = \frac{l_1}{\tan(\alpha_1)}$  et  $h(t = \frac{l_1}{V}) = h_B = 0$ .

Remplaçant  $\varepsilon$  dans (3) par (4) et dérivant  $\varepsilon$  par rapport au temps, on trouve :

$$(5) \quad \sigma_v = \frac{E}{\tan(\alpha_1)} \times [h_0 \times \tan(\alpha_1) + l_1 - V \times (t + \tau)].$$

De même, sur le segment CD, l'effort s'écrit :

$$(6) \quad \sigma_v = \frac{E}{\tan(\alpha_2)} \times [h_0 \times \tan(\alpha_2) + V \times (t + \tau) - l_1 - l_3]$$

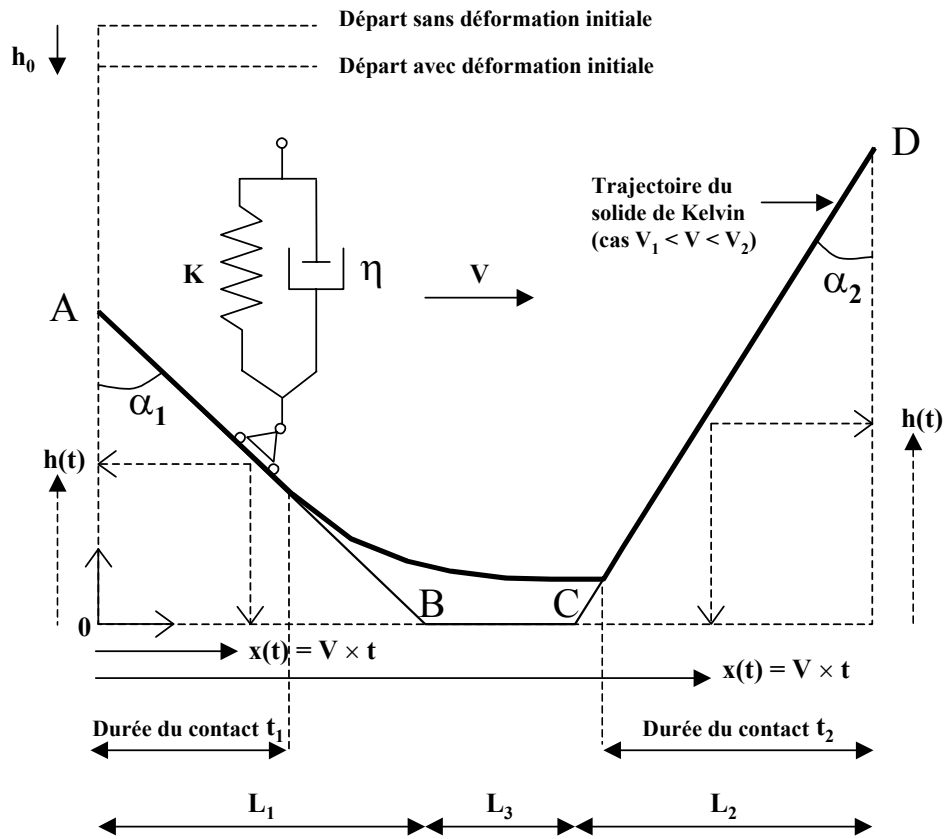


Figure 8 – Cinématique du contact solide de Kelvin – « motif »

L'examen du signe des efforts sur AB et CD montre qu'il y a des possibilités de décollement du solide de Kelvin ( $\sigma_v = 0$ ) sur la pente AB avec reprise de contact sur BC ou CD. Deux vitesses limites sont ainsi définies (résultats provisoirement non publiés – Do) :

$$(7) \quad V_1 = \frac{h_0 \times \tan(\alpha_1)}{\tau}$$

$$(8) \quad V_2 = \frac{h_0 \times \tan(\alpha_1) + l_1}{\tau}$$

Si la vitesse V est inférieure à  $V_1$ , le solide de Kelvin reste en contact avec le motif de A à D. Si la vitesse V est comprise entre  $V_1$  et  $V_2$ , une perte de contact se produit entre A et B strictement. Si la vitesse V est supérieure à  $V_2$ , le solide décolle dès le sommet A.

En fonction de ces conditions de contact, on peut déterminer les durées de contact  $t_1$  et  $t_2$  respectivement sur AB et CD à l'aide des relations suivantes (résultats provisoirement non publiés – Do) :

$$(9) \quad t_1 = \frac{h_0 \times \tan(\alpha_1) + l_1}{V} - \tau$$

$$(10) \quad \left[ \frac{V}{V_1} \times e^{\frac{V_1 - l_3 / \tau}{V}} \times \frac{1}{e} \right] \times e^{-\frac{l_2 / V - t_2}{\tau}} = 1 + \frac{V}{V_1} \times \frac{\tan(\alpha_1)}{\tan(\alpha_2)} \times \frac{l_2 / V - t_2}{\tau}$$

lorsque  $V_1 < V < V_2$ , et

$$(10\text{bis}) \quad \left[ \frac{V_2}{V_1} \times e^{\frac{V_1 - V_2 - l_3 / \tau}{V}} \right] \times e^{-\frac{l_2 / V - t_2}{\tau}} = 1 + \frac{V}{V_1} \times \frac{\tan(\alpha_1)}{\tan(\alpha_2)} \times \frac{l_2 / V - t_2}{\tau}$$

lorsque  $V > V_2$ .

#### 4.2.3 – Calcul des efforts et du coefficient de frottement

On désigne  $f_v$  et  $f_h$  respectivement l'effort vertical et l'effort horizontal résultant du passage du solide de Kelvin sur le motif. Le frottement résultant du déplacement du solide de Kelvin est donné par la relation suivante :

$$(11) \quad \mu = \frac{f_h}{f_v}$$

Le calcul de  $f_v$  s'effectue en intégrant sur les durées de contact  $t_1$  et  $t_2$  l'effort vertical  $\sigma_v$ . Le calcul de  $f_h$  s'effectue également par intégration sur  $t_1$  et  $t_2$  de l'effort horizontal  $\sigma_h$ . L'effort vertical n'est autre que celui donné respectivement par les expressions (5) et (6) sur AB et CD. Compte tenu des conditions de contact, roulement sans frottement, il existe une relation reliant les contraintes  $\sigma_v$  et  $\sigma_h$  (Fig. 7) :

$$(12) \quad \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{1}{\tan(\alpha_i)}$$

où l'indice  $i$  prend respectivement les valeurs 1 et 2 sur les segments AB et CD.

Les efforts horizontaux exercés par le solide de Kelvin respectivement sur les segments AB et CD sont de signes opposés. En effet, l'effort  $\sigma_h$  sur AB varie dans le sens opposé de celui du mouvement alors que sur CD, elle va dans le même sens (Fig. 7).

Le calcul des efforts vertical et horizontal est donné respectivement par les expressions suivantes :

$$(13) \quad f_v = \frac{1}{T} \times \left\{ \int_0^{t_1} \frac{E}{\tan(\alpha_1)} \times [h_0 \times \tan(\alpha_1) + l_1 - V \times (t + \tau)] dt + \int_0^{t_2} \frac{E}{\tan(\alpha_2)} \times [h_0 \times \tan(\alpha_2) + l_2 - V \times (t - \tau)] dt \right\}$$

$$(14)$$

$$f_h = \frac{1}{T} \times \left\{ \int_0^{t_1} \frac{E}{[\tan(\alpha_1)]^2} \times [h_0 \times \tan(\alpha_1) + l_1 - V \times (t + \tau)] dt + \int_0^{t_2} \frac{E}{[\tan(\alpha_2)]^2} \times [h_0 \times \tan(\alpha_2) + l_2 - V \times (t - \tau)] dt \right\}$$

avec  $T$  : durée globale du passage du solide de Kelvin sur le motif, soit  $T = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{V}$ .

#### 4.2.4 – Application du modèle à l'analyse des profils de chaussée

A partir d'un ensemble de profils mesurés sur une surface de chaussée, il s'agit de définir un motif moyen caractérisant la texture de cette surface. Le modèle Stéfani permet ensuite de calculer le frottement généré par le déplacement d'un pavé de gomme au contact avec la surface.

En prenant  $l_3 = 0$ , on retrouve la géométrie des indenteurs des profils de chaussée. En effet, un motif est en réalité constitué de deux moitiés d'indenteurs consécutifs. Une présentation par indenteurs est plus descriptive de la géométrie d'une surface et elle correspond plus à l'image courante des aspérités de chaussée. Les deux présentations « indenteurs » et « motifs » sont néanmoins homogènes car elles sont basées sur les mêmes critères de détermination de sommets et vallées et sur les mêmes calculs d'angles ( $\alpha$ ) et ( $\theta$ ). On obtient la relation suivante entre l'angle  $\theta_{12}$  et les angles  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  :

$$(15) \quad \tan(\theta_{12}) = \frac{l_2 \times \cot \alpha_2 - l_1 \times \cot \alpha_1}{l_1 + l_2}$$

Utilisant les données du paragraphe 4.1, le motif moyen est caractérisé par les paramètres suivants :

- la moyenne de la cotangente du  $\frac{1}{2}$  angle ( $\alpha$ ) des indenteurs, représentant la grandeur  $\cot \alpha_1$  ;
- la moyenne de l'angle ( $\theta$ ), représentant l'angle ( $\theta_{12}$ ) ;
- la largeur moyenne  $2L$  des indenteurs, représentant la somme ( $l_1 + l_2$ ) .

En prenant comme hypothèses simplificatrices :

- $l_3 = 0$  ;
- $l_1 = l_2 = L$  ;
- $h_0 = 0$  ;

on obtient les expressions suivantes pour  $f_v$  et  $f_h$ , après développement des intégrales :

$$(16) \quad f_v = \frac{V \times E}{2L} \times \left[ \frac{L \times t_1}{\tan(\alpha_1)} + \frac{L \times t_2}{\tan(\alpha_2)} - \frac{V}{2} \times \left( \frac{t_1^2}{\tan(\alpha_1)} + \frac{t_2^2}{\tan(\alpha_2)} \right) - V \times \tau \times \left( \frac{t_1}{\tan(\alpha_1)} - \frac{t_2}{\tan(\alpha_2)} \right) \right]$$

et

(17)

$$f_h = \frac{V \times E}{2L} \times \left[ \frac{L \times t_2}{[\tan(\alpha_2)]^2} - \frac{L \times t_1}{[\tan(\alpha_1)]^2} - \frac{V}{2} \times \left( \frac{t_2^2}{[\tan(\alpha_2)]^2} - \frac{t_1^2}{[\tan(\alpha_1)]^2} \right) + V \times \tau \times \left( \frac{t_2}{[\tan(\alpha_2)]^2} + \frac{t_1}{[\tan(\alpha_1)]^2} \right) \right]$$

#### 4.2.5 Paramètres d'entrée du modèle

Les paramètres d'entrée du modèle de Stéfani sont les suivants :

- la vitesse d'avancement  $V$  du patin ;
- le temps de relaxation de la gomme  $\tau$  ;
- la vitesse  $V_2$  donnée par l'expression (8) ;
- les durées de contact  $t_1$  et  $t_2$ , données par les expressions (9) et (10) ou (10bis) ;
- les valeurs moyennes, calculées à partir des profils de microtexture, de la cotangente du  $\frac{1}{2}$  angle ( $\alpha$ ) des indenteurs, de l'angle ( $\theta$ ), et de la largeur moyenne  $2L$  des indenteurs.

La vitesse  $V$  est fixée à 3 m/s. Comme  $V_1 = 0$ , il y a décollement du solide de Kelvin. Le temps de relaxation de la gomme est obtenu par ajustement : une valeur de  $\tau = 10^{-6}$ s est adoptée pour l'ensemble des calculs. La vitesse  $V_2$  est égale à :

$$V_2 = \frac{L}{\tau} = L \times 10^6$$

L'inégalité  $V < V_2$  serait vérifiée si  $L > 3 \times 10^{-3}$  mm. Comme les profils sont relevés avec un pas d'échantillonnage de 4  $\mu$ m, le plus petit indenteur qui puisse être détecté a une  $\frac{1}{2}$  largeur ( $L$ ) de 4  $\mu$ m. L'hypothèse  $V_1 < V < V_2$  est donc toujours vérifiée.

La durée  $t_2$  est obtenue en résolvant l'équation suivante :

$$(18) \quad T \times e^{(1+T)} = \frac{\tan(\alpha_2)}{\tan(\alpha_1)}$$

$$\text{avec } T = \frac{L/V - t_2}{\tau} ; \cot \alpha_1 = \cot \alpha ; \cot \alpha_2 = \cot \alpha_1 + 2 \times \tan(\theta).$$

La résolution de cette équation sur l'ensemble des plaquettes montre que la valeur de  $T$  varie très peu, avec une valeur moyenne de 0,13. Cette valeur est donc retenue pour l'ensemble des calculs.

#### 4.2.6 Validation du modèle de Stéfani

La comparaison entre le frottement calculé à l'aide du modèle de Stéfani et le frottement SRT est montrée à la figure 9 (points « noirs »). On peut noter une relation étroite entre le calcul et la mesure. Cependant, les prévisions sont inférieures aux mesures ; l'écart est plus important sur des surfaces à frottement élevé.

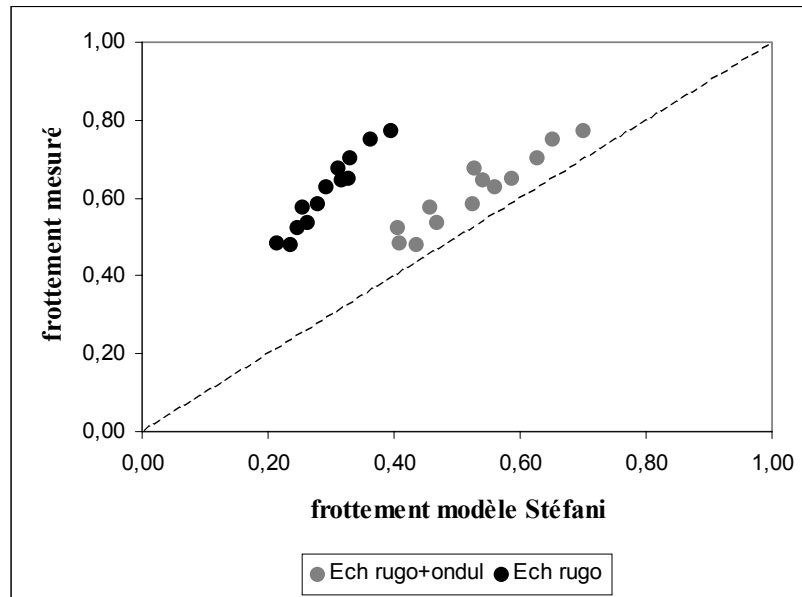


Figure 9 – Validation du modèle de Stéfani

Dans sa théorie sur le frottement d'hystérésis [5], Yandell suppose que le frottement mesuré est la somme de frottements élémentaires générés par le contact entre la gomme et diverses échelles de texture. La différence entre le frottement SRT et celui calculé par le modèle de Stéfani pourrait donc provenir de la négligence d'une ou de plusieurs échelles de texture dans les analyses.

L'analyse des indenteurs est basée sur la méthode de décomposition en motifs, qui sépare deux échelles sur un profil (Fig. 4) :

- échelle de « rugosité » qui est celle du profil mesuré ;
- échelle d'« ondulation » qui est celle du profil enveloppe constitué de segments reliant tous les pics du profil mesuré.

Un profil de microtexture comporte donc deux échelles et les premiers calculs avec le modèle de Stéfani tenaient compte uniquement de la contribution de l'échelle de rugosité. Le calcul du frottement doit alors être effectué sur deux motifs moyens : celui déterminé à partir de l'analyse du profil mesuré, appelé frottement de l'échelle de rugosité, et celui déterminé à partir de l'analyse du profil enveloppe, appelé frottement de l'échelle d'ondulation. Le frottement global est alors égal à la somme des deux frottements issus de ces calculs. A noter que la méthode de séparation d'échelles par la technique des motifs est simple ; elle est différente de celle utilisée par Yandell qui consiste en la séparation d'un profil de texture en 4 bandes à l'aide d'un filtre de Bessel du 5<sup>ème</sup> ordre [5].

Le frottement calculé à partir de ce principe d'addition est montré dans la figure 9 (points « gris »). On obtient toujours une relation étroite entre le calcul et la mesure, et de plus, l'ensemble des points est parallèle et proche de la bissectrice du graphique, vérifiant

d'une part l'hypothèse d'une contribution multi échelles de la texture au frottement, et d'autre part la pertinence des deux échelles de rugosité et d'ondulation.

## 5. CONCLUSIONS

Considérant que seul un nombre limité d'aspérités de surface de chaussée, appelées « indenteurs », peuvent toucher les pavés de gomme du pneumatique, une méthode de caractérisation de la microtexture des surfaces de chaussée est proposée. Cette méthode, basée sur le principe de décomposition en motifs, décrit la distribution spatiale des indenteurs par 3 paramètres : la forme des indenteurs, le relief créé par la disposition relative des indenteurs et la densité d'indenteurs. Des corrélations étroites ont été trouvées entre les descripteurs de microtexture et le frottement.

Un modèle rhéologique, décrivant le contact entre un solide de Kelvin et un « motif », est développé. L'hypothèse sur les conditions de contact, roulement sans frottement, permet de modéliser simplement le frottement généré par le glissement d'un patin de gomme sur une surface de chaussée mouillée. Le modèle suppose en réalité que le frottement provienne uniquement de la déformation viscoélastique du patin et que la présence de l'eau a pour seul effet de réduire l'adhésion moléculaire à un niveau négligeable. La comparaison entre le frottement calculé par le modèle et le frottement mesuré permet de mettre en évidence la contribution multi échelles de la texture au frottement : le frottement résulterait de l'interaction entre le pavé de gomme et les échelles de « rugosité » et « ondulation » de la texture.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Delalande, G. (1992) « Résistance des Granulats au Polissage – Méthode d'Essai par Projection », Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées (BL), n° 177, janv. – fév. 1992, pp. 73-80.
- [2] Giles, C. G., Sabey, B. E., Cardew, K. H. F. (1964) « Development and Performance of the Portable Skid-Resistance Tester », Road Research Technical Paper, n° 66, Road Research Laboratory, Department of Scientific and Industrial Research, 28 pages.
- [3] Taneerananon, P., Yandell, W. O. (1981) « Microtexture Roughness Effect on Predicted Road-Tyre Friction in Wet Conditions », Wear, n° 69, pp. 321-337.
- [4] Greenwood, J. A., Tabor, D. (1958) « The Friction of Hard Sliders on Lubricated Rubber : The Importance of Deformation Losses », Proceedings of the Physical Society, Vol. 71, 1958, pp. 989-1001.
- [5] Yandell, W. O., Sawyer, S. (1994) « Prediction of Tire-Road Friction from Texture Measurements », Transportation Research Record, No. 1435, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 86-91.

