

15ème Colloque National en Calcul des Structures

W. Edjeou¹, V. Cerezo¹, H. Zahouani², M-T. Do¹

¹ EASE, Université Gustave Eiffel, France, wiyao.edjeou@univ-eiffel.fr

² LTDS, Ecole Centrale de Lyon, France, hassan.zahouani@ec-lyon.fr

Résumé — L'adhérence pneu/chaussée permet d'assurer la sécurité des usagers de la route lors des phases d'accélération, de freinage et de changement de direction. Elle est étroitement liée à la texture de la couche de surface de la chaussée. Cette texture est multiéchelle et évolue au cours du temps sous l'effet du trafic routier et des conditions météorologiques. Cette évolution entraîne une diminution globale de l'adhérence. Dans un souci d'optimisation de l'adhérence en fonction des échelles de texture, nous avons développé une modélisation multiéchelle de l'adhérence.

Mots clefs — texture, adhérence, polissage, modélisation multiéchelle

1. Introduction

L'interaction pneu/chaussée est à l'origine de phénomènes comme l'adhérence, la résistance au roulement et le bruit de roulement. Ceux-ci résultent de la déformation de la gomme du pneu sur les différentes aspérités présentes à la surface de la chaussée.

L'adhérence pneu/chaussée permet d'assurer la sécurité des usages de la route lors des phases d'accélération, de freinage et de changement de direction. Elle est étroitement liée à la texture de la chaussée. Elle est généralement divisée en deux échelles, la macrotexture et la microtexture. La macrotexture est définie comme les irrégularités de la surface dont les dimensions varient entre 0,1-20 mm verticalement et entre 0,5-50 mm horizontalement (ISO 13473-1 2019) [1]. La microtexture est définie comme les irrégularités de la surface dont les dimensions varient entre 0,001-0,5 mm verticalement et inférieures à 0,5 mm horizontalement. Ces deux échelles permettent d'expliquer en première approche la génération des forces de frottement rassemblée sous le terme d'adhérence.

Au cours de la durée de vie d'une chaussée, la texture de la chaussée évolue sous l'effet du trafic et des conditions climatiques. Ces phénomènes d'usure sont connus sous le nom de polissage. Le polissage entraîne une diminution de l'adhérence [2, 3]. La division en macrotexture et microtexture ne permet pas d'expliquer complètement ces phénomènes d'usure de la chaussée et l'évolution de l'adhérence.

En effet, la surface de la chaussée est constituée de plusieurs échelles de texture superposées les unes sur les autres. Ces échelles ne contribuent de la même manière à la génération et au maintien d'une bonne adhérence [2]. Dans le domaine routier, il n'existe pas de méthode d'analyse multiéchelle permettant d'étudier finement le rôle et l'évolution de ces échelles de texture de la chaussée au fur et à mesure du polissage.

Ce papier présente les résultats d'une étude réalisée en laboratoire sur des surfaces de chaussées présentant des textures différentes et différents états de polissage. L'objectif est de mettre au point une méthode d'analyse multiéchelle de la texture permettant d'expliquer l'évolution de l'adhérence. La finalité est l'intégration de cette méthode dans un modèle d'optimisation multiéchelle de l'adhérence.

Dans un premier temps, une étude expérimentale faite sur des carottes de granulats a permis de simuler le polissage induit par le trafic routier grâce à la machine Wehner&Schulze [3]. L'état de la

surface de chaque état de polissage a été cartographié grâce à un microscope optique à variation focale, l'Alicona.

Une décomposition multiéchelle des surfaces ainsi cartographiées a été réalisée grâce aux ondelettes continues. Cette méthode permet d'avoir des décompositions de surface plus fines. Elle a été adaptée à la problématique routière [4]. De plus, cette méthode fonctionne comme un microscope mathématique permettant de faire des combinaisons des différentes échelles et ainsi de voir l'effet de chaque échelle [5]. Elle est appliquée sur les surfaces avant et après polissage, permettant ainsi de mieux comprendre les échelles qui sont concernées par ce phénomène.

Dans un deuxième temps, une modélisation du contact a été réalisée en utilisant un modèle de contact en 3D. Ce modèle permet de prendre en compte l'aspect multi-aspérités du contact par rapport au modèle 2D. Il est basé sur la théorie des massifs semi-infinis. Cette hypothèse est vraie étant donné la taille des aspérités de la route (de l'ordre du μm) et des patins du pneu (de l'ordre du mm). L'utilisation de ce modèle permet en outre de faire des calculs exacts et plus rapides comparés aux autres techniques comme les éléments finis compte-tenu de l'existence de nombreux points de contact [6–8]. Ce modèle prend en entrée la surface de l'échantillon ainsi que les propriétés viscoélastiques de la gomme du pneu. En sortie du modèle, nous disposons du champ de pression de contact, des déplacements au niveau de chaque aspérité et de l'aire de contact réelle. Une estimation multiéchelle de l'adhérence est faite à partir des résultats du modèle de contact et en définissant le poids des différentes échelles de texture.

2. Etude expérimentale

Les objectifs de cette étude expérimentale sont la reproduction du polissage que subissent les chaussées, la mesure de l'adhérence et la mesure de la texture. Pour le polissage et la mesure de l'adhérence, la machine Wehner&Schulze est utilisée. Pour la mesure de la texture, le capteur Infinite Focus de l'Alicona est utilisé.

2.1. Echantillons

Quatre formules de mosaïques de granulats sont testées. Les mosaïques sont fabriquées en laboratoire. Elles sont dénommées S1, S2, S3 et S4. Le Tableau 1 donne les caractéristiques de chaque formule.

Table 1 – Caractéristiques des échantillons

Mosaïques	Type de Granulats 6/10	PSV
S1	Granodiorite	58±4
S2	Calcaire dur	52±4
S3	Calcaire	36±3
S4	Calcaire	35±4

Le choix des granulats a été fait de manière à avoir une grande étendue de valeurs d'adhérence, de dureté (PSV) et de texture. Le PSV (Polished Stone Value) permet d'apprécier la résistance au polissage d'un granulat. Dans le domaine routier, les granulats utilisés ont des PSV supérieurs à 50. Les PSV compris entre 35 – 45 sont considérés bas. Ceux entre 45 – 50 moyens et ceux entre 50 – 60 bons.

Les granulats utilisés dans la fabrication de ces mosaïques sont de taille 6/10. Ces derniers sont passés au tamis **7,2 mm** de manière à éliminer les gravillons longs n'ayant pas l'aspect global rond.

Nous faisons l'hypothèse que les granulats sélectionnés pour chaque formule ont globalement la même macrotexture sur les mosaïques. Ainsi, seule la microtexture est variable. Une fois les gravillons choisis, ils sont placés manuellement dans un moule, de telle manière que ce soit leur face la plus plate qui soit en contact avec le moule. La disposition manuelle des gravillons permet en outre d'avoir le minimum de vides entre eux. Du sable est ensuite versé entre les gravillons pour éviter la pénétration du liant sur la surface d'étude. Pour finir, un mélange de résine et de sable est déversé pour remplir le moule. L'aspect visuel de ces échantillons sur la Figure 1 dépend de la composition minéralogique des granulats.

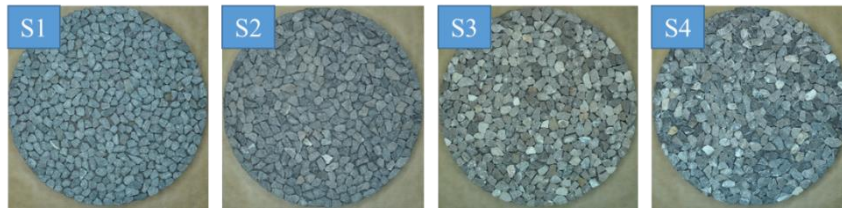


Figure 1 – Echantillons de mosaïques de granulats

2.2 Appareils et protocoles de mesure

La machine Wehner&Schulze sur la Figure 2, permet la mesure de l'adhérence à différents niveaux de polissage. Les mesures sont normalisées par la norme NF EN 12697-49 [9]. La machine est composée d'un poste de polissage simulant l'action du trafic et d'un poste de mesure d'adhérence simulant le freinage d'une roue en présence d'eau [3].

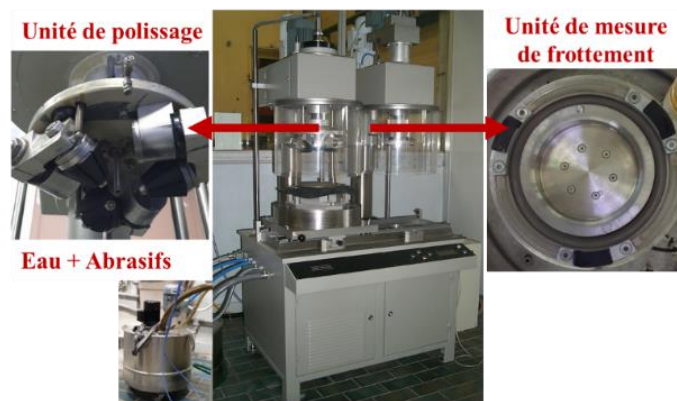


Figure 2 – Wehner&Schulze

Le polissage est effectué grâce au roulement avec un léger glissement de trois cônes en caoutchouc sur l'échantillon. Le poste de polissage est alimenté en continu par un mélange d'eau et de farine de silice qui constitue l'abrasif. Le polissage est effectué à 500 trs/min soit 17 km/h. La pression de contact entre les cônes de polissage et l'échantillon est de 0,4 N/mm².

Dans l'unité de mesure du frottement, la tête de mesure est abaissée sur la surface d'essai, sous apport d'eau. La tête de mesure est équipée de trois patins caoutchoutés et elle peut être déclenchée électroniquement. Le couple de freinage généré par le contact entre les patins et la surface est mesuré en continu et enregistré jusqu'à l'immobilisation de la tête de mesure. L'adhérence en laboratoire est calculée à partir du couple de frottement mesuré à 60 km/h. Le taux de glissement est de l'ordre de 0,5-1%.

L'Alicona sur la Figure 3 permet de faire une mesure optique tridimensionnelle de la rugosité de la surface. Le principe de mesure est basé sur la variation focale. Un échantillon est placé sur une

table de déplacement et illuminé par un éclairage modulé. Le capteur optique intègre en son intérieur un capteur numérique qui capte la lumière réfléchie par l'échantillon. Lors du mouvement de la table sur laquelle est posée l'échantillon, la position de chaque point de l'échantillon est déterminée par la variation du contraste.

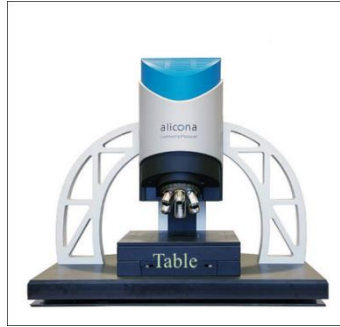


Figure 3 - Alicona

Trois zones de dimensions $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ sont choisies au-dessus des cailloux pour représenter la texture de chaque formule. Les cartographies sont faites avec un grossissement $\times 5$ correspondant à une résolution verticale de 410 nm . Les pas de cartographie en x et y sont de $1,8\text{ }\mu\text{m}$. Ces choix permettent de capturer les différentes singularités de la surface des différents échantillons.

Les mesures de frottements et de texture sont faites à l'état initial (0 passages) et à l'état poli (180 000 passages).

Un prétraitement des cartographies est fait en utilisant le logiciel MountainsMap pour la suppression des artefacts, de la forme des granulats et redresser le plan moyen de la texture de surface. Cela permet de ne garder que la composante de rugosité de la texture. La Figure 4 montre le résultat de mesure de texture de la formule S2 à l'état initial et à 180 000 passages. La réduction de la hauteur des aspérités due à leur usure avec le polissage y est remarquée.

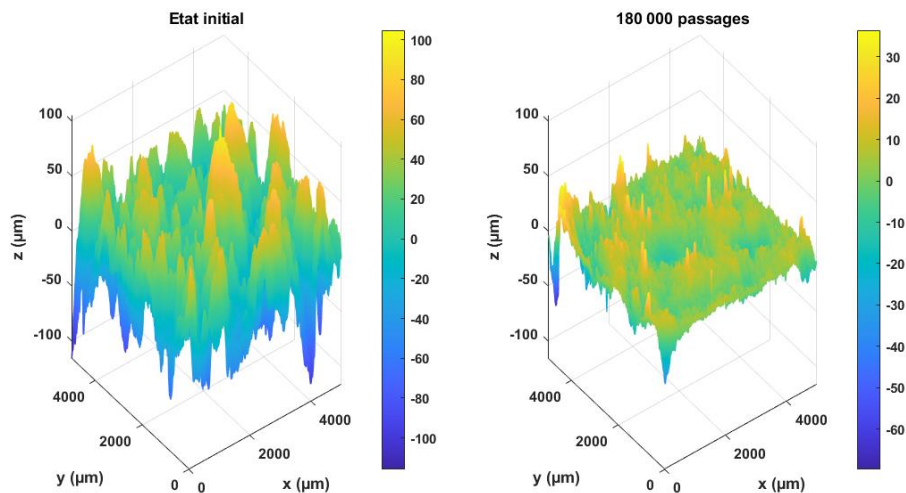


Figure 4 - Surface avant et après polissage, formule S2

3. Décomposition multiéchelle

La décomposition multiéchelle est faite en utilisant les ondelettes continues. Pour les surfaces, on parle d'une décomposition multiéchelle en 2D. Supposons une surface définie par la fonction $z(x,y)$ en des points de l'espace (x,y) . L'ondelette mère est définie par la fonction $\psi(x,y)$. Une famille

d'ondelettes (ondelettes filles) est définie à partir de l'ondelette mère par translation suivant le paramètre b et par contraction ou dilatation suivant le paramètre a par l'équation (1).

$$\psi(bx, by, ax, ay) = \frac{1}{\sqrt{ax \times ay}} \psi\left(\frac{x-bx}{ax}, \frac{y-by}{ay}\right) \quad (1)$$

ax , ay , bx et by représente respectivement les paramètres de contraction respectivement en x et y et les paramètres de translation respectivement en x et y . Généralement, les mêmes paramètres sont pris en x et en y , $ax=ay=a$. La fonction d'ondelette doit être carrée intégrable $\psi(b, a) \in L^2(\mathbb{R})$. Elle doit aussi avoir une énergie finie. Ce sont les conditions d'admissibilité. La transformée en ondelettes continues de la surface est définie par l'équation (2).

$$W_{bx, by, a}(x, y) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} z(x, y) \psi^*\left(\frac{x-bx}{a}, \frac{y-by}{a}\right) dx dy \quad (2)$$

ψ^* représente la fonction conjuguée de ψ . Si les conditions d'admissibilités sont respectées, la transformée inverse en ondelette est alors définie par l'équation (3).

$$z(x, y) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_{bx, by, a}(x, y) \psi\left(\frac{x-bx}{a}, \frac{y-by}{a}\right) \frac{da^2 dbx dby}{a^2} \quad (3)$$

C_g représente le coefficient de normalisation et est donné par l'équation (4).

$$C_g = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(u, v)|^2}{u \times v} du dv \quad (4)$$

$\Psi(u, v)$ est la transformée de Fourier de $\psi(x, y)$, u et v représentant les fréquences de Fourier.

L'ondelette d'analyse choisie est celle du chapeau mexicain. C'est une ondelette suffisamment compacte permettant de capturer les détails fins de la texture [10]. Son expression est donnée par l'équation (5).

$$\psi(x, y) = (2 - r) \exp\left(-\frac{r}{2}\right), r = x^2 + y^2 \quad (5)$$

4. Modèle de contact et estimation de l'adhérence

Le modèle des massifs semi-infinis est utilisé pour sa facilité de mise en œuvre et l'exactitude et la rapidité des calculs. Le calcul des déplacements issus de l'enfoncement des aspérités dans la gomme est fait selon l'équation (6) [11].

$$u(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(x - x', y - y') p(x', y') dx' dy' \quad (6)$$

$K(x, y)$ représente le déplacement normal induit au point (x, y) par une force unitaire concentrée à l'origine du plan suivant l'axe z . Il permet de prendre en compte les propriétés mécaniques viscoélastique de la gomme de la machine Wehner&Schulze.

La résolution du problème de contact est faite de manière itérative en utilisant la méthode du gradient conjugué [12].

Les Figure 5 et Figure 6 montrent le résultat de l'application du modèle au polissage, à l'état initial et à 180 000 passages de polissage.

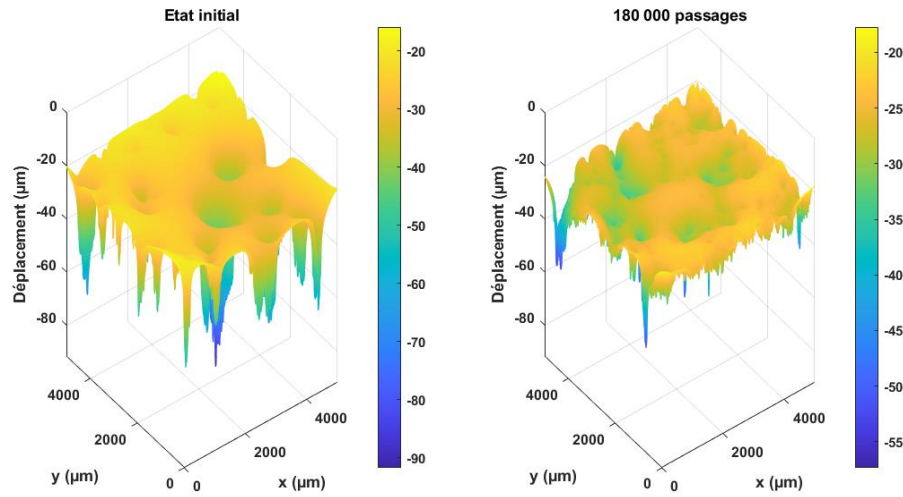


Figure 5 - Déplacements induits dans la gomme, formule S2

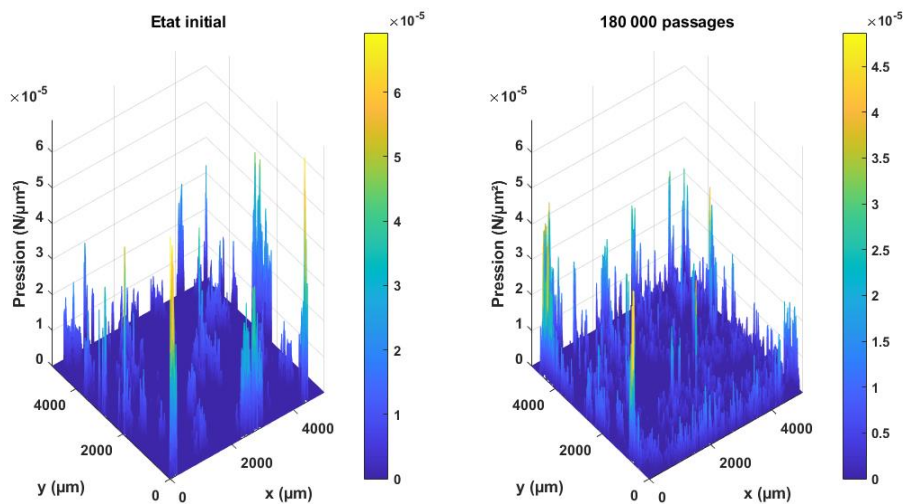


Figure 6 - Pressions de contact, formule S2

L'adhérence est calculée en estimant la perte d'énergie résultant du déplacement de la gomme sur les échantillons. L'application du modèle sur les résultats de la décomposition multiéchelle permet de définir les poids des échelles de texture dans la génération de l'adhérence. Ils correspondent au rapport entre l'adhérence gomme/surface de chaque échelle de texture par rapport à l'adhérence maximale de la décomposition multiéchelle.

La comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux sur la Figure 7, a permis de montrer la robustesse de la méthode.

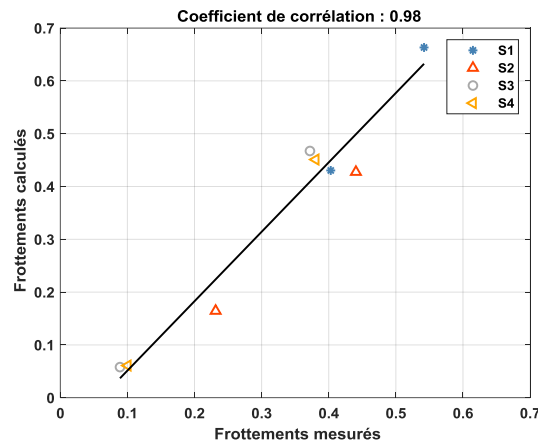


Figure 7 – Validation de l'estimation de l'adhérence

5. Conclusion

Dans cette étude, une méthode d'analyse multiéchelle a été développée afin d'expliquer l'évolution de l'adhérence en fonction du polissage. Elle permet de prendre en compte les phénomènes d'usure que subissent les granulats. Cette méthode est couplée à un modèle de contact basé sur la théorie des massifs semi-infinis. La définition du poids des différentes échelles de texture permet une bonne estimation multiéchelle de l'adhérence (coefficient de corrélation = 0,98). Cette méthode pourra être intégrée dans un système d'optimisation pour l'amélioration de l'adhérence pneu/chaussée.

Remerciements

Ce travail a été financé dans le cadre du projet du PIA4 I-Street financé par l'Ademe et piloté par Eiffage. Les auteurs remercient Flavien Geisler, coordinateur du projet et Simon Pouget coordinateur du module « enrobés du futur ». Les auteurs remercient Christophe Ropert et Pierre Augris pour la fabrication des échantillons et la réalisation des essais.

Références bibliographiques

- [1] ISO 13473-1: Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Part 1: determination of mean profile depth. ISO Standard, (2019)
- [2] Do, M.-T., Cerezo, V.: Road surface texture and skid resistance. Surface Topography: Metrology and Properties. 3, 043001 (2015)
- [3] Do, M.-T., Tang, Z., Kane, M., Larrard, F. de: Pavement polishing—Development of a dedicated laboratory test and its correlation with road results. Wear. 263, 36–42 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.086>
- [4] Edjeou, W., Cerezo, V., Zahouani, H., Salvatore, F.: Multiscale analyses of pavement texture during polishing. Surface Topography: Metrology and Properties. 8, 024008 (2020)
- [5] Lee, S.-H., Zahouani, H., Caterini, R., Mathia, T.G.: Morphological characterisation of engineered surfaces by wavelet transform. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 38, 581–589 (1998)
- [6] Polonsky, I.A., Keer, L.M.: A numerical method for solving rough contact problems based on the multi-level multi-summation and conjugate gradient techniques. Wear. 231, 206–219 (1999)
- [7] Bugnicourt, R.: Simulation of the contact between a rough surface and a viscoelastic material with friction, (2017)
- [8] Persson, B.N.J.: Theory of rubber friction and contact mechanics. Jcp. 115, 3840–3861 (2001)
- [9] Comité Européen de Normalisation: Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 49: Détermination du coefficient de frottement après polissage. (2013)

- [10] Mezghani, S.: Approches multi-échelles de caractérisation tridimensionnelle des surfaces – Applications aux procédés d’usinage –, (2005)
- [11] Boussinesq, J.: application des potentiels à l’étude de l’équilibre et du mouvement des solides élastiques. (1969)
- [12] Polonsky, I.A., Keer, L.M.: A numerical method for solving rough contact problems based on the multi-level multi-summation and conjugate gradient techniques. Wear. 231, 206–219 (1999)