

# Analyse multiéchelle de la texture des chaussées - effet sur l'adhérence des revêtements routiers

Wiyao Edjeou

### ▶ To cite this version:

Wiyao Edjeou. Analyse multiéchelle de la texture des chaussées - effet sur l'adhérence des revêtements routiers. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. École centrale de Nantes, 2021. Français. NNT : 2021ECDN0056 . tel-03651239

### HAL Id: tel-03651239 https://theses.hal.science/tel-03651239

Submitted on 25 Apr 2022

**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.



# Thèse de doctorat de

### L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

Ecole Doctorale n° 602 Sciences pour l'Ingénieur Spécialité : Mécanique des Solides, des Matériaux, des structures et des surfaces

### Par Wiyao EDJEOU

# Analyse multiéchelle de la texture des chaussées – effet sur l'adhérence des revêtements routiers

#### Thèse présentée et soutenue à Nantes le 15/12/2021 Unité de recherche : Département Aménagement, mobilités et environnement (AME), Université Gustave Eiffel, campus de Nantes

#### Rapporteurs avant soutenance :

Caroline RICHARD	Professeure des universités	Université de Tours
Mohamed EL MANSORI	Professeur des universités	Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Aix-en Provence
Composition du Jury :		
Président : Ahmed LOUKILI	Professeur des universités	Ecole Centrale de Nantes
Examinateurs : Jean – Michel BERGHEAU	Professeur des universités	Ecole Centrale de Lyon
Simon POUGET	Directeur Recherche & Innovation	Eiffage Route, Corbas
Dir. de thèse : Véronique CEREZO	IPEF HDR	Université Gustave Eiffel, Bouguenais
Co-dir. de thèse : Hassan ZAHOUANI	Professeur des universités	Ecole Centrale de Lyon
Invité		
Patrick CHABRAND	Professeur des universités	Institut des Sciences du Mouvement (ISM), Marseille

# Remerciements

Je tiens à remercier Véronique Cerezo, Hassan Zahouani et Minh-Tan Do qui ont su m'aider durant ce travail de thèse. Merci pour leur sympathie et la disponibilité témoignée. Ils ont été d'une aide précieuse, sachant répondre à mes interrogations et me donner des conseils sans oublier leur participation à ce mémoire.

Je remercie Caroline RICHARD et Mohamed EL MANSORI qui ont accepté de rapporter ce mémoire. Leurs apports ont permis d'améliorer ce mémoire. Je remercie également Jean – Michel BERGHEAU, Simon POUGET et Ahmed LOUKILI qui ont accepté de participer au jury de ma thèse. Je remercie Jean-Michel Bergheau et Patrick Chabrand, membres de mon comité de suivi qui ont su m'orienter durant ma thèse.

Je remercie le projet I-STREET qui a permis le financement de ma thèse. Mes remerciements vont aussi à Christophe Ropert et Pierre Augris pour la réalisation des essais expérimentaux. Ils m'ont été d'une grande aide dans l'exploitation de ces essais.

Je remercie tous les membres du laboratoire EASE pour leur accueil chaleureux. Je remercie Angélique, Samuel, Sébastien, Manuela et Cyrille pour leur sympathie. Mes remerciements vont aussi à ceux qui ont partagé mon bureau et m'ont aidé tant scientifiquement que moralement, Ebrahim, Anshul, Fabrice, Anes, Hugues, Hilda et Killian.

Une pensée particulière à ma famille qui m'a toujours soutenue et aidée durant mes années d'études.

**Titre** : Analyse multiéchelle de la texture des chaussées – effet sur l'adhérence des revêtements routiers

# Résumé

Ce travail de thèse a pour objectif de mettre au point une méthode de décomposition multiéchelle permettant d'expliquer l'effet des différentes échelles de texture sur l'évolution de l'adhérence avec le polissage et pouvant être intégrée dans un système d'optimisation multicritères des propriétés des chaussées. Une étude expérimentale est faite en laboratoire sur des échantillons d'enrobés bitumineux et de mosaïques de granulats pour simuler le polissage induit par le trafic routier et cartographier la texture correspondante aux différents états de polissage. Une décomposition multiéchelles à base d'ondelettes continues est ensuite faite sur les différentes cartographies. L'analyse multiéchelle permet d'observer les différents phénomènes impliqués dans le polissage des chaussées (décapage du bitume, mise à nu des granulats, usure générale, usure différentielle, ...). Enfin, un modèle de contact 3D basé sur la théorie de l'espace semi-infini est appliqué sur les différentes cartographies. Il permet de prendre en compte l'aspect multi-aspérités du contact et la viscoélasticité de la gomme du pneu. En sortie du modèle, nous avons les pressions de contact, les déplacements au niveau de chaque aspérité et l'aire de contact réelle. L'évolution de ces paramètres en fonction du polissage permet de décrire l'évolution de l'adhérence. Ce modèle permet de faire une bonne estimation de l'adhérence. Le couplage entre ce modèle de contact et la méthode de décomposition multiéchelle permet d'estimer l'adhérence globale à partir de l'adhérence multiéchelle. Les poids des différentes échelles sur l'adhérence sont considérés dans ces calculs.

**Mots-clés** : adhérence pneu/chaussée, polissage, texture de la chaussée, analyse multiéchelle, modèle du contact, ondelettes

Title : Multiscale analysis of pavement texture - effect on road pavement skid resistance

# Abstract

The objective of this thesis is to develop a multiscale decomposition method to explain the effect of different texture scales on the evolution of skid resistance with polishing and which can be integrated into a multicriteria optimization system of pavement properties. An experimental study is carried out in the laboratory on samples of asphalt mixes and aggregate mosaics to simulate the polishing induced by road traffic and to map the texture corresponding to the different polishing states. A multiscale decomposition based on continuous wavelets is then done on each map. This multiscale analysis allows us it to observe the various phenomena involve in the polishing of pavements (bitumen removal, general wear, differential wear). Finally, a 3D contact model based on the theory of semiinfinite space is applied on each maps. It takes into account the multi - asperity aspect of the contact and the viscoelasticity of the tire rubber. At the output of the model, we have the contact pressures, the displacements induced by each asperity in the rubber and the real contact area. Evolution of these contact parameters with polishing permits to describe the evolution of skid resistance. This model permits to make good numerical estimation of skid resistance. Coupling between this contact model and multiscale decomposition metho allows us to estimate the overall skid resistance from multiscale skid resistance. The weights of different scales on skid resistance are considered in these calculations.

Keywords : skid resistance, polishing, pavement texture, multiscale analysis, contact model, wavelets

# Table des matières

Int	rodu	ction		. 1
1.	Etu	ıde bil	oliographique	. 3
	1.1.	Adhé	rence	. 3
	1.1	.1.	Génération de l'adhérence	. 3
	1.1	.2.	Facteurs influents sur l'adhérence	. 5
	1.1	.3.	Mesure de l'adhérence	. 8
	1.1	.4.	Modélisation de l'adhérence	. 9
	1.2.	Textu	ıre	15
	1.2	.1.	Définition	16
	1.2	.2.	Caractérisation standard de la texture	16
	1.2	.3.	Caractérisation multiéchelle de la texture	20
	1.3.	Synth	nèse	29
2.	Mé	thodo	logie	31
2	2.1.	Obje	ctifs	31
2	2.2.	Déma	arche	31
3.	Etu	ıde ex	périmentale	33
	3.1.	Echa	ntillons	33
:	3.2.	Арра	reils et protocoles de mesure	35
	3.2	.1.	Polissage et mesure du frottement	36
	3.2	.2.	Mesure de la texture	38
	3.3.	Analy	/se des essais Wehner et Schulze	43
	3.3	.1.	Evolution de l'adhérence en fonction du polissage des mosaïques de granulats	43
	3.3	.2.	Evolution de l'adhérence en fonction du polissage des enrobés bitumineux	44
	3.3	.3.	Conclusion	47
;	3.4.	Adhé	rence – texture	48
	3.4	.1.	Analyse de la texture des mosaïques de granulats	51
	3.4	.2.	Analyse de la texture des enrobés bitumineux	55
	3.4	.3.	Conclusion	65
4.	An	alyse	multiéchelle	67
4	4.1.	Echa	ntillons de mosaïques de granulats	70
	4.1	.1.	Evolution multiéchelle des paramètres de texture pour les mosaïques de granulats	70
	4.1 mo	.2. saïque	Corrélation multiéchelle entre les paramètres de texture et le frottement pour l es de granulats	es 79
4	4.2.	Echa	ntillons d'enrobés bitumineux	81
	4.2	.1.	Evolution multiéchelle des paramètres de texture des enrobés bitumineux	81
	4.2 enr	.2. obés t	Corrélation multiéchelle entre les paramètres de texture et le frottement pour l pitumineux	es 01
4	4.3.	Conc	lusion1	03

5. Modélis 5.1. Mo	sation physique de l'adhérence1 dèle de contact élastique	<b>05</b> 05
5.2. Pri:	se en compte de la viscoélasticité1	10
5.3. Ca	ractérisation viscoélastique de la gomme de la machine Wehner&Schulze1	14
5.3.1.	Détermination de la fonction de relaxation1	16
5.3.2.	Détermination de la fonction de fluage1	17
5.4. Infl	uence des échelles de texture sur le contact élastique1	18
5.4.1.	Application du modèle de contact sur des surfaces contrôlées1	19
5.4.2.	Application du modèle de contact sur des surfaces de mosaïques de granulats 1	27
5.4.3.	Application du modèle de contact sur des surfaces d'enrobés bitumineux1	33
5.5. Mo	délisation viscoélastique de l'adhérence appliquée aux surfaces brutes de texture 1	45
5.5.1.	Application du modèle de contact sur les mosaïques de granulats	46
5.5.2.	Application du modèle de contact sur les enrobés bitumineux	47
5.6. Mo	délisation viscoélastique multiéchelle de l'adhérence	50
5.6.1.	Application du modèle d'adhérence multiéchelle sur les mosaïques de granulats 1	50
5.6.2.	Application du modèle d'adhérence multiéchelle aux enrobés bitumineux1	54
5.7. Co	nclusion1	57
6. Conclu	sion générale1	59
Annexes		63
A. Varia	tion des mesures d'adhérence1	63
B. Carto B.1. Pré	graphies des échantillons	<b>63</b> 63
B.2. Evo	plution 3D de la texture avec le polissage1	66
B.2.1.	Echantillons de mosaïques de granulats : taille $50\ mm  imes 20\ mm$	66
B.2.2.	Echantillons de mosaïques de granulats : taille $5\ mm  imes 5\ mm$ au-dessus des caillo 168	ux
B.2.3.	Echantillons en enrobés bitumineux1	69
C. Para C.1. Mo	<b>nètres standards de texture1</b> saïques de granulats	<b>73</b> 73
C.2. En	obés bitumineux1	76
D. Analy D.1. Eve mosaïque	<b>/se multiéchelle1</b> blution de la texture avec le polissage pour quelques échelles de la microtexture pour un de granulat	<b>80</b> ne 80
D.2. Eve enrobés b	olution de la texture avec le polissage pour quelques échelles de la microtexture pour d itumineux1	es 83
Bibliograph	1 1	89

# Liste des figures

Figure 1.1 : Forece de contact mis en jou lors d'une collicitation transversele	1
Figure 1.1. Forces de contact mis en jeu lois d'une somchation transversale	4
	4
Figure 1.3 : Mecanismes physique a l'origine de l'adherence [30]	5
Figure 1.4 : Influence de la texture sur le frottement [31]	6
Figure 1.5 : Zones de contact pneu/chaussée en présence d'eau [40]	7
Figure 1.6 : Adhérence en fonction de la hauteur d'eau (E1 – E3 : surface lisse – rugueuse) [43]	7
Figure 1.7 : Pendule SRT [46]	8
Figure 1.8 : DFT [47]	8
Figure 1.9 · Machine Wehner et Schulze	9
Figure 1 10 : Géométrie d'un indenteur [55]	10
Figure 1.11 : Modèle des indenteurs [55]	11
Figure 1.12 : Modèle des indenieurs [00]	
Figure 1.12 : Modèle de Reivill-Voigt	
	. 12
Figure 1.14 : Echelles de texture definies par la methode des motifs[55]	. 14
Figure 1.15 : Validation du modele multiechelle de Stefani[55]	. 14
Figure 1.16 : Critère de sélection des sommets	. 15
Figure 1.17 : Validation du modèle multiéchelle des indenteurs	. 15
Figure 1.18 : Alicona	. 17
Figure 1.19 : Détermination du Vmp [70]	. 19
Figure 1.20 : Détermination du Rpk [70]	. 19
Figure 1.21 : Motif [72]	. 20
Figure 1.22 : Définition de l'échelle	. 20
Figure 1 23 · Comparaison entre le payage espace-fréquence entre la TEEG et la TOC	22
Figure 1.24 : Exemple d'ondelette de Morlet	22
Figure 1.25 : Exemple de décomposition multiéchelle d'un signal de texture avec l'ondelette de Mo	rlat
	24
Figure 1.26 : December 1.06 : December 1.00 and the state of the state	. 24
Figure 1.20. Reconstruction du promi d'origine	. 20
Figure 1.27 : Transformee en ondelettes continues 2D	. 20
Figure 1.28 : Transformee inverse en ondelettes continues 2D	. 27
Figure 1.29 : Ondelette du chapeau mexicain	. 28
Figure 1.30 : Reconstruction de la surface initiale	. 28
Figure 1.31 : Exemple de décomposition multiéchelle de surface	. 29
Figure 3.1 : Sélection des gravillons	. 33
Figure 3.2 : Echantillons de mosaïques de granulats	. 34
Figure 3.3 : Echantillons d'enrobés bitumineux	. 35
Figure 3.4 : Essai de polissage et de mesure de frottement	. 36
Figure 3.5 : Fixation de l'échantillon	. 36
Figure 3.6 · Polissage d'enrobés	36
Figure 3.7 <sup>.</sup> Polissage de mosaïques	37
Figure 3.8 : Variation des mesures d'adhérence	37
Figure 3.0 : Magure de la texture	20
Figure 3.9. Mesule de la texture en fenetien du grossiesement zone 1	. 30
Figure 3.10. Variation de la texture en fonction du grossissement, zone 1	. 39
Figure 3.11 : Evolution des parametres de texture pour differents grossissements	. 39
Figure 3.12 : Zones de cartographie sur les échantillons de mosaïques de granulats	. 40
Figure 3.13 : Zones de cartographie sur les échantillons en enrobés bitumineux	. 40
Figure 3.14 : Exemple d'évolution de la texture avec le polissage des mosaïques de granulats	. 41
Figure 3.15 : Evolution de l'aspect de la formule F4 avec le polissage	. 42
Figure 3.16 : Evolution de l'aspect de la formule F5 avec le polissage	. 42
Figure 3.17 : Exemple d'évolution de la texture avec le polissage des enrobées bitumineux	. 43
Figure 3.18 : Evolution de l'adhérence pour les mosaïques de granulats	. 44
Figure 3.19 : Evolution de l'adhérence pour les enrobés bitumineux	. 46
Figure 3.20 : Evolution de l'adhérence en fonction du type de bitume	. 47

Figure 3.21 : Evolution de l'adhérence avec le polissage Figure 3.22 : Exemple de variation de la texture en fonction de la zone de cartographie d'un enr	48 <sup>.</sup> obé
bitumineux	49
Figure 3.23 : Exemple de variation de la texture en fonction de la zone de cartographie d'une mosaï	ique
de granulats	49
Figure 3.24 : Sélection des profils	50
Figure 3.25 : Profils sélectionnés pour la formule F7	50
Figure 3.26 : Evolution des paramètres 3D pour les mosaïques de granulats	51
Figure 3.27 : Usure générale et usure différentielle[96]	52
Figure 3.28 : Aspect des mosaïques avec le polissage	52
Figure 3.29 : Micro-rayures sur les mosaïques de granulats à l'état poli	53
Figure 3.30 : Corrélations entre les paramètres de texture et le frottement pour les mosaïques	54
Figure 3.31 : Corrélations entre les paramètres de texture et le frottement pour les mosaïques	55
Figure 3.32 : Evolution des paramètres 3D pour les enrobés	57
Figure 3.33 : Correlation entre les paramètres de texture 3D et le frottement	60
Figure 3.34 : Regroupement des donnees	62
Figure 3.35 : Correlation entre les parametres de texture 3D et le frottement lors dans la phase	e de
	63
Figure 3.36 : Correlation entre les parametres de texture 3D et le frottement dans la phase d'usure	. 64
Figure 4.1 : Discrétisation des échelles d'analyse pour les enrobés bitumineux	67
Figure 4.2 : Formule S1, zone 1, etat initial	68
Figure 4.3 : Formule S1, zone 1, etat initial, echelles 4 $\mu m$ – 500 $\mu m$	68
Figure 4.4 : Formule S1, zone 1, etat initial, echelles 783 $\mu m - 4240 \mu m$	69
Figure 4.5 : Formule S1, zone 1, etat initial, echelles $783 \mu m - 4 240 \mu m$ (zoom)	69
Figure 4.6 : Evolution multiechelle du Sq pour les mosaiques de granulats	70
Figure 4.7 Evolution multiechelle du Vmp pour les mosaiques de granulats	70
Figure 4.8 : Variation du Sq et du Vmp entre l'état initial et 180 000 passages	/1
Figure 4.9 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaiques de granulats	72
Figure 4.10. Evolution multiechelle du Sus pour les mosaiques de granulais, zoom entre 0 $\mu m$ – 200	$\mu m$
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulais, zoom entre $0 \ \mu m - 200$	) μm 72 m –
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre $0 \ \mu m = 200 \ \mu$ Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre $200 \ \mu$	) μm 72 m – 73
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m$ – 200 Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ 5 000 $\mu m$	) μm 72 m – 73 74
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m$ – 200 Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ 5 000 $\mu m$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats	) μm 72 m – 73 74 74
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m$ – 200 $\mu$ 5 000 $\mu m$	) μm 72 m – 73 74 74 74
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m$ – 200 $\mu$ 5 000 $\mu m$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats	) μm 72 m – 73 74 74 75 75
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m = 200 \mu$ 5 000 $\mu m$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats	μm 72 m – 73 74 74 75 75 75
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m$ – 200 Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.17 : Variation du Sdg entre l'état initial et 180 000 passages	μm 72 m – 73 74 74 75 75 76 76
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m$ – 200 $\mu m$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.17 : Variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats	μm 72 m – 73 74 74 75 75 76 76 77
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu$ m – 200 $\mu$ m Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats	m = 100000000000000000000000000000000000
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m$ – 200 $\mu$ Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.17 : Variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats	$\mu m$ m - 72 m - 73 74 74 75 77 7
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m$ – 200 $\mu$ Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.17 : Variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.21 : Variation du Ssc entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.21 : Variation du Ssc entre l'état initial et 180 000 passages	μm 72 m – 73 74 74 75 75 76 76 77 77 78
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m$ – 200 $\mu$ Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.17 : Variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.21 : Variation du Ssc entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.22 : Pourcentage de diminution du frottement entre l'état initial et 180 000 passages	$\mu m$ 
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu$ m – 200 $\mu$ m Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.17 : Variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.21 : Variation du Ssc entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.22 : Pourcentage de diminution du frottement entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.23 : Corrélation multiéchelle entre les paramètres de texture et le frottement	) µm 72 m — 73 74 74 75 75 76 77 78 78 78 78 79 80
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m$ – 200 $\mu m$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.17 : Variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Scq pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Scc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Scc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Scc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Scc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Scc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Scc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.21 : Variation du Scc entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.22 : Pourcentage de diminution du frottement entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.23 : Corrélation multiéchelle entre les paramètres de texture et le frottement Figure 4.24 : Evolution multiéchelle du Sc pour enrobés bitumineux	) µm 72 m – 73 74 74 74 75 75 76 76 77 78 78 78 78 78 78 80 81
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m$ – 200 $\mu$ Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.17 : Variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.21 : Variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.22 : Pourcentage de diminution du frottement entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.23 : Corrélation multiéchelle entre les paramètres de texture et le frottement Figure 4.24 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.25 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux	) µm 72 m – 73 74 74 74 75 75 76 77 78 78 78 78 78 78 80 81 81
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m$ – 200 $\mu m$ . Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.17 : Variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats , zoom Figure 4.21 : Variation du Ssc entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.22 : Pourcentage de diminution du frottement entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.23 : Corrélation multiéchelle entre les paramètres de texture et le frottement Figure 4.24 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux	) µm 72 m – 73 74 74 75 75 76 76 77 78 78 78 78 78 80 81 81 81
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu m$ – 200 $\mu$ Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.17 : Variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.21 : Variation du Sc entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.22 : Pourcentage de diminution du frottement entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.23 : Corrélation multiéchelle entre les paramètres de texture et le frottement Figure 4.24 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux, zoom entre 0 $\mu m$ – 500 $\mu m$ Figure 4.25 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux, zoom entre 0 $\mu m$ – 3000 $\mu r$ Figure 4.26 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux, zoom entre 500 $\mu m$ – 3 000 $\mu r$ Figure 4.27 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux	) µm 72 m — 73 74 74 75 75 75 76 77 78 78 78 78 78 79 80 81 n 82 82
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu$ m – 200 $\mu$ m Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sd pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sd pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sd pour les mosaïques de granulats Figure 4.17 : Variation du Sd entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats Figure 4.21 : Variation du Ssc entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.22 : Pourcentage de diminution du frottement entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.23 : Corrélation multiéchelle entre les paramètres de texture et le frottement Figure 4.24 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.25 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.26 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.27 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux Figure 4.28 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux Figure 4.28 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux Figure 4.28 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux	) µm 72 m 73 74 74 74 74 75 75 75 76 76 76 77 78 78 79 81 n. 82 81 n. 82 83
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu$ m – 200 $\mu$ m Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sd pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sd pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sd pour les mosaïques de granulats Figure 4.17 : Variation du Sd entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats, zoom Figure 4.21 : Variation du Ssc entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.22 : Pourcentage de diminution du frottement entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.23 : Corrélation multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.24 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.25 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.26 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.27 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux, zoom entre 0 $\mu$ m – 500 $\mu$ m Figure 4.28 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux Figure 4.28 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux Figure 4.29 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux Figure 4.29 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux Figure 4.29 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux	) µm 72 m – 73 74 74 74 75 75 76 77 78 78 78 78 78 78 78 78 78 81 n 82 83 83 83
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre $200 \ \mu m$ Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre $200 \ \mu m$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats Figure 4.17 : Variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats Figure 4.21 : Variation du Ssc entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.22 : Pourcentage de diminution du frottement entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.23 : Corrélation multiéchelle entre les paramètres de texture et le frottement Figure 4.24 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.25 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.26 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.27 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.28 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.28 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux Figure 4.28 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux Figure 4.29 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux Figure 4.29 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux Figure 4.29 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux Figure 4.29 : Evolution	) µm 72 m – 73 74 74 75 75 75 75 76 77 78 78 78 78 78 78 78 78 78 81 n.82 83 83 83
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre $200 \ \mu$ m Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre $200 \ \mu$ m Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages. Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats . Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats, zoom. Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats . Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats , zoom. Figure 4.17 : Variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passages . Figure 4.18 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats , zoom . Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats , zoom . Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats , zoom . Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Sc pour les mosaïques de granulats , zoom . Figure 4.21 : Variation du Sc entre l'état initial et 180 000 passages . Figure 4.22 : Pourcentage de diminution du frottement entre l'état initial et 180 000 passages . Figure 4.23 : Corrélation multiéchelle entre les paramètres de texture et le frottement . Figure 4.24 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux, zoom entre 0 $\mu$ m – 500 $\mu$ m Figure 4.25 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux , zoom entre 0 $\mu$ m – 500 $\mu$ m Figure 4.26 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux , zoom entre 0 $\mu$ m – 500 $\mu$ m Figure 4.28 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux , zoom entre 500 $\mu$ m – 3000 $\mu$ m Figure 4.29 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux , zoom entre 500 $\mu$ m – 3000 $\mu$ m Figure 4.29 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux , zoom entre 500 $\mu$ m – 3000 $\mu$ m Figure 4.29 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux , zoom entre 500 $\mu$ m – 3000 $\mu$ m	) µm 72 m – 73 74 74 75 75 76 76 77 78 78 78 78 78 78 78 78 81 n 82 83 83 84
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu$ m – 200 $\mu$ m Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages	) μm 72 m – 73 74 74 75 75 76 76 77 78 78 78 77 78 78 79 81 n. 82 81 n. 82 83 83 84 84
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu$ m – 200 $\mu$ m Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats	) μm 72 m – 73 74 74 75 75 76 77 78 78 78 78 78 78 78 78 78 78 78 78 78 78 81 81 83 83 84 85
Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 0 $\mu$ m = 200 $\mu$ m Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre 200 $\mu$ Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages de granulats	) µm 72 m – 73 74 74 75 75 76 77 78 80 81 83 84 85 86

Figure 4.38 : Evolution multiéchelle du Sds pour enrobés bitumineux, zoom entre  $0 \mu m - 50 \mu m \dots 90$ Figure 4.39 : Evolution multiéchelle du Sds pour enrobés bitumineux, zoom entre  $50 \ \mu m - 200 \ \mu m$ ...91 Figure 4.40 : Evolution multiéchelle du Sds pour enrobés bitumineux, zoom entre  $200 \,\mu m - 500 \,\mu m$  91 Figure 4.41 : Evolution multiéchelle du Sds pour enrobés bitumineux. zoom entre  $500 \mu m - 3000 \mu m$ Figure 4.43 : Evolution multiéchelle du Sfd pour enrobés bitumineux, zoom entre  $0 \mu m - 50 \mu m \dots 93$ Figure 4.44 : Evolution multiéchelle du Sds pour enrobés bitumineux, zoom entre  $50 \ \mu m - 500 \ \mu m$ ...93 Figure 4.45 : Evolution multiéchelle du Sds pour enrobés bitumineux, zoom entre  $500 \mu m - 3000 \mu m$ 94 Figure 4.47 : Evolution multiéchelle du Sdg pour enrobés bitumineux, zoom entre  $0 \, \mu m - 500 \, \mu m \dots 95$ Figure 4.48 : Evolution multiéchelle du Sdq pour enrobés bitumineux, zoom entre  $500 \mu m - 3000 \mu m$ Figure 4.52 : Evolution multiéchelle du Ssc pour enrobés bitumineux, zoom entre  $0 \, \mu m - 50 \, \mu m \dots 98$ Figure 4.53 : Evolution multiéchelle du Ssc pour enrobés bitumineux, zoom entre  $50 \, \mu m - 500 \, \mu m$ ...98 Figure 4.54 : Evolution multiéchelle du Ssc pour enrobés bitumineux, zoom entre  $500 \, \mu m - 3000 \, \mu m$ Figure 4.56 : Variation du Ssc entre le frottement maximal et 180 000 passages...... 100 Figure 4.57 : Pourcentage d'augmentation du frottement par rapport à l'état initial ...... 101 Figure 4.58 : Corrélation multiéchelle dans la phase de décapage pour les enrobés bitumineux..... 102 Figure 4.59 : Corrélation multiéchelle dans la phase d'usure pour les enrobés bitumineux...... 103 Figure 5.1 : Géométrie du contact[102]...... 105 Figure 5.2 : Périodicité et recouvrement [105] ...... 107 Figure 5.3 : Zero-padding pour éviter le recouvrement [105]...... 107 Figure 5.9 : Modèle de Maxwell généralisé ...... 114 Figure 5.10 : Echantillons de gomme [113]......114 Figure 5.12 : Validation des paramètres de la série de Prony ...... 117 Figure 5.14 : Déplacements et pressions issus du contact entre une demi-sphère rigide et un plan Figure 5.16 : Déplacements et pressions issus du contact entre une surface de demi-sphères rigide et Figure 5.17 : Surface constituée de macrotexture et de microtexture à base de demi-sphères ...... 120 Figure 5.18 : Déplacements et pressions issus du contact entre une surface de demi-sphères rigide Figure 5.19 : Effet de l'ajout de la microtexture composée de demi-sphères sur les paramètres de Figure 5.20 : Distribution des hauteurs des points de la surface en fonction des demi-sphères ajoutées  Figure 5.22 : Déplacements et pressions issus du contact entre une surface fractale rigide et un plan Figure 5.25 : Ajout de la microtexture fractale (Sfd=2.3) sur la macrotexture composé de demi-sphères Figure 5.26 : Déplacements et pressions issus du contact entre une surface composé de macrotexture Figure 5.27 : Effet de l'ajout de la microtexture fractale sur de la macrotexture sur les paramètres de Figure 5.29 : Déplacements résultants du contact entre la gomme et la surface S2, zone 1...... 127 Figure 5.30 : Pressions résultantes du contact entre la gomme et la surface S2, zone 1 ...... 128 Figure 5.31 : Déplacements issus du contact entre les mosaïques de granulats et la gomme, a) pour Figure 5.32 : Pressions issues du contact entre les mosaïques de granulats et la gomme, a) pour toutes Figure 5.33 : Aires de contact entre les mosaïques de granulats et la gomme, a) pour toutes les trois Figure 5.34 : Evolution multiéchelle de l'enfoncement maximal issu du contact gomme/mosaïque .. 130 Figure 5.35: Variation multiéchelle de l'enfoncement maximal en fonction du polissage pour les Figure 5.36 : Evolution multiéchelle de la pression maximale issue du contact gomme/mosaïque ... 131 Figure 5.37 : Variation multiéchelle de la pression maximale en fonction du polissage pour les Figure 5.39 : Variation multiéchelle de l'aire de contact en fonction du polissage pour les mosaïgues de Figure 5.43 : Enfoncements maximaux issus du contact entre la gomme et les surfaces d'enrobés Figure 5.44 : Evolution de l'enfoncement maximal des aspérités dans la gomme avec le polissage pour Figure 5.45 : Pressions maximales issues du contact entre la gomme et les surfaces d'enrobés Figure 5.46 : Evolution des pressions maximales de contact entre les surfaces d'enrobés bitumineux et Figure 5.48 : Evolution des aires de contact entre les surfaces d'enrobés bitumineux et la gomme avec Figure 5.49 : Evolution multiéchelle de l'enfoncement maximal issu du contact gomme/enrobé .... 140 Figure 5.50 : Variation multiéchelle de l'enfoncement maximal pour les enrobés bitumineux ......... 140 Figure 5.51 : Evolution multiéchelle de la pression maximale issue du contact gomme/enrobé ...... 141 Figure 5.52 : Evolution multiéchelle de la pression maximale issue du contact gomme/enrobé, zoom Figure 5.53 : Variation multiéchelle de la pression maximale en fonction du polissage pour les enrobés Figure 5.55 : Variation multiéchelle de l'aire de contact en fonction du polissage pour les enrobés Figure 5.57 : Corrélation entre les valeurs mesurées et celles calculées de l'adhérence des mosaïques Figure 5.58 : Evolution des frottements calculés sur les zones des enrobés bitumineux...... 148

Figure 5.59 : Estimation du frottement des enrobés bitumineux	149
Figure 5.60 : Evolution multiéchelle de l'adhérence des mosaïgues de granulats	150
Figure 5.61 : Variation multiéchelle du frottement entre l'état initial et 180 000 passages des mosaïo	lues
de granulats	151
Figure 5.62 : Somme des frottements multiéchelles des mosaïques de granulats.	151
Figure 5.63 · Corrélation entre le frottement mesuré et la somme des frottements multiéchelles	des
mosaïques de granulats	152
Figure 5.64 : Frottements multiéchelles nondérés des mosaïques de granulats	153
Figure 5.65 : Corrélation entre les valoure d'adbérence mesurées et colles estimées par la pendéra	tion
de l'adhérence multiéchelle des massiques de granulete	150
Lieuro E 66 : Evolution multiónhollo do l'adhérance dos enrobés hituminous	100
Figure 5.66. Evolution multichelle de l'adhérence des enrobés bitumineux	154
Figure 5.67. Evolution multiechene de l'adherence des enrobes bitunnineux, zoom entre $0\mu$	m —
$1000 \ \mu m$	154
Figure 5.68 : Variation du frottement multiechelle des enrobes bitumineux avec le polissage	155
Figure 5.69 : Variation du frottement multiéchelle des enrobés bitumineux avec le polissage, zoom e	ntre
$0 \ \mu m - 1 \ 000 \ \mu m$	155
Figure 5.70 : Somme des frottements multiéchelles des enrobés bitumineux	156
Figure 5.71 : Frottements multiéchelles pondérés des enrobés bitumineux	156
Figure A.1 : Variabilité de la mesure de l'adhérence	163
Figure B.1 : Cartographie brute	163
Figure B.2 : Rebouchage des points non mesurés	164
Figure B.3 : Artefacts et bruits de mesure	164
Figure B.4 : Suppression des artefacts et bruit de mesure	164
Figure B.5 : Forme de la cartographie	165
Figure B.6 : Suppression de la forme	165
Figure B.7 : Suppression de la pente	165
Figure B.8 · Extraction de la surface de taille souhaitée	166
Figure B.9 : S1 évolution de la texture avec le polissage	166
Figure B 10 : S2 évolution de la texture avec le polissage	166
Figure B.11 : S2, evolution de la texture avec le polissage	167
Figure B.12: S1, évolution de la texture avec le polissage	167
Figure D. 12 : 54, evolution de la texture avec le polissage	107
Figure D. 15 . 55, evolution de la texture avec le polissage	107
Figure D. 14. S1, evolution de la texture avec le polissage	100
Figure D.15 . S2, evolution de la texture avec le polissage	100
Figure B.16 : S3, evolution de la texture avec le polissage	168
Figure B.17 : S4, evolution de la texture avec le poilssage	168
Figure B.18 : S5, evolution de la texture avec le polissage	169
Figure B.19 : F1, évolution de la texture avec le polissage	169
Figure B.20 : F2, évolution de la texture avec le polissage	170
Figure B.21 : F3, évolution de la texture avec le polissage	170
Figure B.22 : F4, évolution de la texture avec le polissage	171
Figure B.23 : F4 bis, évolution de la texture avec le polissage	171
Figure B.24 : F5, évolution de la texture avec le polissage	172
Figure B.25 : F6, évolution de la texture avec le polissage	172
Figure B.26 : F7, évolution de la texture avec le polissage	173
Figure C.1 : Variation de la texture pour la formule S1	173
Figure C.2 : Variation de la texture pour la formule S2	174
Figure C.3 : Variation de la texture pour la formule S3	174
Figure C.4 : Variation de la texture pour la formule S4	175
Figure C.5 : Variation de la texture pour la formule S5	175
Figure C.6 : Variation de la texture pour la formule F1	176
Figure C.7 : Variation de la texture pour la formule F2	176
Figure C.8 : Variation de la texture pour la formule F3	177
Figure C.9 : Variation de la texture pour la formule F4	177
Figure C.10 : Variation de la texture pour la formule F4 bis	178
Figure C 11 : Variation de la texture pour la formule F5	178
· gare er · · · variation de la texture pour la formule i e initiation de la texture pour la formule i e	

Figure C.12 : Variation de la texture pour la formule F6	179
Figure C.13 : Variation de la texture pour la formule F7	179
Figure D.1 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage	180
Figure D.2 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage, échelle 7 $\mu m$	180
Figure D.3 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage, échelle $50 \mu m$	181
Figure D.4 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage, échelle $100 \ \mu m$	181
Figure D.5 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage, échelle $200 \ \mu m$	182
Figure D.6 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage, échelle $300 \ \mu m$	182
Figure D.7 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage, échelle $500 \ \mu m$	183
Figure D.8 : Evolution multiéchelle de la texture, F1, zone 1	183
Figure D.9 : Evolution multiéchelle de la texture, F2, zone 1	184
Figure D.10 : Evolution multiéchelle de la texture, F3, zone 1	184
Figure D.11 : Evolution multiéchelle de la texture, F4, zone 1	185
Figure D.12 : Evolution multiéchelle de la texture, F4 bis, zone 1	185
Figure D.13 : Evolution multiéchelle de la texture, F5, zone 1	186
Figure D.14 : Evolution multiéchelle de la texture, F6, zone 1	186
Figure D.15 : Evolution multiéchelle de la texture, F7, zone 1	187

# Liste des tableaux

## Introduction

Les infrastructures de transport ont un impact important sur la dynamique économique et écologique des territoires. Les plus utilisées sont les infrastructures routières en grande partie pour des déplacements quotidiens entre les lieux d'habitations et d'exercice d'activités. Ce sont également les plus utilisées en milieu urbain. Ces utilisations soulèvent des problématiques de sécurité routière, de pollution de l'air et sonore (bruit de roulement) ainsi que de durabilité de ces structures. Parmi ces problématiques, un accent particulier est mis par les gouvernements et les gestionnaires de ces infrastructures sur la sécurité routière. En effet, comme le déclare le Dr Tedros Adhanom Ghebreyesus, Directeur général de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), « *il est scandaleux que le nombre de vies perdues chaque année en raison des accidents de la route s'élève à 1.35 millions, selon les estimations. Ces morts sont un prix inacceptable à payer pour la mobilité ».* Ainsi, des actions sont menées au niveau mondial pour réduire de moitié d'ici 2030 [1] les décès et les traumatismes dus aux accidents de la circulation. Cette thèse financée par le projet ANR I-STREET, module « Routes du Futur » du Plan d'Investissement d'Avenir s'inscrit dans cette dynamique.

Les causes d'accidents sont multiples et impliquent un ou plusieurs facteurs liés aux infrastructures, aux véhicules et aux usagers. Les progrès technologiques, la sensibilisation et les contrôles-sanctions permettent de réduire les causes dues aux véhicules et aux usagers. Quant aux infrastructures, la perte d'adhérence entre le véhicule et la route représente une cause importante dans les accidents routiers. Cette perte d'adhérence est liée à l'état de surface de la route, aux conditions météorologique et à la vitesse [2].

L'interaction entre un véhicule et la route est représentée par un système tribologique constitué du pneu, de la route et des différents contaminants entre la chaussée et le pneu. L'interface pneu/chaussée est le siège de plusieurs phénomènes déterminants dans le contrôle du véhicule. Il est donc important d'étudier les éléments de ce système tribologique pour comprendre et limiter les accidents. Les couches de surface des infrastructures routières jouent un rôle important dans la sécurité par la génération de l'adhérence lors du contact pneu/chaussée. L'adhérence est étroitement liée à la texture de ces couches surface [3, 4].

La texture correspond à l'état de surface 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)[5]. 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. Cette séparation permet d'expliquer les deux phénomènes principaux impliqués dans la génération de l'adhérence (l'adhésion et l'hystérésis) [6–8]. 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 entraine la diminution de l'adhérence [9, 10] et augmente ainsi le risque d'accident. La séparation de la texture en macrotexture et microtexture ne permet pas d'expliquer complètement l'évolution de la texture et de l'adhérence avec le polissage.

En effet, la surface de la chaussée est constituée de plusieurs échelles de texture superposées les unes sur les autres. L'amplitude des différentes échelles dépend de la formulation initiale de la chaussée. Ces amplitudes évoluent avec le polissage et l'état de la route. Les effets de ces échelles de texture et de la modification de leurs amplitudes due au polissage sur le contact pneu/chaussée sont peu ou mal connus.

L'objectif de cette thèse est ainsi de mettre au point en laboratoire une méthode d'analyse multiéchelle permettant d'estimer le rôle des différentes échelles de texture sur l'adhérence et son évolution avec le polissage. Ceci passera par la définition des paramètres de texture multiéchelle discriminants par rapport à l'adhérence et au polissage. Ces paramètres multiéchelles permettront d'analyser l'évolution de l'amplitude des échelles de texture avec le polissage. Cette analyse sera complétée par

une modélisation multiéchelle de l'adhérence permettant d'estimer quantitativement le poids des différentes échelles de texture.

Le chapitre 1 est dédié aux forces de contact résultant de l'interaction pneu/route. Il traite de l'adhérence et des mécanismes physique qui en sont à l'origine. Un accent est ensuite mis sur les paramètres les plus influents sur l'adhérence en particulier la texture. Les différentes méthodes d'estimation de l'adhérence sont présentées. Aussi, sont présentées les méthodes de modélisation empiriques, semi-analytiques et numériques de l'adhérence [7, 9, 11–16]. Il y est fait mention des modèles multiéchelles déjà existant et de leurs limites [3, 4]. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la caractérisation de la texture. Les méthodes de caractérisation standard [17–21] ainsi que les paramètres de texture généralement utilisés sont présentés. Ensuite sont détaillées les méthodes de caractérisation multiéchelle de la texture ainsi que leurs avantages par rapport aux méthodes classiques [22–27].

Le chapitre 2 traite de la méthodologie adoptée pour cette thèse. Un descriptif détaillé de l'objectif de la thèse y est fait. Il s'en suit les détails de la méthodologie expérimentale et numérique qui est adoptée. La dernière partie de ce chapitre traite de la méthodologie d'exploitation des résultats expérimentaux ainsi que la solution de modélisation de l'adhérence.

Le chapitre 3 détaille de l'étude expérimentale menée dans le cadre de cette thèse. Les différents échantillons utilisés ainsi que les protocoles de mesure de l'adhérence, de la texture et du polissage y sont exposés. L'évolution de l'adhérence avec le polissage ainsi que la texture est discutée. Ces résultats sont comparés à ceux de la littérature.

Le chapitre 4 est dédié à l'application de la méthode de décomposition multiéchelle sur les différents types de matériaux analysés dans le cadre de cette thèse. Elle est appliquée aux différentes textures rencontrées et l'évolution de l'amplitude des différentes échelles avec le polissage est analysée. Des paramètres multiéchelles sont définis et leurs évolutions avec le polissage sont analysées. Ceci nous permettra de déterminer les paramètres multiéchelles les plus pertinents.

Enfin, le chapitre 5 décrit la modélisation physique de l'adhérence. Un modèle de contact semianalytique basé sur le massif semi-infini viscoélastique est utilisé. La méthode de modélisation multiéchelle de l'adhérence y est abordé.

Le chapitre 6 fait une synthèse du travail effectué. Les applications potentielles du travail y sont mentionnées et les perspectives sont données.

# 1. Etude bibliographique

L'objectif de ce chapitre est de rappeler les notions d'adhérence et les mécanismes physiques qui en sont à l'origine. Les paramètres les plus influents ainsi que les principaux travaux sur l'adhérence sont rappelés. Ceci permet de positionner ce travail par rapport à l'état des connaissances actuelles.

### 1.1. Adhérence

#### 1.1.1. Génération de l'adhérence

Selon [28], « l'adhérence désigne les forces de contact développées à l'interface entre le pneu et la surface de la chaussée permettant de conserver la trajectoire désirée d'un véhicule lors d'une manœuvre de conduite ». L'adhérence participe à la rotation de la roue en s'opposant à ce qu'elle puisse glisser sans tourner. Elle est importante lors des phases d'accélération, de freinage ou de virages. Elle est évaluée par un coefficient de frottement représentant le potentiel d'adhérence d'un couple pneu/chaussée. L'adhérence est parfois désignée sous le nom de coefficient de frottement ou frottement.

Il existe deux types d'adhérence en fonction des sollicitations : l'adhérence longitudinale et transversale.

#### Adhérence longitudinale (CFL)

C'est celle qui est mise en œuvre lors des phases d'accélération et de freinage en ligne droite. Lors de ces phases, la vitesse des roues est différente de la vitesse linéaire du véhicule. Pour compenser cette différence, les pneus commencent à glisser selon un taux de glissement défini par l'équation (1.1) :

$$s = \frac{V - r \times \omega}{V} \tag{1.1}$$

 $\omega$  représente la vitesse angulaire de la roue, r le rayon de la roue et V la vitesse linéaire du véhicule. Ce glissement induit la génération d'une force de frottement,  $F_{xl}$ . La force de frottement varie en fonction du glissement. En valeur absolue, le glissement varie entre 0 et 1. En freinage, lorsqu'il est égal à 1, on parle d'un freinage en roue bloquée. Si  $F_z$  est la force verticale qui est appliquée sur le pneu, le coefficient de frottement longitudinal est défini par l'équation (1.2) :

$$\mu_l = \frac{F_{xl}}{F_z} \tag{1.2}$$

#### > Adhérence transversale

C'est celle qui est mise en œuvre lors de manœuvres de changement de direction (virages). Le véhicule est soumis en courbe à une force centrifuge qui le chasse vers l'extérieur. Pour maintenir sa trajectoire, une force centripète  $F_{xt}$  de valeur égale à la force centrifuge doit être fournie. Si  $F_z$  est la force verticale qui est appliquée sur le pneu, le coefficient de frottement transversal est défini par l'équation (1.3) :

$$\mu_t = \frac{F_{xt}}{F_z} \tag{1.3}$$

Il varie en fonction de la dérive due au braquage du volant par le conducteur. La dérive représente l'angle formé par l'axe des roues et la tangente à la trajectoire du véhicule.



Figure 1.1 : Forces de contact mis en jeu lors d'une sollicitation transversale

#### Adhérence en roulage

En roulage, l'adhérence est la combinaison des deux coefficients d'adhérence. Elle est définie par l'équation (1.4) :

$$\mu = \sqrt{\mu_l^2 + \mu_t^2} \tag{1.4}$$

Les deux coefficients d'adhérence ont des variations similaires. Pour l'adhérence longitudinale, la courbe passe par un maximum quand le glissement se situe entre 10 à 25 % [29]. Ensuite, on note une décroissance du frottement jusqu'à une valeur correspondant à la roue bloquée. Pour l'adhérence transversale, la courbe passe par un maximum quand la dérive varie entre 4 à 6° [29]. Ensuite, on note une décroissance du frottement jusqu'à une valeur correspondant à la roue bloquée.





Deux mécanismes principaux sont à l'origine de la génération de l'adhérence. Il s'agit de l'indentation ou hystérésis et de l'adhésion.

#### L'indentation ou hystérésis

C'est la déformation de la gomme du pneumatique par glissement sur les aspérités de la chaussée. Compte tenu du comportement viscoélastique de la gomme, l'enveloppement dissymétrique de l'aspérité entraine des forces de réactions qui s'opposent au glissement. La résultante des pressions de contact comporte une composante verticale qui équilibre la charge normale et une composante horizontale qui s'oppose à l'avancement du pneumatique. La plage de fréquences dans laquelle ce phénomène est maximal est  $10^2 Hz - 10^6 Hz$  [29].

#### L'adhésion

Elle résulte des forces de liaisons intermoléculaires de Van Der Waals. La condition nécessaire pour l'apparition de ces forces est le contact direct entre la gomme et la chaussée. La présence des contaminants sur la chaussée réduit l'effet de l'adhésion. La plage de fréquences de ce phénomène est  $10^6 Hz$  -  $10^9 Hz$  [29].



Figure 1.3 : Mécanismes physique à l'origine de l'adhérence [30]

Le poids de l'indentation et de l'adhésion dans le frottement global dépend de nombreux facteurs. Selon [4], les plus importants sont la nature de la gomme du pneu, la texture et la présence de contaminants à la surface de la chaussée. En présence de contaminants sur la chaussée, l'adhésion est négligeable et il est généralement admis que le frottement pneu/chaussée est uniquement dû à l'indentation.

### 1.1.2. Facteurs influents sur l'adhérence

L'interaction pneu/chaussée est influencée par plusieurs paramètres. Nous pouvons citer : le mode de sollicitation (longitudinal ou transversal), le taux de glissement, la dérive du pneumatique, la vitesse du véhicule et la pression de gonflage des pneus, la structure de la bande de roulement du pneu, la gomme, le type de sol (rugosité, propriétés thermique) et l'état de la route (sec, mouillé, contaminé).

# Mode de sollicitation (longitudinal ou transversal), le taux de glissement, la dérive

Dans la section 1.1.1, l'influence du mode de sollicitation, du taux de glissement et de la dérive sur le frottement a été rappelée.

#### > Vitesse et propriétés de la gomme du pneu

Les propriétés mécaniques de la gomme du pneu jouent un rôle important sur l'adhérence. Ceci s'explique par la fréquence de sollicitation de la gomme qui influe sur ses propriétés [29]. Quand la fréquence de sollicitation est petite, le matériau réagit de manière élastique (jusqu'à  $10^2 Hz$ ). Son hystérèse est faible et l'adhérence est faible. Entre  $10^2 Hz - 10^6 Hz$ , le matériau a un comportement viscoélastique. C'est la plage de fréquences favorable à l'adhérence. Cette fréquence de sollicitation est fonction du taux de glissement, de la vitesse de déplacement du véhicule et de l'espacement *e* des aspérités de la chaussée (donc de la texture).

#### > Texture

La texture influe sur les niveaux d'adhérence. Pour l'indentation, il faut que la route présente des indenteurs c'est-à-dire des aspérités qui vont s'enfoncer dans la gomme superficiellement. L'adhésion nécessite un contact direct entre la gomme et la route. La Figure 1.4 montre l'effet de la texture sur le frottement.



Figure 1.4 : Influence de la texture sur le frottement [31]

La microtexture est la composante de la texture qui joue le plus sur la valeur du frottement du pneu. Une forte microtexture permet d'avoir un bon frottement que ce soit à basse ou à haute vitesse. On associe le drainage de l'eau, surtout en grande vitesse, dans les espaces inter-granulaires à la macrotexture [29]. Ce drainage permet d'avoir plusieurs aspérités en contact avec le pneu et permet aussi d'augmenter la valeur de la composante d'adhésion. Ainsi, un bon coefficient de frottement est obtenu entre le pneu et la chaussée.

La microtexture participe principalement au phénomène d'indentation. Elle permet la rupture du film d'eau résiduel. Il est admis que la macrotexture participe au drainage de l'eau. Mais suite à cela, il subsiste encore de l'eau au-dessus des aspérités. Ceci crée l'effet élastohydrodynamique réduisant l'adhérence. L'effet élastohydrodynamique est causé par le glissement relatif entre le pneu et la chaussée. Ce glissement aspire l'eau à la surface de la chaussée dont la pression exercée par ce film d'eau tend à soulever localement le pneumatique. Selon [32], le film discontinu d'eau au sommet des aspérités ne peut être expulsé que par la forme pointue de la microtexture. Ceci est due, selon [33], à des fortes pressions aux sommets des microaspérités lors du passage du pneu.

L'influence de la texture peut aussi être montrée à travers les études de [34], selon qui, le frottement sur des surfaces humides dépend de la présence de formes pointues au sommet des aspérités qui participent à la rupture du film d'eau. De plus, [35] ont montré l'importance de la texture et de la forme des aspérités sur la vitesse d'évacuation d'eau. La forme des indenteurs (angle au sommet) est importante. [36] montre le rôle ambigu de la densité des indenteurs (taille des boucles de charge et de décharge). [37] démontre d'une manière empirique qu'un optimum d'indenteurs est à rechercher pour obtenir un frottement élevé.  $2 - 100 \,\mu m$  est la plage de taille de gravillons contribuant à la rupture du film d'eau selon [38]. Moore montre que la taille minimale des rugosités pour assurer la rupture du film d'eau serait de 5  $\mu m$ . [39] confirment le rôle de l'angularité et montrent que la hauteur des microaspérités agissant sur la gomme est de  $100 \,\mu m$ . Ces références démontrent le rôle important de la texture et surtout de la microtexture sur le niveau d'adhérence.

#### Etat de la route

La présence de l'eau ou des contaminants joue un rôle important aussi sur le niveau d'adhérence. L'aire de contact sur une chaussée mouillée est découpée significativement en trois zones comme montré sur la Figure 1.5 :



Figure 1.5 : Zones de contact pneu/chaussée en présence d'eau [40]

La première zone est celle hydrodynamique. La hauteur d'eau dans cette zone est supérieure à 0.5 mm. Dans cette zone, l'eau s'accumule devant le pneu et exerce une pression hydrodynamique qui tend à soulever le pneu. La deuxième zone est celle viscodynamique avec une hauteur d'eau comprise entre le  $1 \mu m - 0.5 mm$ . Dans cette zone, l'évacuation de l'eau est faite par son stockage dans les sculptures du pneu. La présence des lamelles dans la sculpture dans chaque patin de la bande de roulement facilite cette évacuation. La dernière zone est celle humide-sec avec la présence d'un film d'eau résiduel discontinu. C'est dans cette zone qu'un contact est établi ente le pneumatique et la chaussée. Les arrêtes des pains de gomme viennent transpercer le film d'eau. Les microrugosités jouent un rôle important dans ce contact et dans la génération des forces de frottement [29].

En présence d'eau sur la chaussée, les phénomènes d'indentation et d'adhésion sont perturbés. Généralement, on admet que les liaisons inter – moléculaires sont négligeables. Ainsi, l'adhérence pneu/chaussée est considérée comme due seulement à l'indentation. Pour assurer une bonne adhérence, il faut évacuer l'eau. La route participe au drainage de l'eau à grâce à la macrotexture. Les sculptures du pneu vont aussi y participer en repoussant l'eau vers les côtés et en stockant une autre partie dans les creux. Selon [41], le frottement diminue quand la hauteur d'eau au-dessus des aspérités augmente et devient constant à partir d'une certaine valeur de cette hauteur. Ceux de [42] montrent que le frottement diminue linéairement avec le logarithme de la hauteur d'eau (en divisant le volume d'eau par la surface). Il a aussi trouvé qu'en basse vitesse (32 km/h), l'eau n'avait pas d'influence sur le frottement, mais seulement à grande vitesse (96 km/h). Les études de [43] ont montré que pour les surfaces lisses, le frottement diminue aussitôt qu'elles sont mouillées. Par contre, pour celles rugueuses, le frottement est d'abord constant au début et diminue quand la hauteur d'eau dépasse 0,1 mm.



Figure 1.6 : Adhérence en fonction de la hauteur d'eau (E1 – E3 : surface lisse – rugueuse) [43]

La présence des contaminants sur la chaussée entraîne la réduction de l'adhérence. En effet, en fonction de la taille de ces contaminants (de l'ordre de  $20 \ \mu m$ ), ils peuvent être piégés dans les vallées de la surface et jouer le rôle de lubrifiant [44]. Cette lubrification entraine une réduction de l'adhérence.

### 1.1.3. Mesure de l'adhérence

Nous pouvons distinguer deux types de moyens de mesure de l'adhérence : les moyens de mesure in situ et en laboratoire. Ici ne seront présentés que quelques moyens de mesure de l'adhérence utilisables en laboratoire.

#### > Pendule SRT: Skid Resistance Tester

Il mesure un coefficient de frottement longitudinal à faible vitesse de glissement. Le pendule porte à son extrémité un patin de caoutchouc d'environ 76 mm \* 25 mm frottant sur la surface à mesurer. Le revêtement est mouillé et les mesures sont corrigées en fonction de la température. La mesure est normalisée par une norme européenne (NF EN 13036-4) [45]. Un ressort applique le patin sur cette surface avec une force déterminée. La hauteur maximale de remontée du pendule dépendant de l'énergie absorbée par le frottement, est repérée par une aiguille placée devant un cadran gradué directement en coefficients de frottement.



Figure 1.7 : Pendule SRT [46]

#### > Dynamic Friction Tester (DFT)

Il permet de mesurer le coefficient de frottement longitudinal entre un patin et la chaussée tout au long du freinage de celui-ci. Il est composé d'une unité de mesure et d'une unité d'acquisition. L'unité de mesure est composée d'un plateau rotatif sur lequel sont fixés trois patins de dimensions 6 mm \* 16 mm \* 20mm. La charge appliquée sur le patin est de 11,8 *N*.



Figure 1.8 : DFT [47]

Le patin est en glissement total sur la surface en cours de mesure. L'appareil permet ainsi de simuler le comportement de la gomme du pneu, roue bloquée. De plus, il permet d'avoir l'évolution du coefficient de frottement tout au long du freinage. Il permet aussi de faire des tests en présence d'eau avec une épaisseur de film de l'ordre de 1 mm. Les conditions de réalisation de l'essai sont décrites par la norme ASTM E 1991 [48]. Le disque comportant les trois patins est accéléré par un moteur

jusqu'à 80 km/h. La surface à tester est mouillée. Ensuite, le moteur est coupé et les patins sont mis en contact avec la surface à tester. La vitesse décroît jusqu'à zéro sous l'effet des forces de frottement. Après réalisation de l'essai, le logiciel de traitement de l'appareil permet d'avoir les valeurs du frottement lorsque la vitesse du disque est de 20,40 et 60 km/h(DFT20, DFT40, DFT60).

#### Wehner&Schulze

Cette machine permet la mesure de l'adhérence à différents niveaux de polissage. Les mesures sont normalisées par la norme NF EN 12697-49 [49]. 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 [10].

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  $0.4 N/mm^2$ .

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%.



Figure 1.9 : Machine Wehner et Schulze

C'est ce moyen de mesure qui sera utilisé pour notre étude. Le protocole de mesure sera détaillé dans la section 3.2.

### 1.1.4. Modélisation de l'adhérence

Il existe plusieurs types de modèle permettant d'estimer le potentiel d'adhérence d'un couple gomme/chaussée. Ils peuvent se distinguer en modèles empiriques ou semi-empiriques, les modèles physiques et ceux multiéchelles. Tous ces modèles sont basés sur la modélisation du contact pneu/chaussée. Ils permettent de prendre en compte les propriétés de la chaussée en considérant la texture (forme, angularité et densité des aspérités), les conditions de mouillage (hauteur d'eau), les contaminants présents sur la route, les propriétés de la gomme et la charge appliquée sur la gomme.

#### > Modèles empiriques et semi-empiriques

Les modèles empiriques ou semi-empiriques sont généralement obtenus par identification à partir des données expérimentales. Leurs paramètres n'ont généralement pas de signification physique. Mais, ces modèles permettent d'avoir une estimation rapide du frottement à partir des données expérimentales. En exemple, nous pouvons citer le modèle de Penn State [50] qui prend en compte la vitesse et la macrotexture. Ce modèle a été amélioré par [51] et [52] pour considérer l'effet de l'eau. Les paramètres de ces modèles doivent être souvent recalés par rapport aux données expérimentales.

#### Modèles physiques

Les modèles physiques quant à eux prennent en compte en plus des paramètres de texture, les propriétés de la gomme et des conditions de contact comme la charge et la vitesse. En exemple, nous pouvons citer le modèle de Persson [11]. Ce modèle prend en compte la viscoélasticité de la gomme et la densité spectrale de la surface de la chaussée. Il permet d'estimer fidèlement l'adhérence en fonction de la vitesse. Son modèle estime que la surface routière et la gomme ont les mêmes densités spectrales de puissance. Cette hypothèse n'est vraie que lorsque la surface de contact effective est grande [12] et donc d'une faible rugosité (ce qui n'est pas le cas des surfaces routières). De plus, c'est un modèle analytique difficile à mettre en œuvre. D'autres modèle comme celui de [13, 53] permettent d'estimer l'adhérence en considérant la courbure des aspérités de contact. Une description sphérique des aspérités est faite. Ils considèrent que les aspérités ont la même courbure, que la hauteur est distribuée stochastiquement et que l'interaction entre les différentes aspérités est négligeable. Cette hypothèse de non interaction entre les aspérités est valable si les aspérités sont assez éloignées les unes des autres. Ces hypothèses font que ce modèle ne sera pas utilisé dans notre étude. En effet, compte tenu de la présence de nombreuses aspérités rapprochées sur les surfaces de chaussées, l'interaction entre ces différentes aspérités dans la déformation de la gomme ne peut pas être négligée.

Il existe aussi des modèles physiques basés sur la description géométrique des indenteurs. Nous pouvons citer celui de Tabor, des indenteurs, de Stefani. Un indenteur est défini comme un triangle formé par un sommet et deux vallées voisines [54]. Un indenteur est défini par son demi-angle au sommet  $\alpha$ , le relief représenté par l'angle  $\theta$  et la longueur de base de l'indenteur 2*L*.



Figure 1.10 : Géométrie d'un indenteur [55]

Le frottement de Tabor est calculé à partir du demi-angle au sommet des aspérités et d'un coefficient  $\gamma$  représentant la portion d'énergie de déformation perdue due aux propriétés viscoélastiques de la gomme. La formule de calcul est donnée par l'équation (1.5) :

$$\mu = \frac{\gamma}{pi} \times \cot(\alpha) \tag{1.5}$$

Dans leur étude, [56] ont trouvé que  $\gamma$  est généralement égal à 0,7.

Un autre modèle basé sur cette description est celui des indenteurs. [55] a développé le modèle des indenteurs basé sur la géométrie représentée à la Figure 1.11.



Figure 1.11 : Modèle des indenteurs [55]

Ce modèle a pour objectif de mettre en évidence l'interaction entre la forme des indenteurs, la viscoélasticité de la gomme et leur effet conjugué sur le frottement. Les aspects pris en compte dans le modèle sont les suivants : l'angle au sommet, la viscoélasticité de la gomme. Le modèle de frottement multiéchelle est donné par l'équation (1.6) :

$$\mu = h \times \frac{(\cos \alpha + \mu_0 \times \sin \alpha)}{(\sin \alpha - \mu_0 \times \cos \alpha)} - (1 - h) \times \frac{(-\cos \alpha + \mu_0 \times \sin \alpha)}{(\sin \alpha + \mu_0 \times \cos \alpha)}$$
(1.6)

Le facteur *h* est un coefficient de partage de charge appliquée à l'indenteur. Il permet de prendre en compte le déphasage entre la déformation de la gomme à l'entrée et à la sortie de l'indenteur dû au comportement viscoélastique de la gomme. Il est modélisé par l'équation (1.7):

$$h = 0.5 + \frac{2 \times \delta}{\pi} \tag{1.7}$$

Avec  $\delta$  l'angle de déphasage. Les valeurs de  $tan \delta$  varient souvent entre 0, 1 - 1. Pour la description de la microtexture, une valeur de 0,6 [55] est souvent prise compte tenu de la variation du déphasage en fonction de la fréquence de sollicitation et de la température. Ainsi, nous avons  $h \approx 0,83$ .

Celui de Stefani propose une description plus complète de la viscoélasticité de la gomme. Les propriétés viscoélastiques sont décrites en utilisant le solide de Kelvin-Voigt. Ce modèle est constitué d'un ressort et d'un amortisseur en parallèle. On suppose que les deux composantes ont la même déformation. La contrainte globale est la somme des contraintes dans chaque branche.



Figure 1.12 : Modèle de Kelvin-Voigt

*E* est la rigidité du ressort et  $\eta$  la viscosité de l'amortisseur. Le temps de relaxation du solide de Kelvin-Voigt est défini par l'équation (1.8) :

$$\tau = \frac{\eta}{E} \tag{1.8}$$

Le solide avance à une vitesse *V* en roulement sans frottement. Ainsi, seul la contribution de l'hystérésis est prise en compte dans le calcul du frottement. Cette hypothèse peut être faite car la mesure du frottement a été faite en condition mouillée. La géométrie de l'application du modèle est donnée par la Figure 1.13 :



Figure 1.13 : Modèle de Stefani [54]

Les vitesses  $V_1$  et  $V_2$  sont définies. Ces vitesses permettent de définir le décollement du solide viscoélastique avec la surface de contact. Elles sont définies par l'équation (1.9) :

$$V_1 = \frac{h_0 \times tan(\alpha_1)}{\tau}, V_2 = \frac{h_0 \times tan(\alpha_1) + l_1}{\tau}$$
(1.9)

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 prenant  $L_3 = 0$ ,  $L_1 = L_2 = L$ , nous retrouvons la géométrie des indenteurs. En effet, il s'agit de deux demi-indenteurs. On peut alors établir les relations définies par l'équation (1.10) :

$$\cot(\alpha_1) = \cot(\alpha), \cot(\alpha_2) = \cot(\alpha_1) + 2\tan(\theta)$$
(1.10)

Le coefficient de frottement est défini comme le rapport entre la force horizontale  $(f_h)$  et la force verticale  $(f_v)$  résultantes du passage du solide viscoélastique sur les aspérités. Les expressions de ces forces sont données par l'équation (1.11) et l'équation (1.12).

$$f_{\nu} = \frac{V \times E}{2 \times L} \begin{bmatrix} \frac{L \times t_1}{\tan(\alpha_1)} + \frac{L \times t_2}{\tan(\alpha_2)} - \frac{V}{2} \left( \frac{t_1^2}{\tan(\alpha_1)} + \frac{t_2^2}{\tan(\alpha_2)} \right) \\ V \times \tau \left( \frac{t_1}{\tan(\alpha_1)} - \frac{t_2}{\tan(\alpha_2)} \right) \end{bmatrix}$$
(1.11)

$$f_{h} = \frac{V \times E}{2 \times L} \begin{bmatrix} \frac{L \times t_{2}}{\left[\tan\left(\alpha_{2}\right)\right]^{2}} - \frac{L \times t_{1}}{\left[\tan\left(\alpha_{1}\right)\right]^{2}} - \frac{V}{2} \left(\frac{t_{2}^{2}}{\left[\tan\left(\alpha_{2}\right)\right]^{2}} - \frac{t_{1}^{2}}{\left[\tan\left(\alpha_{1}\right)\right]^{2}}\right) + \\ V \times \tau \left(\frac{t_{1}}{\left[\tan\left(\alpha_{1}\right)\right]^{2}} + \frac{t_{2}}{\left[\tan\left(\alpha_{2}\right)\right]^{2}}\right) \end{bmatrix}$$
(1.12)

 $t_1$  et  $t_2$  représentent les temps de parcours du solide sur les deux parties de l'indenteur. Ils sont définis par l'équation (1.13) :

$$t_{1} = \frac{h_{0} \times \tan(\alpha_{1}) + l_{1}}{V} - \tau, t_{2} = \frac{L}{V} - T \times \tau, T = \frac{2 \times L}{V}$$
(1.13)

*T* est la durée totale du passage du solide viscoélastique.

Ces trois modèles permettent d'avoir une bonne corrélation entre les valeurs expérimentales et calculées (coefficient de corrélation variant entre 0.6 - 0.9[4]). Néanmoins, les valeurs trouvées sont souvent éloignées des valeurs expérimentales. De plus, ils sont appliqués aux profils de texture. Même s'ils permettent de faire des calculs rapides, ils ne tiennent pas compte des différentes interactions entre les différentes aspérités. Il en est de même pour les autres modèles de la littérature comme ceux de [3, 57, 58].

Pour tenir compte des différentes interactions entre les aspérités, il serait important de considérer la surface de la chaussée et non les profils. Il existe plusieurs modèles 3D permettant de le faire. Celui s'adaptant le plus à notre problématique est un modèle semi-analytique basé sur la théorie du massif semi-infini. Ce modèle permet de prendre en compte l'aspect multi-aspérités du contact par rapport au modèle 2D. Il fait l'hypothèse du contact entre un indenteur très petit et un corps déformable infini par rapport à l'indenteur. Cette hypothèse est vraie étant donné la taille des aspérités de la route (de l'ordre du  $\mu m$ ) 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 dû à l'existence de plusieurs points de contact [11, 12, 15]. Ce modèle prend en entrée la surface de la chaussée ainsi que les propriétés viscoélastiques 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. La mise en œuvre de ce modèle sera détaillée dans le chapitre 5.

#### Modèles multiéchelles

Très peu de modèles traitent de l'aspect multiéchelle du contact dans la modélisation de l'adhérence pneu/chaussée.

[55] a adapté le modèle de Stefani pour tenir compte de l'effet des échelles. Il considère les échelles de rugosité et d'ondulation. Ces échelles sont issues de la décomposition en motifs (section 1.2). La Figure 1.14 illustre la définition de ces échelles.



Figure 1.14 : Echelles de texture définies par la méthode des motifs[55]

L'échelle de rugosité est celle du profil d'origine mesuré. L'échelle de l'ondulation correspond au profil enveloppe constitué des segments reliant tous les pics du profil d'origine. Le frottement multiéchelle est alors la somme des frottements de ces deux échelles. Il a validé sa théorie sur des échantillons avec une même microtexture mais une macrotexture variable. Il a comparé le frottement calculé et celui mesuré par le SRT. La Figure 1.15 montre le résultat obtenu.



Figure 1.15 : Validation du modèle multiéchelle de Stefani[55]

La considération d'une contribution multiéchelle de la texture sur l'adhérence permet d'avoir des valeurs d'adhérences proches des valeurs mesurées avec le pendule SRT.

[55] a aussi adapté son modèle des indenteurs pour tenir compte de l'effet des échelles de texture. Il calcule le frottement à une échelle en se basant sur le frottement généré par les échelles inférieures. La formule de calcul est donnée par l'équation (1.14) :

$$\mu_{i} = h \times \frac{(\cos \alpha_{i} + \mu_{0,i-1} \sin \alpha_{i})}{(\sin \alpha_{i} - \mu_{0,i-1} \cos \alpha_{i})} - (1-h) \times \frac{(-\cos \alpha_{i} + \mu_{0,i-1} \sin \alpha_{i})}{(\sin \alpha + \mu_{0,i-1} \cos \alpha_{i})}$$
(1.14)

L'indice *i*, représente l'échelle de calcul et  $\mu_{0,i-1}$  le frottement trouvé à l'échelle i - 1. Les autres paramètres sont ceux du modèle des indenteurs. Dans son étude, [55] considère quatre échelles de texture :  $10 \ \mu m - 100 \ \mu m - 1 \ mm - 10 \ mm$ . Un indenteur est détecté à une échelle  $i \ (i = 1 - 4)$  si sa largeur de base  $2L_i$  est au moins égale à l'échelle considérée. Dans son étude, il affirme « Un point de profil ne peut être considéré comme sommet (respectivement vallée) d'indenteur à l'échelle  $2L_i$  que s'il constituait un maximum (respectivement minimum) local centré sur une portion de profil de largeur au moins égale à  $2L_i$  ». Ceci est illustré sur la Figure 1.16 :



Figure 1.16 : Critère de sélection des sommets

La Figure 1.17 montre la validation du modèle multiéchelle des indenteurs par rapport au frottement SRT.



Figure 1.17 : Validation du modèle multiéchelle des indenteurs

La prise en compte de l'effet des différentes échelles permet d'améliorer les valeurs de frottement calculées. Ces résultats sont très intéressants mais la définition des échelles qui doivent être prises en compte dans le calcul du frottement n'est pas fine. Ainsi, l'effet des échelles intermédiaires n'est pas considéré. De plus, la non prise en compte des interactions entre les différentes aspérités dans le calcul du frottement fait que tous les indenteurs respectant le critère de sélection sont considérés. Ceci n'est pas le cas en réalité. La distribution des hauteurs de la surface des chaussées fait que certains pics seront en contact avec la gomme de la chaussée et d'autre situés à une hauteur plus basse ne le seront pas. Les mêmes réserves peuvent être émises sur le modèle multiéchelle de [3, 12, 59].

### 1.2. Texture

Comme montré dans la section 1.1.2, l'adhérence est étroitement lié à la texture de la chaussée. Cette texture évolue au cours de la durée de vie de la chaussée et affecte aussi l'évolution de l'adhérence. De nombreuses études essaient d'estimer l'adhérence à partir de la texture [59–61] compte tenu de la faible dispersion entre les moyens de mesure de la texture par rapport aux moyens de mesure de l'adhérence. Il est alors nécessaire de savoir la mesurer, la caractériser et d'analyser son influence sur l'adhérence.

### 1.2.1. Définition

La texture d'une chaussée correspond à son état de surface. Elle dépend de la formulation de cette chaussée. En effet, les revêtements routiers sont formulés à bases de granulats, de sable, de fines et d'un liant. Le choix de chacun de ces composants en termes de taille et de proportion à un effet direct sur les propriétés mécaniques du contact pneu/chaussée. La combinaison des granulats, du sable et des fines confère aux chaussées leur aspect rugueux. Cette rugosité est propre à chaque formulation. Elle évolue dans le temps sous l'effet du polissage induit par le trafic et les conditions météorologiques [62, 63].

### **1.2.2.** Caractérisation standard de la texture

Dans le domaine routier, deux échelles de rugosités sont généralement considérées : la microtexture et la macrotexture. Cette distinction est faite en fonction des dimensions verticales et horizontales des irrégularités de la surface.

#### > Macrotexture

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)[5]. Elle permet d'avoir un bon niveau de frottement en grande vitesse et en présence d'eau.

Elle peut être déterminée par la méthode de la tache de sable [64]. C'est une méthode volumétrique caractérisant l'ouverture de la texture. Le paramètre de texture calculé est la profondeur moyenne de texture (*PMT*). Il représente l'épaisseur moyenne du film d'eau à partir de laquelle les gros gravillons commencent à être recouverts d'eau. La méthode d'essai consiste à araser un volume connu de matériau sur une surface de revêtement propre et sèche, à mesurer la surface couverte et à calculer ensuite la profondeur moyenne entre le fond des creux et les sommets des aspérités de la surface du revêtement.

Cette méthode ne permet pas cependant d'évaluer la macrotexture sur un long itinéraire. Des méthodes profilométriques sont utilisées dans ce cas. La macrotexture est évaluée sur des profils de surfaces obtenus grâce à des capteurs. Les appareils utilisés se déclinent en systèmes statiques (CTM : Circular Texture Meter, Elatextur, ...) et en systèmes dynamiques (Rugolaser, LCMS : Laser Crack Measurment System, ...). L'appareil généralement utilisé en France est le Rugolaser. Il utilise un capteur sans contact à rayon laser. La mesure est effectuée en continu dans le trafic avec une vitesse pouvant atteindre 100 km/h. A partir des profils obtenus par les appareils de mesure, on peut déterminer un paramètre décrivant la macrotexture : la profondeur moyenne de profil *PMP* [64].

Il est possible d'estimer le *PMT* à partir du *PMP*. La valeur estimée est dénommée PTE (Profondeur de Texture estimée) (NF EN ISO 13473-1) [5].

#### > Microtexture

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[5]. La microtexture permet d'avoir un bon frottement que ce soit en basse ou en grande vitesse. Elle participe à la rupture des films résiduels d'eau à la surface de la chaussée. Dans une étude très récente, [65] a démontré l'importance de la microtexture sur le niveau de l'adhérence et son évolution dans le temps. En effet, la macrotexture est recouverte par la microtexture. L'amplitude de cette dernière diminue dans le temps sous l'effet du polissage et des conditions météorologiques. Cette diminution s'accompagne d'une diminution de l'adhérence. Notre étude portera ainsi sur sa contribution sur l'adhérence et son évolution.

Des capteurs tactiles et sans contact ont souvent utilisés pour relever des profils de texture. Etant donné les faibles dimensions de la microtexture, le capteur utilisé doit permettre d'atteindre des résolutions très fines ( $\mu m$ ). En exemple, nous pouvons citer le STIL qui permet de mesurer des profils de texture avec un pas de mesure minimal de  $10 \ \mu m$ . D'autres appareils comme les microscopes permettent d'obtenir des résolutions plus basses. Dans notre étude, le capteur Infinite Focus d'Alicona est utilisé. Ce capteur nous 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 1.18 : Alicona

Le résultat de mesure est une cartographie 3D de la surface. Des profils peuvent être extraits de cette cartographie 3D.

Des paramètres de texture standards ou morphologiques comme définis dans les normes ISO 21578, EUR 15178N, ISO 25178 [17–21] seront alors calculés pour quantifier la microtexture.

#### Paramètres de texture standards

Les paramètres standards peuvent être séparés en paramètres de hauteurs, paramètres hybrides et paramètres de volume. Ils peuvent être calculés sur des surfaces (3D) ou sur des profils de texture (2D). La surface peut être représentée par la fonction z(x, y) correspondant à la mesure de la texture dans le plan (x, y) avec un pas de mesure en x de dx et en y de dy, un nombre de points mesuré de nx, ny respectivement en x et y. Un profil peut être représentée par la fonction z(x) correspondant à la mesuré de nx, ny respectivement en x et y. Un profil peut être représenté par la fonction z(x) correspondant à la mesure de la texture suivant x avec un pas de mesure de dx, un nombre de points mesuré de nx en x. La littérature [8, 43] nous permet de citer quelques paramètres permettant de relier la texture à l'adhérence et à son évolution.

Nous pouvons distinguer d'une part les paramètres de hauteurs calculés par rapport au plan moyen de la texture pour la surface ou par rapport à la ligne moyenne pour les profils. Le paramètre le plus utilisé est la hauteur moyenne quadratique, Sq pour la surface et Rq pour le profil. La formule de calcul de Sq est donnée par l'équation (1.15) :

$$S_{q} = \sqrt{\frac{1}{nx \times ny} \sum_{x=1}^{nx} \sum_{y=1}^{ny} z^{2}(x, y)}$$
(1.15)

La formule de calcul du Rq est donnée par l'équation (1.16) :

$$R_{q} = \sqrt{\frac{1}{nx} \sum_{x=1}^{nx} z^{2}(x)}$$
(1.16)

D'autre part, nous avons les paramètres de texture hybrides qui tiennent compte en plus de la hauteur, du pas de mesure et de l'énergie du signal de texture. Il s'agit de la pente quadratique moyenne, la courbure arithmétique moyenne des sommets ou pics, de la densité des pics ou des sommets et de la dimension fractale.

Pour les surfaces, la pente (Sdq) est définie par l'équation (1.17) :

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{(nx-1) \times (ny-1)} \sum_{x=2}^{nx} \sum_{y=2}^{ny} \left[ \left( \frac{z(x,y) - z(x-1,y)}{dx} \right)^2 + \left( \frac{z(x,y) - z(x,y-1)}{dy} \right)^2 \right]}$$
(1.17)

Pour les profils, elle est définie par l'équation (1.18) :

$$Rdq = \sqrt{\frac{1}{(nx-1)} \sum_{x=2}^{nx} \left(\frac{z(x) - z(x-1)}{dx}\right)^2}$$
(1.18)

Pour la surface, la courbure (Ssc) est la somme des courbures dans les deux directions x et y. Elle est donnée par l'équation (1.19) [17]:

$$Ssc = -\frac{1}{2} \times \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \left( \frac{z(x_{sk+1}, y_{sk}) + z(x_{sk-1}, y_{sk}) - 2 \times z(x_{sk}, y_{sk})}{dx^{2}} + \frac{z(x_{sk}, y_{sk+1}) + z(x_{sk}, y_{sk-1}) - 2 \times z(x_{sk}, y_{sk})}{dy^{2}} + \right)$$
(1.19)

*n* représente le nombre de sommets ou pics respectivement de la surface et du profil.  $z(x_{sk}, y_{sk})$  représente le sommet *k* se situant au point  $(x_s, y_s)$ . Pour les profils, la courbure est définie par l'équation (1.20) :

$$Rsc = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \left( \frac{z(x_{pk+1}) + z(x_{pk-1}) - 2 \times z(x_{pk})}{dx^2} \right)$$
(1.20)

 $z(x_{pk})$  représente le pic k se situant au point $(x_p)$ .

La densité des sommets (Sds) pour les surfaces, elle est donnée par l'équation (1.21) :

$$Sds = \frac{Nombre \, de \, sommets}{(nx-1) \times (ny-1) \times dx \times dy}$$
(1.21)

Pour les profils, elle est donnée par l'équation (1.22):

$$Rds = \frac{Nombre \, de \, pics}{(nx-1) \times dx} \tag{1.22}$$

La dimension fractale (Sfd pour les surfaces et Rfd pour les profils) est un nombre sans dimension qui représente la complexité d'une surface. Il a été prouvé dans la littérature que les surfaces de texture ont des propriétés fractales [66]. La dimension fractale est basée sur l'auto-affinité. Comme décrit dans [66], un profil z(x) est auto-affine s'il est invariant statistiquement sous la condition définie par l'équation (1.23) :

$$\begin{cases} x \to \lambda \times x \\ z(x) \to \mu \times z(x) \end{cases}$$
(1.23)

Selon les propriétés des groupes,  $\mu$  doit être une fonction homogène de  $\lambda$ . Ainsi, un indice d'homogénéité H peut être défini par l'équation (1.24) :

$$\mu = \lambda^H \tag{1.24}$$

*H* représente l'indice de rugosité de Hurst ou l'exposant de Hölder. Il varie entre 0 et 1. La dimension fractale est alors définie par l'équation (1.25) [67]:

$$Rfd = 2 - H$$

$$Sfd = 3 - H$$
(1.25)

La méthode de détermination de cette dimension fractale est définie dans [68, 69].

Pour les profils, chaque profil de longueur  $lx = nx \times dx$  est divisé en *n* segments  $lxn = \frac{lx}{n}$  en commençant par la position x = 0. Compte-tenu de l'échantillonnage de la mesure, les segments plus grands que  $\frac{lx}{2}$  ne sont pas considérés. Sur chaque segment, la variance  $\sigma^2$  de la hauteur est calculée. L'exposant de Hurst est calculé en déterminant la pente de la courbe  $log(\sigma^2)(log(lxn))$  tracée sur une échelle logarithmique.

Pour les surfaces, chaque surface de taille  $lx \times ly$  est divisée en petites fenêtres carrées de taille  $\lambda x \times \lambda y$  avec  $\lambda x = \frac{lx}{n}$  et  $\lambda y = \frac{ly}{n}$  avec n > 2. Sur chaque fenêtre, la variance de la hauteur  $\sigma^2$  est aussi calculée. L'exposant de Hurst est la pente de la courbe en logarithme reliant la variance et la taille des fenêtres.

Les paramètres de volume sont déterminés à partir de la courbe d'Abott-Firestone qui représente la distribution statistique des profondeurs des points de la surface ou du profil. Il s'agit du volume de matière des sommets Vmp et de la hauteur des pics Rpk pour les profils. La Figure 1.19 et la Figure 1.20 montre la détermination du Vmp et du Rpk.



Figure 1.20 : Détermination du Rpk [70]

La version 7 du logiciel MountainsMap sera utilisée pour déterminer ces paramètres.

Les méthodes standards de caractérisation de la texture aboutissent à des paramètres statistiques qui sont étroitement liés à l'échantillonnage et à la résolution des instruments de mesure [71]. Ces méthodes donnent des valeurs moyennées de la texture de surface. Dans la méthode de calcul de ces paramètres, tous les sommets et/ou tous les points de la surface sont considérés. En réalité, le contact pneu/chaussée n'est pas établi sur toute la surface de la route. De plus, plusieurs longueurs
d'ondes (largeur moyenne des irrégularités) interviennent dans ce contact et cette caractérisation standard de la texture ne permet pas de tenir compte de ces aspects. Ils existent des méthodes de caractérisation morphologique qui permettent de répondre à une partie de ces aspects.

#### Paramètres morphologiques

Ces méthodes sont axées sur la description de la forme de la texture et sont donc semblables aux paramètres de texture hybride. L'intérêt de ces dernières se trouve dans le fait qu'elles permettent de tenir compte du fait que le contact pneu/chaussée ne se fait pas en tous les points de la surface. Des critères de sélection des points sont définis pour ces méthodes.

En exemple, nous pouvons citer la méthode des indenteurs (confère Figure 1.10). Cette méthode définit les paramètres de forme  $\alpha$ , le relief représenté par l'angle  $\theta$  et la longueur de base de l'indenteur 2L [4].

Une autre description semblable à celle des indenteurs est celle des motifs [72]. [72] définit un motif comme la partie comprise entre deux pics. Il est caractérisé par les deux pics  $H_1$  et  $H_2$  par rapport au creux entre les deux. La profondeur caractéristique *T* du motif est la plus petite de ces profondeurs. La profondeur moyenne  $R_i$ , est la moyenne de  $H_1$  et  $H_2$ .  $AR_i$  est la distance entre les pics et est la largeur du motif.



Figure 1.21 : Motif [72]

[72] définit les méthodes de détermination et de combinaison des motifs. La texture est évaluée sur le profil obtenu après la détermination des motifs, le profil de rugosité. Un profil d'ondulation est aussi déterminé en reliant les sommets du profil de rugosité. Cette méthode a été étendue aux surfaces [73, 74].

Cependant, les critères de détection des motifs et des indenteurs entrainent la suppression de certains pics dont le rôle n'est pas clairement connu. Ainsi, l'utilisation des méthodes permettant une description multiéchelle plus précise de la rugosité est nécessaire.

## 1.2.3. Caractérisation multiéchelle de la texture

C'est l'étude de la topographie à différentes échelles d'observation. L'échelle est considérée comme la fréquence spatiale ou la longueur d'onde.

#### échelle ou longueur d'onde



Figure 1.22 : Définition de l'échelle

L'échelle représente dans le domaine routier la taille des irrégularités au-dessus des granulats utilisés dans la formulation des chaussées.

Il existe plusieurs méthodes d'analyse multiéchelle. Nous pouvons citer la transformée de Fourier (TF), la transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG), la décomposition modale empirique, l'analyse fractale [75, 76].

Pour un signal z(x), la transformée de Fourier  $\hat{z}$  est définie par l'équation (1.26) :

$$\hat{z} = \int_{-\infty}^{+\infty} z(x) e^{2i\pi f x} dx$$
(1.26)

*f* représente la fréquence. La transformée de Fourier présente un défaut de localisation spatiale des différentes fréquences de texture. Cela soulève les problèmes de fidélité de représentation des amplitudes des échelles du signal de texture.

La transformée de Fourier à fenêtre glissante tente de résoudre ce problème en permettant une analyse espace-fréquence. Elle a été introduite par le Physicien D. Gabor. Une fonction fenêtre g(x) est définie et le signal est décomposé suivant une famille de fonction  $g_{a,b}$  dérivant de la fonction fenêtre par translation spatiale (par le paramètre *b*) et par modulation (par le paramètre *a*). Cette méthode permet à la fois une localisation spatiale et fréquentielle du signal. Mais cette localisation est limitée par l'incertitude d'Heisenberg. En effet, l'amélioration de la résolution fréquentielle n'est possible qu'au détriment de celle spatiale et vice versa. Pour optimiser ces deux résolutions, Gabor a choisi comme fonction « fenêtre » le signal gaussien. L'inconvénient est qu'une fois la fonction *g* choisie, les résolutions données par *a* et *b* sont fixes. Ainsi, toutes les échelles de texture ne pourront pas être représentées. Cette méthode n'est donc pas adaptée à l'analyse multiéchelle de la topographie de surface.

L'analyse fractale et la décomposition modale empirique s'heurtent aussi à ce problème de résolution spatiale et de discrétisation des échelles de texture.

Pour résoudre ces problèmes, Morlet, en partant de la transformée de Gabor, a défini une fonction fenêtre (fonction ondelette, ondelette mère)  $\psi$  dont la famille de fonctions n'est pas obtenue par translation et modulation, mais plutôt par translation (paramètre *b*) et dilatation ou contraction (changement d'échelle, paramètre *a*). Il s'agit de la transformée en ondelettes continues (TOC) [76–78]. Grâce à la fidélité de la représentation des amplitudes des échelles, cette méthode est déjà beaucoup utilisée en archéologie pour l'étude de l'usure et la reconnaissance des procédés de fabrication, en industrie pour les finitions de surfaces, en métrologie et en traitement de signal [22–24, 24, 25, 27, 79] pour les compressions de signaux et l'interprétation automatique des électrocardiogrammes et la détection des défauts dans les structures. Dans l'application à l'adhérence c'est la transformée en ondelettes discrètes qui a été utilisée par [80–82] pour étudier la variation de la macrotexture au cours du temps. Cependant, c'est la transformée en ondelettes continues qui est la plus adaptée pour l'analyse de la microtexture due à une discrétisation plus fine des échelles de texture. Cette discrétisation fine permet de représenter les différentes irrégularités de la microtexture qui sont plus petites et plus denses que dans le cas de la macrotexture.

Avec la fonction définie par Morlet, l'analyse est basée sur l'utilisation des fenêtres de tailles variables. Ceci permet une bonne résolution spatiale et fréquentielle. En effet, le pavage du plan espace-échelle n'est pas régulier comme dans le cas de Fourier. La Figure 1.23 montre la différence de pavage entre ces deux méthodes.



Figure 1.23 : Comparaison entre le pavage espace-fréquence entre la TFFG et la TOC

Sur la Figure 1.23, le pavage du plan espace-échelle dans le cas de la transformée en ondelettes continues permet d'avoir une résolution spatiale plus importante pour les hautes fréquences (petites échelles) que pour les basses fréquences (grandes échelles). Inversement, on obtient une résolution fréquentielle plus importante pour les basses fréquences que pour les hautes fréquences. Ainsi, l'analyse espace-échelle à base d'ondelettes est mieux adaptée à l'analyse de la topographie de surface. Cette décomposition multiéchelle peut être faite sur des profils ou sur des surfaces.

#### Ondelettes 1D (profils)

Pour les profils de texture, on parle d'une décomposition en 1D. Supposons un profil de texture défini par la fonction z(x) en des points de l'espace x. L'ondelette mère est définie par la fonction $\psi(x)$ . 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 (1.27) :

$$\psi_{b,a}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi(\frac{x-b}{a}) \tag{1.27}$$

La fonction d'ondelette doit être carrée intégrable  $\psi(b, a) \epsilon L^2(\Re)$ . Elle doit aussi avoir une énergie finie. Ce sont les conditions d'admissibilité. La Figure 1.24 présente la variation d'échelle (dilatation : des petites aux grandes échelles, ou contraction : des grandes aux petites échelles) pour une ondelette.



Figure 1.24 : Exemple d'ondelette de Morlet

Les fonctions d'ondelettes sont de plus en plus étendues quand l'échelle d'analyse devient de plus en plus grande. Elles peuvent être considérées comme des microscopes mathématiques dont la résolution varie avec l'échelle d'observation.

La transformée en ondelettes continues est définie par l'équation (1.28) :

$$W_{b,a}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} z(x)\psi^*(\frac{x-b}{a})dx = z(x)\otimes\psi^*(-\frac{x}{a})$$
(1.28)

 $\psi^*$  représente le conjugué de  $\psi$ . Il s'agit d'une convolution entre le signal de texture et l'ondelette fille. Cette opération mathématique peut être effectuée plus rapidement dans le domaine fréquentiel en utilisant la transformée de Fourier. Dans l'espace de Fourier, la convolution correspond à un simple produit entre la transformée de Fourier du signal de texture et la transformée de Fourier de l'ondelette fille. Cela est illustré par l'équation (1.29):

$$W_{b,a}(x) = \hat{z}(x) \times \frac{1}{a} \psi^*(-\frac{x}{a})$$
 (1.29)

 $\hat{\psi}$  représente la transformée de Fourier de  $\psi$ . Les ondelettes filles sont normalisées à chaque échelle pour pouvoir permettre de faire des comparaisons entre différentes échelles. Dans l'espace de Fourier, l'ondelette normalisée est donnée par l'équation (1.30) [83] :

$$\psi(a \times \omega_k) = \sqrt{\left(\frac{2 \times \pi \times a}{dx}\right)} \psi_0(a \times \omega_k) \tag{1.30}$$

 $\psi_0$  représente l'ondelette non normalisée.  $\omega_k$  représente la  $k_{i \wr m e}$  fréquence angulaire dans l'espace de Fourier. dx représente le pas de mesure. Les fréquences angulaires sont définies par l'équation (1.31) [83] :

$$\omega_{k} = \begin{cases} \frac{2 \times \pi \times k}{nx \times dx} : k \le nx/2 \\ -\frac{2 \times \pi \times k}{nx \times dx} : k > nx/2 \end{cases}$$
(1.31)

nx représente le nombre de points mesurés. Les échelles sont discrétisées selon l'équation (1.32) :

$$a_j = a_0 \times 2^{j \times dj}, j = 1,..,J$$
 (1.32)

 $a_0$  correspond à l'échelle minimale de la décomposition et est égale à  $a_0 = 2 \times dx$ . *j* correspond à l'indice d'échelle et *J* correspond au nombre d'échelles de la décomposition. *dj* correspond au pas de discrétisation des échelles. Pour l'ondelette de Morlet, la valeur optimale de *dj* est de 0,5 [83]. Pour les autres ondelettes, une valeur plus grande de *dj* n'influencera pas le résultat de la décomposition [83]. Le nombre d'échelles de la décomposition est déterminé par l'équation (1.33) :

$$J = \left(\frac{1}{dj}\right) \log_2\left(\frac{a_{max}}{a_0}\right), a_{max} = nx \times dx$$
(1.33)

 $a_{max}$  correspond à l'échelle maximale de la décomposition qui est la longueur du profil. La transformée en ondelettes continues est finalement définie par l'équation (1.34) :

$$W_n(a) = TF^{-1}(\sum_{k=0}^n \hat{x}_k \hat{\psi}^*(a \times \omega_k) e^{i \times \omega_{k\times} n \times \delta t})$$
(1.34)

 $TF^{-1}$  représente la transformée inverse de Fourier. *n* représente la position à laquelle elle est évaluée.

Si la condition d'admissibilité est respectée, il est possible de faire une transformée inverse d'ondelette (ITOC) pour reconstruire le signal d'origine et effectuer une décomposition multiéchelle de ce signal. Une des possibilités de reconstruction est l'utilisation de la fonction Delta ( $\delta$ ). Un paramètre de normalisation  $C_{\delta}$ , basé sur sa transformée en ondelettes est défini par l'équation (1.35) :

$$C_{\delta} = \frac{dj \times dx^{1/2}}{\psi_0(0)} \sum_{j=0}^{J} \frac{\Re\left\{W_{\delta}\left(a_j\right)\right\}}{a_j^{1/2}}, W_{\delta}\left(a\right) = \left(\frac{1}{nx}\right) \sum_{k=0}^{N-1} \hat{\psi}^*\left(a \times \omega_k\right)$$
(1.35)

R désigne la partie réelle de la transformée en ondelettes continues. La reconstruction multiéchelle du signal d'origine est définie par l'équation (1.36) :

$$z(x) = \sum_{j=1}^{J} z(x)_{j,n}, z(x)_{j,n} = \frac{dj \times dt^{1/2}}{C_{\delta} \times \psi_0(0)} \frac{\Re \{W_{j,n}(a_j)\}}{a_j^{1/2}}$$
(1.36)

 $z(x)_{j,n}$  représente la décomposition du signal de texture à l'échelle j à la position n.

Une des difficultés de cette méthode de décomposition multiéchelle est la sélection de l'ondelette adaptée à l'étude. Les études de [84, 85] recommandent l'utilisation de l'ondelette de Morlet pour l'étude de la texture. Sa formule non normalisée est donnée par l'équation (1.37) [83] :

$$\psi_0(x) = \pi^{-1/4} e^{i \times \omega_0 \times x} e^{-x^2/2}$$
(1.37)

 $\omega_0$  est choisi égal à 6 [83] pour vérifier la condition d'admissibilité. La Figure 1.25 donne un exemple de décomposition multiéchelle d'un profil de texture.



Figure 1.25 : Exemple de décomposition multiéchelle d'un signal de texture avec l'ondelette de Morlet Nous remarquons des longueurs d'ondes plus petites pour les petites échelles et grandes pour les grandes échelles de texture. La reconstruction du profil d'origine est représentée sur la Figure 1.26.



Figure 1.26 : Reconstruction du profil d'origine

L'erreur relative commise sur le calcul du Rq sur le profil reconstruit par rapport au profil original est utilisée pour vérifier la fidélité de la décomposition multiéchelle. Nous avons une bonne reconstruction avec une erreur de reconstruction faible de 2%. Ainsi, la décomposition multiéchelle permet de représenter fidèlement les amplitudes des différentes échelles de texture. Des paramètres de texture pourront être calculés sur les profils à différentes échelles.

#### Ondelettes 2D (surfaces)

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 (1.38) :

$$\psi(bx, by, ax, ay) = \frac{1}{\sqrt{ax \times ay}} \psi\left(\frac{x - bx}{ax}, \frac{y - by}{ay}\right)$$
(1.38)

*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. Les mêmes conditions d'admissibilité sont définies qu'en 1D. La transformée en ondelettes continues de la surface est définie par l'équation (1.39) :

$$W_{bx,by,a}(x,y) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} z(x,y) \psi^*(\frac{x-bx}{a},\frac{y-by}{a}) dx dy$$
(1.39)

La transformée inverse en ondelette est alors définie par l'équation (1.40) :

$$z(x,y) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_{bx,by,a}(x,y) \psi(\frac{x-bx}{a},\frac{y-by}{a}) \frac{da^2 dbx dby}{a^2}$$
(1.40)

 $C_g$  représente le coefficient de normalisation. La mise en œuvre numérique de cette méthode est faite en suivant l'algorithme défini dans l'étude de [76]. La transformée inverse est faite en utilisant une ondelette duale obtenue à partir de l'ondelette fille. Cette ondelette fille inverse est donnée par l'équation (1.41) :

$$\tilde{\psi}(\frac{x}{ax},\frac{y}{ay}) = \frac{1}{K_{\psi}}\psi(\frac{x}{ax},\frac{y}{ay}), K_{\psi} = \sum_{aj=a\min}^{a\max} \left| \frac{\psi(\frac{x}{ax},\frac{y}{ay})}{aj} \right|$$
(1.41)

La Figure 1.27 donne l'algorithme de calcul de la transformée en ondelettes continues (TOC) en 2D.



Figure 1.27 : Transformée en ondelettes continues 2D

La Figure 1.28 donne l'algorithme de calcul de la transformée inverse en ondelettes continues (ITOC). Elle est basée sur l'utilisation de l'ondelette duale. Cette décomposition inverse permet de faire la décomposition multiéchelle de la surface de départ.



Figure 1.28 : Transformée inverse en ondelettes continues 2D

Pour retrouver la surface de départ, une somme de la décomposition à chaque échelle est faite. Pour le choix de l'ondelette mère à utiliser, [86] a trouvé que l'utilisation d'une fonction ondelette suffisamment compacte permettait de capturer les détails fins de la texture. [87] a utilisé l'ondelette du « chapeau mexicain-2D » pour l'analyse des signaux bidimensionnels, l'analyse statistique des textures et des singularités de la topographie. C'est une ondelette symétrique bien localisée dans le domaine spatial et fréquentiel. Son expression est donnée par l'équation (1.42) :

$$\psi(x, y) = (2 - r)\exp(-\frac{r}{2}), r = x^2 + y^2$$
 (1.42)

La Figure 1.29 donne la représentation de cette ondelette pour deux échelles différentes.



Figure 1.29 : Ondelette du chapeau mexicain

Cette ondelette a été utilisée pour faire la décomposition multiéchelle d'une surface de mosaïque de granulats. Les surfaces initiale et reconstruite basée sur la décomposition multiéchelle sont représentées sur la Figure 1.30.



Figure 1.30 : Reconstruction de la surface initiale

L'erreur relative commise sur le calcul du Sq sur la surface reconstruite par rapport à la surface initiale est utilisée pour vérifier la fidélité de la décomposition multiéchelle. L'erreur de reconstruction est de 0,2 % prouvant la fidélité de la décomposition multiéchelle. L'exemple de la décomposition pour six échelles de texture est donné sur la Figure 1.31.



Figure 1.31 : Exemple de décomposition multiéchelle de surface

Des paramètres de texture pourront être calculés à différentes échelles et leurs évolutions avec le polissage seront analysées.

## 1.3. Synthèse

Cette revue de la littérature fait un résumé, certes non-exhaustif mais suffisamment complet, de différents travaux réalisés sur la compréhension de l'adhérence et de son évolution avec le temps.

Elle détaille les mécanismes à la base de la génération de l'adhérence pneu/chaussée : l'indentation qui résulte de la déformation de la gomme du pneu par les aspérités de la chaussée et l'adhésion qui résulte des forces intermoléculaires à l'interface gomme/chaussée. L'adhésion est grande quand les surfaces en contact sont globalement planes et propres. Due à l'état très rugueux des chaussées, la part d'adhésion dans l'adhérence globale d'un couple gomme/chaussée est très faible.

Cette revue permet de dire que l'évolution de l'adhérence avec le temps est grandement liée à l'évolution de la texture de la chaussée, à l'état de la chaussée (propre, mouillée) et à la vitesse. Parmi ces facteurs, la texture de la chaussée est celle qui joue le plus grand rôle sur le niveau d'adhérence. En effet, ce sont les aspérités de la route qui provoquent la déformation de la gomme et ainsi une perte d'énergie par déformation. Le polissage de la chaussée par le trafic entraine la suppression des aspérités pointues au-dessus de la surface de la chaussée. Cette suppression limite la déformation de la gomme du pneu et induit ainsi une diminution de l'adhérence. La présence d'eau ou de contaminants peut aussi entrainer le masquage de ces aspérités ou jouer le rôle de lubrifiant entrainant aussi une diminution de l'adhérence. Notre étude se focalisera sur l'influence de la texture sur le niveau d'adhérence et son évolution avec le temps.

Dans la littérature routière, la texture est généralement divisée en deux échelles, la macrotexture et la microtexture. La microtexture est l'échelle de texture qui permet d'avoir des fortes pressions de contact entre le pneu et la chaussée et ainsi une bonne adhérence. La macrotexture permet d'avoir un bon niveau d'adhérence à grande vitesse et en présence d'eau. Cependant, cette division en deux échelles ne permet pas d'expliquer clairement l'évolution de l'adhérence avec le polissage. Cela est dû au fait que la texture est formée de plusieurs échelles de texture superposées les unes sur les autres. Cette division en deux gammes d'échelles est insuffisante pour analyser les variations de ces échelles avec le polissage.

Des méthodes de description multiéchelle comme celle des motifs ou des indenteurs ont montré

l'intérêt d'une considération multiéchelle dans l'analyse de l'effet de la texture sur le polissage. Ces méthodes sont limitées par la définition des échelles de décomposition et dans la précision des décompositions. Une adaptation de la méthode de décomposition multiéchelle à base d'ondelettes continues à la problématique routière permettra de compléter ces méthodes multiéchelles.

Cette revue montre l'importance d'utiliser des modèles de contact surfacique pour une bonne estimation de l'adhérence. Ces derniers permettent de prendre en compte l'interaction entre les différentes aspérités sur la déformation de la gomme du pneu. L'utilisation d'un modèle semianalytique basé sur la théorie de l'espace semi-infini viscoélastique est préconisée. Ce dernier permet des calculs rapides comparés aux modèles éléments finis compte-tenu de la rugosité très grande des chaussées.

## 2. Méthodologie

Ce chapitre détaille la méthodologie adoptée dans cette thèse. La première partie rappelle les objectifs de la thèse et la seconde la démarche adoptée.

## 2.1. Objectifs

L'étude bibliographique a permis d'identifier certaines limites et des manques concernant le rôle des différentes échelles de texture sur l'adhérence.

L'objectif de ces travaux de recherche est donc de mettre au point une méthode d'analyse multiéchelle permettant d'étudier le rôle des échelles de texture de la chaussée sur l'adhérence et son évolution avec le polissage. La finalité est son intégration dans un système d'optimisation permettant d'améliorer l'adhérence des chaussées en commun avec les autres mécanismes du contact pneu/chaussée (résistance au roulement, bruit de roulement, ...).

Le premier objectif sera le choix de la méthode de décomposition multiéchelle. La revue de la littérature a permis de montrer que la méthode de décomposition multiéchelle à base d'ondelettes continues permettait une discrétisation fine des échelles et une fidélité dans la représentation des amplitudes des échelles. Elle est adaptée à l'étude de la texture notamment de la microtexture. Un point important concernant cette méthode à savoir le choix des ondelettes d'analyse en 1D et 2D a été éclairci. L'ondelette de Morlet est conseillée en 1D et la version isotrope de l'ondelette du chapeau mexicain est conseillée en 2D.

Le deuxième objectif est de définir, à partir de la décomposition multiéchelle, les paramètres de texture multiéchelles pertinent permettant de décrire la variation de la texture en rapport avec le polissage et l'adhérence. Ceci passe par l'analyse de l'évolution des paramètres de texture standards à chaque échelle avec le polissage. Des corrélations entre ces paramètres multiéchelles et l'adhérence permettront d'évaluer qualitativement le poids de chaque échelle de texture sur l'adhérence.

Le dernier objectif est l'intégration de cette méthode de décomposition dans un modèle physique de contact. Pour ce faire, il sera développé une modélisation physique de l'adhérence. Ce modèle est appliqué à chaque échelle de texture dans l'optique d'évaluer quantitativement le poids de chaque échelle de texture sur l'adhérence.

## 2.2. Démarche

Pour remplir les objectifs définis, une démarche expérimentale et numérique est adoptée.

La démarche expérimentale vise à analyser le lien entre l'adhérence et les paramètres de texture. Il s'agit de déterminer en laboratoire des paramètres de texture pertinents afin de mieux comprendre les niveaux d'adhérence ainsi que leurs évolutions dans le temps. Ainsi, trois enjeux important se dessinent : la mesure de l'adhérence, le polissage des échantillons et la mesure de leurs textures.

Les essais sont d'abord réalisés sur des mosaïques de granulats créées en laboratoire. Ces mosaïques ont la même macrotexture mais une microtexture différente. Ceci permet d'analyser uniquement le rôle de la microtexture et de s'affranchir de l'effet du liant bitumineux. Ensuite, des échantillons d'enrobées bitumineux semblables à ceux utilisés sur les réseaux routiers sont testés. Ces échantillons ont des compositions variables en termes de taille et type de granulats. Ceci permet d'avoir une grande variété de texture et renforce l'analyse texture-adhérence.

Les essais de polissage et de mesure d'adhérence sont réalisés grâce à la machine Wehner&Schulze qui permet de reproduire l'effet du trafic. Entre chaque phase de polissage et de mesure de frottement, l'état de la surface des échantillons est cartographié grâce au capteur Infinite Focus de l'Alicona. Une

étude préalable est faite pour sélectionner les grossissements adéquats de cartographie.

La démarche numérique a pour objectif l'analyse des résultats expérimentaux, le développement de la méthode de décomposition multiéchelle et la modélisation multiéchelle du contact.

L'évolution de l'adhérence en fonction du polissage est analysée et comparée à celle de l'évolution des paramètres de texture standards. Cette comparaison est aussi faite avec les résultats de la littérature. Ceci nous permet de dégager les paramètres présentant la plus grande corrélation avec l'adhérence et le polissage.

Une décomposition multiéchelle à base d'ondelettes continues est faite sur les cartographies aux différents états de polissage. Des paramètres de texture standards sont calculés à chaque échelle. Leurs évolutions avec le polissage sont analysées. Ceci nous permet de sélectionner les paramètres de texture les plus discriminants et la gamme d'échelle de texture la plus influente.

Ensuite, une modélisation multiéchelle de l'adhérence est proposée. Le modèle de contact utilisé prend comme paramètres d'entrée, la cartographie de la surface, les propriétés de la gomme ainsi que la vitesse. Ainsi, une caractérisation viscoélastique de la gomme est faite. Des résultats d'une analyse mécanique dynamique (Dynamic mechanical analysis) faite à différentes fréquences et différentes températures sur un échantillon de la gomme de la machine Wehner et Schulze sont exploités. Ceci nous permet d'avoir la fonction de relaxation et de complaisance de la gomme. Ces résultats sont introduits dans le modèle de contact. Ce dernier est d'abord appliqué sur des surfaces contrôlées, générées numériquement. La microtexture ainsi que la macrotexture et la dimension fractale sont les paramètres variés. Ceci permet dans un premier temps d'étudier d'une manière contrôlée l'effet des différentes échelles sur le contact. Le modèle est ensuite appliqué à des surfaces réelles nous permettant d'estimer l'adhérence correspondant à chaque surface. L'adhérence trouvée est comparée aux résultats expérimentaux pour valider le modèle.

Pour finir, le modèle est appliqué aux résultats de la décomposition multiéchelle. Le poids de chaque échelle est alors quantifié et l'évolution de l'adhérence multiéchelle est comparée à l'évolution des paramètres multiéchelles sélectionnées.

Pour valider ce modèle multiéchelle, deux méthodes de calcul de l'adhérence globale sont testées. La première repose sur la somme des adhérences multiéchelles et la deuxième sur la pondération en fonction du poids des échelles. Ces frottements globaux sont comparés au frottement mesuré. Cela permet de choisir la meilleure méthode de sommation et de valider le modèle d'adhérence multiéchelle.

## 3. Etude expérimentale

Ce chapitre présente l'étude expérimentale qui est faite dans le cadre de cette thèse. L'objectif de cette étude expérimentale est de déterminer le lien entre la texture et l'adhérence ainsi que l'évolution de cette dernière avec le polissage. Dans ce chapitre, les différents échantillons utilisés, les machines ainsi que les protocoles de mesures sont présentés. L'analyse des résultats obtenus est faite et des liens entre l'adhérence et la texture sont déterminés.

## 3.1. Echantillons

Des échantillons de mosaïques de granulats ayant la même macrotexture et une microtexture variable sont testés. Ceci permet d'analyser uniquement la microtexture et de s'affranchir de l'effet du liant bitumineux. Cette thèse faisant partie du projet I-STREET dont l'objectif est de mettre au point de nouvelles chaussée intelligente et écologique, des formulations de chaussée réalisées par Eiffage dans le cadre du projet sont testées dans notre étude.

#### Mosaïques de granulats

Le choix des matériaux est fait de manière à avoir une grande étendue des valeurs d'adhérence et une variabilité de la microtexture. Quarte mosaïques ayant déjà fait l'objet d'une étude antérieure sont choisies. En addition, une mosaïque réalisée avec les granulats du projet I-Street est faite en laboratoire. 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. Ceci permet au final d'avoir globalement la même macrotexture sur les mosaïques. Ainsi, seule la microtexture est variable. La Figure 3.1 illustre le choix des gravillons.



Figure 3.1 : Sélection des gravillons

Une fois les gravillons choisis, ils sont placés manuellement dans un moule. Ils le sont 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. Cinq mosaïques dénommées S1, S2, S3, S4 et S5 sont analysées dans notre étude.

Le granulat utilisé pour la mosaïque S1 est le granodiorite, une roche magmatique composée principalement de quartz et de feldspaths (moins dur que le quartz). Il a un PSV [88] de 58 ( $\pm$ 4). 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.

La formule S2 est faite de calcaire dur avec un PSV de 52 ( $\pm$ 4). Le calcaire est une roche monominéral constitué de calcite moins dur que le feldspath et le quartz.

Les formules S3 et S4 sont aussi constituées de calcaire, mais avec un PSV faible comparé aux

formules S1 et S2. La formule S3 a un PSV de 36 ( $\pm$ 3)et la formule S4 un PSV de 35 ( $\pm$ 4).

La formule S5 est celle fabriquée à partir des granulats du projet I-STREET. Elle est constituée de grès quartzitique avec un PSV de 52 ( $\pm$ 4). Le grès utilisé est constitué de quartz, feldspaths et de silice.

Mosaïques	Type de Granulats 6/10
S1	Granodiorite
S2	Calcaire dur
S3	Calcaire
S4	Calcaire
S5 (I-STREET)	Grès quartzitique Boitron

Le Tableau 3.1 donne la nature des granulats utilisée pour les mosaïques.

Tableau 3.1 : Echantillons de mosaïques de granulats

La Figure 3.2 montre les échantillons de mosaïques de granulats.



Figure 3.2 : Echantillons de mosaïques de granulats

Le choix des granulats dans la fabrication des mosaïques permet d'avoir des textures de surface variables.

#### Echantillons d'enrobés bitumineux

Les échantillons d'enrobés bitumineux choisis offrent une variété de composition quant à la taille et aux pourcentages des gravillons, du sable et du filler utilisés dans leur formulation. Cela permet d'avoir une variété de textures et de coefficients de frottement.

Les enrobés bitumineux sont constitués de gravillons de plusieurs tailles, de sable, de filler et de bitume qui constitue le liant. Les gravillons de taille 6/10 et 4/6 utilisés dans les formulations sont du grès quartzitique. Les gravillons 1/2 utilisés sont du granite. Le filler utilisé est du calcaire. Deux types de bitume ont été utilisés, le bitume 35/50 BP Lavéra et un bitume modifié Biprène 83. Le Tableau 3.2 résume les compositions des différents échantillons d'enrobés. Huit échantillons d'enrobés sont testés et dénommés respectivement F1, F2, F3, F4, F4 bis, F5, F6 et F7 [89, 90].

	Formules	F1	F2	F3	F4	F4 bis	F5	F6	F7			
	Composants	Composition en %										
	Gravillon 6/10 grès quartzitique Boitron	0	0	0	32,2	32	71,3	73,6	45			
	Gravillon 4/6 grès quartzitique Boitron	72,8	73,2	74,7	31	30,6	0	0	15,2			
Granulats	Gravillon 1/2 Parigny	9	16	0	0	0	17	0	0			
	Sable 0/2 micro granitique Corbigny	9	0	17,5	28,8	29	0	17,8	31,8			
	Filler calcaire G100 Saint-Hilaire-de-Bens	3,9	5,5	2,4	2,6	3	6,4	3,3	2,6			
Liente	Biprène 83 – ALE Collonges	5,3	5,3	5,4	0	5,4	5,3	5,3	5,4			
Liants	Bitume 35/50 BP Lavéra	0	0	0	5,4	0	0	0	0			

Tableau	32.	Echantillons	d'enrobés	hitumineux
labieau	0.2.		u enilopes	Dituititieux

Ces huit échantillons peuvent être comparés aux BBTM (Béton Bitumineux Très Mince) (F1, F2, F3, F5 et F6) et BBSG (Béton Bitumineux Semi-Grenu) (F4, F4 bis et F7) classiques rencontrés dans le milieu routier. La Figure 3.3, montre l'aspect de ces échantillons.



Figure 3.3 : Echantillons d'enrobés bitumineux

Sur la Figure 3.3, nous remarquons que le choix de composition des échantillons permet d'avoir une variété de textures. Ceci permettra de renforcer l'analyse texture-adhérence.

## 3.2. Appareils et protocoles de mesure

Les problématiques de cette étude expérimentale sont le polissage, 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.

[10] ont défini une procédure d'essai pour pouvoir obtenir toute la courbe d'adhérence et la texture correspondante. La procédure est divisée en cinq étapes :

- Etape 1 : caractérisation à l'état initial. Au cours de cette étape, la texture initiale et le frottement initial sont mesurés.
- Etape 2 : polissage jusqu'à l'obtention de l'adhérence maximale. Dans cette étape, des phases de polissage et de mesure de frottement se succèdent. Tous les 1 000 passages de polissage, le frottement est mesuré.
- Etape 3 : dans cette étape, la microtexture est mesurée une fois que le frottement commence à décroître. Cette étape n'est pas nécessaire pour les mosaïques de granulats.
- Etape 4 : poursuite du polissage et arrêts à 10 000, 20 000, 50 000 et 90 000 passages pour la mesure du frottement. La microtexture est mesurée en 3D à 90 000 rotations.
- Etape 5 : poursuite du polissage jusqu'à 180 000 passages. A la fin du polissage, la microtexture est mesurée en 3D.

Cette procédure est utilisée dans le cadre de notre étude. Le Tableau 3.3 résume les étapes de polissage auxquelles sont faites les mesures d'adhérence pour les différents type d'échantillons.

Туре		Nombre de passages de mesure de frottement														
Enrobés	0	0 1 000 2 000 3 000 4 000 5 000 6 000 7 000 10 000 20 000 50 000 90 000 18											180 000			
Mosaïques	0	-	-	-	-	5000	-	-	10 000	20 000	50 000	90 000	180 000			

## 3.2.1. Polissage et mesure du frottement

Pour ces deux opérations, la machine Wehner&Schulze est utilisée. Elle est présentée dans la section 1.1.3. Comme défini dans la norme NF EN 12697-49 [49], les échantillons à utiliser sont des carottes de 225 mm de diamètre. La Figure 3.4 résume le processus de polissage et de mesure de l'adhérence.



Figure 3.4 : Essai de polissage et de mesure de frottement

La machine est équipée d'un dispositif de fixation permettant de maintenir fixe l'échantillon et d'assurer sa planéité durant l'essai. La Figure 3.5 illustre ce dispositif.



Figure 3.5 : Fixation de l'échantillon

Une fois fixé, l'échantillon est déplacé entre les différentes unités de polissage et de mesure de frottement.

Le polissage est fait par trois cônes en caoutchouc. Un mélange d'eau et de silice est ajouté sur l'échantillon pour servir d'abrasif. Un tour de la tête de polissage correspond à trois passages (trois cônes). Une fois terminé, un dispositif intégré à la machine permet de laver l'échantillon par projection d'eau.

La Figure 3.6 montre les échantillons d'enrobés bitumineux et la Figure 3.7, les mosaïques de granulats avant et après polissage.



Figure 3.6 : Polissage d'enrobés

Sur la Figure 3.6, nous remarquons un changement de l'état de la surface avec le polissage. Sur les

échantillons d'enrobé, nous remarquons un décapage progressif du liant bitumineux et la mise à nu des granulats.



Figure 3.7: Polissage de mosaïques

Sur la Figure 3.7, il y a une usure de la surface des mosaïques. Compte tenu de l'absence de liant à la surface, il n'y a pas de phase de décapage.

Dans l'unité de mesure de frottement, la mesure sur l'échantillon est précédée d'une mesure sur une plaque en verre de référence. Une valeur d'adhérence comprise entre 0,090 - 0,12 doit être obtenue pour commencer la mesure sur l'échantillon. La tête de mesure du frottement est équipée de trois patins en caoutchouc. Elle est accélérée électroniquement jusqu'à 100 km/h et est abaissée sur l'échantillon. A ce stage, l'accélération est arrêtée amorçant ainsi la phase de freinage. La détermination de l'adhérence se fait en laboratoire à travers le couple de freinage obtenu à 60 km/h [49].

La répétabilité de la machine a été vérifiée. La norme NF EN 12697-49 [49] définit une répétabilité de 0,026 pour les enrobés bitumineux. Ainsi, sur chaque échantillon d'enrobés bitumineux, deux mesures d'adhérence ont été faites à chaque état de polissage afin de vérifier la répétabilité de la mesure.

La première mesure a été faite sur les échantillons sans cartographie de l'état de surface. Cette première courbe permet de déterminer la position du maximum de la courbe d'évolution du frottement en fonction du nombre de cycles de polissage. La deuxième mesure a été faite avec des interruptions de mesure pour faire l'acquisition de l'état de surface de la carotte.

La Figure 3.8 montre un exemple de variation entre les deux mesures d'adhérence pour la formule F4 bis. Les barres d'erreur représentent l'erreur spécifiée dans la norme NF EN 12697-49 [49].



Figure 3.8 : Variation des mesures d'adhérence

La variation de l'adhérence pour les deux mesures est présentée en annexe A pour les autres formules. Les deux mesures pour chaque formule sont dans les limites de variabilité fixées par la norme. Pour représenter la variation entre les deux mesures de frottement, le coefficient de variation

a été utilisé. Le coefficient de variation est obtenu par l'équation (3.1) :

$$c_{\nu} = 100 \times \frac{s}{m} \tag{3.1}$$

Avec m la moyenne et s l'écart-type. C'est un coefficient sans unité représentant au mieux la dispersion des valeurs autour de la moyenne.

Pour toutes les formules, nous avons des coefficients de variation inférieurs à 10% pour tous les états de polissage. La variation moyenne des mesures est de 2%. Ces faibles variations témoignent de la répétabilité et de la justesse de l'appareil de mesure.

#### 3.2.2. Mesure de la texture

Le capteur Infinite Focus d'Alicona est utilisé. Il permet de faire une mesure optique tridimensionnelle de la texture des échantillons. L'échantillon est placé sur une table de déplacement et illuminé par un éclairage modulé. La position de chaque point de l'échantillon est déterminée par la variation du contraste. Un dispositif de fixation permet de placer l'échantillon selon un repère choisi. Un marquage au feutre indélébile est fait pour repérer les zones de cartographie. Ceci est illustré sur la Figure 3.9.



Figure 3.9 : Mesure de la texture

L'Alicona nous permet de faire la mesure de la texture à plusieurs grossissement  $2,5 \times, 5 \times, 10 \times, 20 \times$ ,  $50 \times$  et  $100 \times$ . La résolution verticale du grossissement  $2,5 \times$  est de 2300 nm. Cette résolution est trop petite pour l'étude de la microtexture. Ainsi, le premier grossissement choisi est  $5 \times$ . Ce dernier nous permet d'avoir une résolution verticale de 410 nm. Nous nous sommes limités au grossissement  $20 \times$ . En effet, la résolution verticale à ce grossissement est de 50 nm. Cette dernière est suffisante pour l'étude de la texture. Le choix de l'un de ces grossissements influe sur la qualité et le temps de la mesure de la texture.

Pour le choix des grossissements dans notre étude, nous avons analysé des résultats de mesures de texture à ces trois grossissements. Les variations de texture sur quatre zones de taille  $5 mm \times 5 mm$  sont analysées. Les différents paramètres de texture ont été comparés. Rappelons que la résolution verticale pour le grossissement  $10 \times$  est de 100 nm.

La Figure 3.10 montre la texture de la surface obtenue avec ces différents grossissements.



Figure 3.10 : Variation de la texture en fonction du grossissement, zone 1

La Figure 3.10 montre l'apparition de nouveaux détails avec l'augmentation du grossissement. Les paramètres de texture ont été comparés pour ces différents grossissements sur la Figure 3.11.



Figure 3.11 : Evolution des paramètres de texture pour différents grossissements

Sur la Figure 3.11, les différences les plus nettes entre les paramètres de textures sont observées pour le paramètre de courbure (Ssc) et la densité des pics (Sds). Ceci s'explique pour l'apparition de nouveaux détails avec l'augmentation du grossissement. Pour les trois grossissements, la différence est plus petite entre les grossissements  $5 \times$  et  $10 \times$ . La grande différence avec le grossissement  $20 \times$  s'explique d'une part par la résolution verticale plus grande, mais aussi par la probabilité plus forte de détection d'artefacts avec l'augmentation du grossissement.

Pour un même pas de mesure en *x* et en *y*, les temps de cartographie pour un échantillon de 5  $mm \times 5 mm$  sont de 2 heures, 40 minutes et 20 minutes respectivement pour les grossissements  $20 \times, 10 \times 10 \times 5 \times$ . Etant donné ces observations, un compromis a été trouvé entre le temps de cartographie et la résolution verticale (grossissement).

Pour les mosaïques de granulats, les cartographies ont été faites à un grossissement  $5 \times$  sur une zone de  $50 mm \times 20 mm$  soit une durée par cartographie de 5 heures par échantillon, avec un pas

de mesure de 1,756  $\mu$ m. Sur chaque cartographie, trois zones de 5  $mm \times 5 mm$  sont sélectionnées pour permettre de représenter globalement la microtexture des gravillons utilisés dans la fabrication des mosaïques.



Figure 3.12 : Zones de cartographie sur les échantillons de mosaïques de granulats

Sur les anciennes mosaïques (S1, S2, S3 et S4), tous les échantillons existants étaient polis jusqu'à 180 000 passages. Ainsi, seulement deux états de polissage ont été cartographiés : l'état initial et celui à 180 000 passages.

La mosaïque S5 a été fabriqué pour permettre de faire un suivi plus complet de l'évolution de la microtexture, six états de polissages ont été cartographiés : l'état initial, 5 000 passages, 10 000 passages, 20 000 passages, 90 000 passages et 180 000 passages.

Pour les échantillons en enrobés bitumineux, dues à la présence des fillers et du sable, les cartographies ont été faites au grossissement  $10 \times$  sur des zones de  $3 mm \times 3 mm$  soit une durée par cartographie de 22 minutes par zone, avec un pas de mesure de  $0,88 \mu m$ .

Sur chaque échantillon, pour représenter globalement la texture, quatre zones sont sélectionnées Etant donné la procédure d'essai définie par [10], quatre instants de cartographie ont été choisis : l'instant initial, la cartographie quand le frottement commence à décroître, la cartographie après 90 000 passages et celle après 180 000 passages.



Figure 3.13 : Zones de cartographie sur les échantillons en enrobés bitumineux

Le Tableau 3.4 donne le nombre de cartographies effectué pour chaque formule.

Formules	Nombre de zones	Taille des zones	Etats de polissage	Nombre de cartographies par formule
F1 - F7	4	3 mm × 3 mm	4	16
S1 - S4	3	5 mm × 5 mm	2	6
S5	3	5 mm × 3 mm	6	18

Tableau 3.4 : Nombre de cartographie par formule

Dans les deux cas (mosaïques de granulats et enrobés bitumineux), les zones sélectionnées sont situées au-dessus du granulat le plus grand (6/10 pour les mosaïques de granulats, 4/6 ou 6/10 pour les enrobés bitumineux).

Pour chaque formule, la taille de cartographie est plus grande en longueur et en largeur par rapport à la taille souhaitée. Ceci permet de faire un recalage dans le cas échéant des zones correspondantes aux différents états de polissage pour avoir la vraie taille désirée.

Le résultat de cartographie obtenu est la somme de la forme de la zone sélectionnée à laquelle s'ajoutent les ondulations de surfaces et pour finir la rugosité. La composante de rugosité est celle que nous cherchons à avoir. De plus, dû à l'éclairage de l'échantillon, il existe une probabilité, dans la majorité des cas très faible, d'avoir des points non mesurés et des artefacts de mesure. Ainsi, un prétraitement préalable du résultat de la cartographie est nécessaire. Le logiciel MountainsMap (version 7) est utilisé pour effectuer ces opérations.

Il permet en outre de faire plusieurs autres opérations de prétraitement : redresser la cartographie, extraire des profils ou des zones, faire la visualisation des cartographies en 3D et calculer les paramètres de texture.

La première étape de prétraitement effectuée est le rebouchage des points non mesurés. Ce rebouchage est réalisé en faisant une interpolation en considérant les points voisins à la zone non mesurée. Généralement, pour une zone de  $5 mm^2$ , pour 44 437 575 points mesurés, nous avons 681 810 points non mesurés soit 1% des points. Ainsi, le rebouchage par interpolation ne modifie pas grandement la cartographie.

Ensuite, une suppression des artefacts et des bruits de mesure est effectuée. Les artefacts sont supprimés en se basant sur les pentes locales. En effet, selon le constructeur de l'Alicona [91], la pente maximale mesurable par le capteur est de 87°. Ainsi, les points présentant une pente supérieure à cette valeur sont supprimés. Cette étape est suivie d'un rebouchage au niveau des points supprimés.

La forme générale de la zone cartographiée est ensuite supprimée en utilisant un polynôme des moindres carrés de degré 7. L'utilisation de ce degré est une recommandation du développeur de ce logiciel pour éviter les effets de bords [70].

La pente locale de la cartographie est ensuite supprimée en utilisant le plan des moindres carrés [71].

Ces étapes de prétraitement sont illustrées dans l'annexe B.1 pour la formule F6 sur la zone 1 à l'état initial.

L'évolution de la texture des mosaïques de granulats (S1) avec le polissage est représentée sur la Figure 3.14.





Pour les mosaïques de granulats, les mêmes granulats n'ont pas forcément été sélectionnés à chaque étape de polissage. L'hypothèse de la même microtexture des granulats est faite due à la sélection des granulats de même origine ayant subi les mêmes traitements. Les cartographies d'évolution de la texture pour les autres mosaïques de granulats sont présentées en annexes B.2.1 et B.2.2.

Nous remarquons la présence de la microtexture au-dessus des cailloux sélectionnés. Comme observé sur la Figure 3.7, le polissage entraine une diminution de la hauteur de la texture. La diminution de la hauteur de la texture est plus grande quand les granulats de la mosaïque sont

fragiles.

Les Figure 3.15, Figure 3.16 et Figure 3.17 montrent l'évolution de la texture d'un enrobé bitumineux (F4, F5 et F7) avec le polissage.



Figure 3.15 : Evolution de l'aspect de la formule F4 avec le polissage



Figure 3.16 : Evolution de l'aspect de la formule F5 avec le polissage



Figure 3.17 : Exemple d'évolution de la texture avec le polissage des enrobées bitumineux

Nous remarquons généralement une diminution progressive de la hauteur de la texture avec le polissage. Le décapage continu du liant bitumineux avec le polissage est remarqué sur les Figure 3.15 et Figure 3.16. Notons que ce décapage n'est pas uniforme sur toute la surface de l'échantillon. C'est une des difficultés dans l'étude de la texture des enrobés bitumineux avec le polissage.

Sur la Figure 3.17, ce décapage est représenté comme une diminution de hauteur. Cette diminution est due à l'arrachement des aspérités avec polissage. Ces débris arrachés se répartiront en deux flux : flux d'usure et flux de recirculation. Le flux d'usure est constitué des débris qui sont éjectés de l'échantillon avec le polissage. Le flux de recirculation est constitué des débris qui sont éjectés puis réinjectés sur l'échantillon [44]. Ce dernier peut alors représenter un troisième corps [92] pouvant agir comme un lubrifiant ou être compacté sur l'échantillon. Ceci explique, la légère augmentation de la hauteur à certains endroits des échantillons. Les cartographies d'évolution de la texture avec le polissage des autres formules d'enrobés bitumineux sont présentées en annexe B.2.3.

Dans les sections 3.3 et 3.4, cette analyse est complétée par l'analyse des courbes d'adhérence et des paramètres de texture avec le polissage.

## 3.3. Analyse des essais Wehner et Schulze

Dans cette partie, les courbes d'adhérence en fonction du polissage sont analysées pour les enrobés bitumineux et les mosaïques de granulats. L'effet de la composition et de l'origine des granulats sur cette évolution est étudié.

# 3.3.1. Evolution de l'adhérence en fonction du polissage des mosaïques de granulats

La Figure 3.18 montre l'évolution de l'adhérence en fonction du polissage des échantillons de mosaïques de granulats. Les barres d'erreur correspondent aux coefficients de variation des deux mesures effectuées pour chaque formule.



Figure 3.18 : Evolution de l'adhérence pour les mosaïques de granulats

Nous notons une diminution de l'adhérence avec le polissage pour toutes les formules. Le Tableau 3.5 donne le nombre de passages correspondant au maximum d'adhérence pour toutes les mosaïques.

rabieda 6.6 : Maximum a adherence des mosarques de grandidis														
Formules	S1	S2	S3	S4	S5									
Nombre de passages	0	0	0	0	0									

0.44

0.36

0.37

0.57

0.54

Valeurs

Tableau 3.5 : Maximum d'adhérence des mosaïques de granulats

Le maximum d'adhérence est obtenu à l'état initial pour toutes les formules. Cette valeur dépend de la dureté des granulats. Il en est de même de la réduction de l'adhérence avec le polissage. Elle est plus grande quand le granulat de base est fragile (entre S1 et S3 ou S4).

Cette réduction peut être séparée en deux phases : entre 0 et 5 000 passages et entre 5 000 et 180 000 passages. Dans la première phase, nous avons une grande réduction de l'adhérence pour toutes les formules (18 % pour S1 à 50% pour S3 et S4). Dans la deuxième phase, la décroissance de l'adhérence est plus modérée.

Ces observations sont en accord avec [10]. Ce comportement est dû au polissage qui entraine un aplanissement progressif de la surface (confère Figure B.18). Cet aplanissement est plus remarqué dans la première phase de polissage, expliquant ainsi la forte diminution de l'adhérence.

En effet, à l'état initial, la surface présente des irrégularités de tailles variées (confère Figure 3.7). Lors du passage de la roue, toutes ces aspérités ne seront pas en contact. A l'état poli, à 180 000 passages, nous remarquons une uniformisation et une réduction de la hauteur des aspérités. Cette faible hauteur des aspérités limite la déformation de la gomme du pneu. De plus, plus d'aspérités seront en contact avec la roue pouvant augmenter la fréquence de sollicitation de la roue. Une trop grande fréquence de sollicitations (>10<sup>6</sup>Hz) entraine un comportement vitreux de la roue, limitant aussi les pertes d'énergie par déformation et ainsi l'adhérence.

# 3.3.2. Evolution de l'adhérence en fonction du polissage des enrobés bitumineux

La Figure 3.19 montre l'évolution de l'adhérence des enrobés bitumineux en fonction du polissage. L'adhérence représentée sur ces figures correspond à la moyenne des deux mesures effectuées.

Nous observons le même comportement pour les huit formules d'enrobé, avec tout d'abord une augmentation du frottement initial jusqu'à un maximum. Le frottement maximum est atteint dans l'intervalle de polissage 4 000 - 7 000 passages. Après ce maximum, une réduction du frottement est observée pour toutes les formules. Ce type de comportement est « classique » pour les enrobés avec

une phase de décapage du bitume au jeune âge et la mise à nu des granulats puis une phase d'usure de la surface des granulats [10, 93, 94] (Figure 3.15 et Figure 3.16).

Le Tableau 3.6 donne le nombre de passages correspondant au maximum d'adhérence pour les huit formules d'enrobés.

Formules	F1	F2	F3	F4	F4 bis	F5	F6	F7
Nombre de passages	5 000	5 000	6 000	4 000	7 000	6 000	7 000	7 000
Valeurs	0,52	0,51	0,46	0,47	0,488	0,5	0,4	0,49

Tableau 3.6 : Maximum d'adhérence des enrobés bitumineux

La différence de formulation entre ces formules agit sur le frottement initial et le frottement maximal. En effet, après ce dernier on observe presque les mêmes pentes de réduction de frottement. Les niveaux de coefficient de frottement des huit formules sont classés dans l'ordre suivant : F1 > F2 > F5 > F7 > F4 bis > F4 > F3 > F6. On note des niveaux de performances assez variables et un écart maximal entre les formules de l'ordre de 0,10.

Les 3 formules ayant les meilleurs niveaux de performances sont celles contenant une fraction non négligeable de gravillon 1/2 Parigny (9 à 17%).

Par ailleurs, la différence de niveaux de performances entre les formules F5 et F6 fait ressortir l'importance des gravillons 1/2 sur le frottement. Ces deux formules ont presque la même composition exceptée la présence de ces gravillons. La formule F5 contient les gravillons 1/2 alors que F6 n'en contient pas. Ainsi, ces gravillons semblent contribuer à l'obtention d'un bon niveau de frottement.

De plus, l'utilisation du sable 0/2 permet d'avoir un niveau de frottement équivalent à celui mesuré sur des enrobés de type BBSG ou BBTM 0/10 (0,32 <  $\mu$  < 0,42 à 180 000 passages) comme le montrent les résultats obtenus sur les formules F3, F4, F4 bis, F6 et F7. En effet, la présence de sable favorise la présence des petits points de contact améliorant le frottement. Néanmoins, ces résultats sont inférieurs à ceux obtenus avec le granulat de Parigny 1/2.

Enfin, la différence de frottement entre la formule F3 et F6 montre que les granulats 4/6 permettent d'avoir un meilleur niveau de frottement que les granulats 6/10.



Figure 3.19 : Evolution de l'adhérence pour les enrobés bitumineux

Pour pouvoir analyser l'effet du type de liant utilisé dans la formulation sur l'adhérence, nous avons comparé les courbes d'adhérence des formules F4 et F4 bis. En effet, ces formules ont la même composition granulométrique, mais des liants différents. Le résultat correspondant est représenté sur la Figure 3.20 avec les barres d'erreurs correspondantes à la répétabilité de la machine Wehner&Schulze.



Figure 3.20 : Evolution de l'adhérence en fonction du type de bitume

En considérant la répétabilité de la machine, nous avons les mêmes valeurs de frottement jusqu'à l'adhérence maximale. L'adhérence maximale pour les formules F4 et F4 bis est presque la même (différence de 0.018). Cependant, elle est observée pour 4 000 passages pour la formule F4 et 7 000 passages pour la formule F4 bis. Cette différence est attribuée au liant utilisé. Le biprène utilisé pour la formule F4 bis est un bitume dont les propriétés ont été améliorées. Ce dernier à une résistance plus grande au décapage que le bitume normal utilisé pour la formule F4. La phase de décapage est suivie d'une phase d'usure entrainant une diminution de l'adhérence. Celle-ci commençant à 4 000 passages pour la formule F4, à 7 000 passages pour la formule F4 bis. Cela explique qu'à 180 000 passages, l'adhérence de la formule F4 bis est supérieure à celle de la formule F4. En effet, après 7 000 nous observons la même pente de diminution de l'adhérence pour les deux formules.

## 3.3.3. Conclusion

En conclusion, pour les mosaïques de granulats, nous remarquons une réduction de l'adhérence avec le polissage. Cette réduction d'adhérence est plus grande entre 0 et 5 000 passages. Cela est due à l'usure (Figure 3.7) de la surface plus grande dans cette phase. Après 5 000 passages, la réduction d'adhérence est plus faible. Pour tous les états de polissages, plus le granulat de base est fragile, plus la réduction d'adhérence est grande.

Pour les enrobés, nous avons deux phases d'évolution de l'adhérence. Nous avons d'abord une augmentation de l'adhérence due au décapage du liant suivie d'une diminution de l'adhérence due à l'usure des échantillons. L'analyse des courbes de frottement en fonction du polissage montrent que la présence de petits granulats (Parilly 1/2 et gravillon 4/6) permet d'avoir un niveau de frottement supérieur à celui mesuré avec des formules présentant des gravillons plus gros. Ces observations sont en accord avec les études de [8, 10, 62, 63]. Enfin, le choix du liant dans la formulation de l'enrobé a un impact sur la valeur de l'adhérence résiduelle (à 180 000 passages).

Les granulats 6/10 ont été utilisés pour les formules F4, F4 bis, F5, F6, F7 et S5. Une comparaison de l'adhérence en fonction du polissage a été faite pour ces formules. Le résultat est présenté sur la Figure 3.21.



Figure 3.21 : Evolution de l'adhérence avec le polissage

La comparaison entre la formule F6 et S5 permet de dire que la présence de sable et de filler permet d'améliorer légèrement l'adhérence résiduelle (à 180 000 passages).

Pour finir, le bon niveau d'adhérence avec le polissage des formules F1, F2, S1, S2 et S5 montre l'importance des petits granulats et la présence de microaspérités (microtexture, confère Figure B.14, Figure B.15, Figure B.18, Figure B.19, Figure B.20) sur l'adhérence.

Dans la section 3.4 des paramètres standards de texture (microtexture) sont analysés par rapport à l'adhérence et à son évolution avec le polissage.

## 3.4. Adhérence – texture

Dans cette partie, les paramètres de texture standards comme la hauteur quadratique moyenne (Sq pour les surfaces, Rq pour les profils), la pente quadratique moyenne (Sdq pour les surfaces, Rdq pour les profils), la courbure moyenne des sommets ou pics (Ssc pour les surfaces, Rsc pour les profils), la densité des sommets ou des pics (Sds pour les surfaces, Rds pour les profils), la dimension fractale (Sfd pour les surfaces, Rfd pours les profils) et le volume de matière des sommets ou la profondeur des pics (Vmp pour les surfaces, Rpk pour les profils) sont calculés sur les différentes cartographies.

Pour chaque formule, quatre cartographies de taille  $3 mm \times 3 mm$  pour les enrobés et, trois cartographies de taille  $5 mm \times 5 mm$  pour les mosaïques, sont faites pour représenter globalement la texture de la formule. Ces cartographies à différents endroits permettent en outre d'analyser la variation de la texture de surface sur une même formule.

La Figure 3.22 et la Figure 3.23 montrent des exemples de la variation de la texture pour, respectivement un enrobé et une mosaïque en fonction de la zone de cartographie.



Figure 3.22 : Exemple de variation de la texture en fonction de la zone de cartographie d'un enrobé bitumineux



Figure 3.23 : Exemple de variation de la texture en fonction de la zone de cartographie d'une mosaïque de granulats

Nous remarquons une variation de la texture en fonction de la zone de cartographie. Pour les enrobés bitumineux, cela s'explique par l'utilisation de plusieurs tailles de granulats pour la fabrication de ces derniers. Ainsi, en fonction de l'assemblage de ces granulats avec le liant, la topographie de la surface variera (vallées de taille variable). Ces variations sont plus faibles pour les mosaïques de granulats. Cela vient confirmer notre hypothèse de la faible variabilité de la microtexture des différents cailloux utilisés pour la fabrication de ces mosaïques de granulats (section 3.2.2).

Ces variations de texture sont aussi remarquées sur une même cartographie. Pour illustrer cela, trois profils ont été prélevés, à 25%, 50% et 75% de la longueur de chaque zone de la formule F7. Ces profils sont dénommés P1, P2 et P3. La Figure 3.24 montre les zones de sélection des profils sur une cartographie.



Figure 3.24 : Sélection des profils

La variation des différents profils est présentée sur la Figure 3.25.



Figure 3.25 : Profils sélectionnés pour la formule F7

Sur la Figure 3.25, des différences entre les profils des différentes zones sont observables. Ces variations de la texture des profils sur la même zone ajoutées aux variations de la texture entre les quatre zones de la formule augmentent l'incertitude sur les valeurs des paramètres de texture calculés sur ces profils. Ainsi, dans notre étude, il a été choisi de ne considérer que des paramètres de texture surfacique.

Nous remarquons en outre un faible décalage des profils sélectionnés sur chaque zone pour les différents états de polissage. Ceci montre l'efficacité du dispositif de fixation et le marquage de repérage lors de la cartographie (confère Figure 3.9). Sur l'ensemble des profils, le polissage entraine une diminution générale de la hauteur du profil initial et une diminution de la profondeur des vallées. La diminution de la hauteur du profil est due au polissage entrainant l'usure de la surface. Une partie des débris générés est piégée dans les vallées entrainant ainsi une diminution de la profondeur des profils.

## 3.4.1. Analyse de la texture des mosaïques de granulats

Pour les mosaïques de granulats, les paramètres de texture sont calculés sur les trois zones de chaque formule à chaque état de polissage. Les paramètres finaux de chaque formule à chaque état de polissage sont les moyennes de paramètres sur les trois zones. Cela permet de représenter la microtexture de toute la surface de l'échantillon. L'évolution de ces paramètres est représentée pour toutes les formules en annexe C.1. Les coefficients de variations sont calculés pour représenter les variations de ces paramètres sur les différentes zones. Le Tableau 3.7 donne les résultats trouvés.

		Coefficients de variation (%)															
		S1	S2		S3		S4					Mov1	Mox	Min			
Etats	0	180000	0	180000	0	180000	0	180000	0	5000	10000	0000 20000 90000			NOy.	Wax	IVIIII
Sq	10	20	8	67	6	26	29	19	8	11	10	9	12	13	18	67	6
Sdq	2	6	3	22	4	9	20	4	10	19	21	21	19	20	13	22	2
Sds	6	6	1	16	7	2	22	3	9	21	18	20	18	16	12	22	1
Ssc	4	7	1	3	8	1	6	6	7	17	19	18	15	16	9	19	1
Sfd	1	1	1	3	1	0	2	2	1	2	2	2	1	1	1	3	0
Vmp	14	10	10	65	6	47	30	16	8	11	12	10	11	12	19	65	6

Tableau 3.7 : Coefficients de variation des paramètres 3D pour les mosaïques de granulats

Nous remarquons des grandes variations pour les paramètres Sq et Vmp. Ils sont grandement dépendants de la zone de cartographie sélectionnée. Pour les autres paramètres, les variations sont plus faibles. La dimension fractale est le paramètre qui varie le moins. En effet, ce dernier est un paramètre de texture intrinsèque témoignant de la complexité de la surface. Cette complexité dérivant de la formulation de la mosaïque, peu importe la zone sélectionnée, la variation de ce paramètre sera petite. Malgré ces variations, nous notons les mêmes tendances d'évolution des paramètres de texture sur les différentes zones avec le polissage. La Figure 3.26 montre l'évolution des moyennes des paramètres de texture avec le polissage.



Figure 3.26 : Evolution des paramètres 3D pour les mosaïques de granulats

Nous remarquons une évolution des paramètres de texture semblable à celle de l'adhérence. Nous notons une grande variation des paramètres de texture dans les premières étapes de polissage (0 –

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Coefficient moyen de variation

5 000 passages). Après cette phase, les variations des paramètres de texture sont plus petites.

Durant le processus de polissage, les granulats peuvent être soumis à une usure générale et une usure différentielle [6, 95, 96]. L'usure générale entraine une diminution de la hauteur des granulats. Elle est prépondérante pour les granulats monocristallins. Lorsque le granulat contient plusieurs cristaux de dureté différentes, ceux-ci subissent en plus une usure différentielle. Les cristaux les plus fragiles sont plus usés que les autres. Cela est illustré sur la Figure 3.27.



Figure 3.27 : Usure générale et usure différentielle[96]

Ces phénomènes d'usure sont à l'origine de la diminution du Sq, Vmp, Sdq et du Ssc. Cette réduction est plus grande quand le granulat contient des minéraux fragiles. Le pourcentage d'évolution de ces paramètres à 180 000 passages est à l'image de l'évolution du frottement. Ces paramètres influencent la manière dont le pneu est déformé lors de son passage sur l'échantillon. Ils ont un effet sur la surface de contact et la pression de contact entre le pneu et l'échantillon. Ceci explique la similarité d'évolution entre ces paramètres et le frottement.

Nous observons une augmentation de la densité des sommets (Sds) pour toutes les mosaïques (monominérales et polyminérales). Elle est fonction de la dureté du granulat utilisé dans la fabrication de la mosaïque. Plus le granulat contient des minéraux fragiles, plus l'augmentation est grande (S3 et S4). Cette augmentation n'est pas cependant remarquée sur la Figure 3.28 à l'état poli. Les granulats présentent un aspect lisse.



Figure 3.28 : Aspect des mosaïques avec le polissage

Ainsi, cette augmentation du Sds serait liée au micro-usinage de la surface par l'abrasif et les poussières fines issues du polissage [95]. L'aspect de poli observé sur la Figure 3.28, correspond à une finesse des rayures telle que la surface semble lisse. Un zoom sur la Figure 3.29 montre les micro-rayures à l'état poli.



Figure 3.29 : Micro-rayures sur les mosaïques de granulats à l'état poli

Plus le granulat contient des minéraux fragiles, plus, la chance qu'il soit érodé par l'action conjointe de la circulation des débris arrachés ainsi que du polissage est grande (confère annexe B.2.2). Ceci augmente la complexité de la surface, à l'image de la dimension fractale. Le pourcentage d'augmentation est à l'image de la réduction du frottement. En effet, l'augmentation de la densité des sommets (due aux micro-rayures) et l'harmonisation des hauteurs sur la surface (aspect lisse) minimise la déformation de la gomme et ainsi la perte d'énergie par déformation. Cela expliquerait la diminution de l'adhérence.

Ces observations sont confirmées par les coefficients de corrélation linéaire dans le Tableau 3.8. Compte-tenu des variations des paramètres de texture des différentes formules par rapport aux valeurs d'adhérence, une normalisation est nécessaire avant d'établir ces corrélations. Cela consiste, pour chaque paramètre, pour chaque formule, à diviser le paramètre par sa valeur maximale.

Le Tableau 3.8 donne les coefficients de corrélation obtenus entre les paramètres de texture et le coefficient de frottement. Dans ce tableau, nous avons des nuances de couleurs allant du vert, pour un coefficient de corrélation égal à 1, au rouge, pour un coefficient de corrélation égal à 0.

	Frottement	Sq	Sdq	Sds	Ssc	Sfd	Vmp
Frottement	1,000	0,910	0,823	0,757	0,961	0,757	0,980
Sq	0,910	1,000	0,959	0,683	0,941	0,677	0,965
Sdq	0,823	0,959	1,000	0,513	0,872	0,506	0,897
Sds	0,757	0,683	0,513	1,000	0,758	0,926	0,745
Ssc	0,961	0,941	0,872	0,758	1,000	0,757	0,974
Sfd	0,757	0,677	0,506	0,926	0,757	1,000	0,741
Vmp	0,980	0,965	0,897	0,745	0,974	0,741	1,000

Tableau 3.8 : Coefficients de corrélation entre les paramètres de texture 3D des mosaïques et le frottement

La Figure 3.30 montre la corrélation entre les paramètres de texture et le frottement. Les tendances d'évolution y sont représentées.



Figure 3.30 : Corrélations entre les paramètres de texture et le frottement pour les mosaïques

Les corrélations entre les paramètres de texture et le frottement sont généralement fortes, supérieures à 0,7.

Les paramètres ayant les plus grandes corrélations avec le frottement quelle que soit la nature des granulats sont le Vmp, le Ssc et le Sq. Ces paramètres témoignent de la variation de la forme et de la hauteur des aspérités. La diminution du Vmp et du Sq signifie une réduction de la hauteur et de la largeur de base des aspérités. Ces réductions sont observées quelle que soit la dureté des granulats due à l'usure générale. Ces réductions entrainent une diminution du relief des granulats et donc une diminution du Ssc.

Les plus faibles corrélations sont observées pour le Sds, le Sfd et le Sdq. Cela est dues à la composition minéralogique des différentes mosaïques entrainant une différence de comportement avec le polissage. En effet, nous notons les phénomènes d'usure différentielle qui ne sont observés que pour les granulats contenant plusieurs minéraux de duretés différentes. En plus, nous pouvons citer le micro-usinage qui est aussi fonction de la dureté des minéraux contenus dans le granulat. Ainsi, nous pouvons noter des similarités d'évolution entre les formules S1 et S5 contenants des minéraux durs et entre les formules S2, S3 et S5 contenant des minéraux fragiles. L'évolution entre ces paramètres pour toutes les formules de mosaïques de granulats et le frottement n'est alors plus linéaire. D'autres types de corrélations peuvent être envisagés. Cela permet d'améliorer le coefficient de corrélation et la compréhension de l'effet de ces paramètres sur le frottement. Dans notre cas, nous avons considéré une corrélation polynomiale. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.31.



Figure 3.31 : Corrélations entre les paramètres de texture et le frottement pour les mosaïques

Nous notons une légère amélioration du coefficient de corrélation. Elle est cubique pour le Sdq, montrant ainsi la grande importance de la pente sur l'adhérence. La diminution de la pente diminue grandement l'adhérence. Pour le Sds et le Sfd, elle est quadratique. L'augmentation des petits sommets (plat, car diminution du Sdq) provoqués par le micro-usinage influe aussi sur la diminution de l'adhérence. Cette grande influence est remarquée surtout dans les premières phases de polissage (entre 0 et 5 000 passages).

## 3.4.2. Analyse de la texture des enrobés bitumineux

Pour chaque formule, les paramètres de texture sont moyennés sur les quatre zones comme dans le cas des mosaïques de granulats. En général, sur les quatre zones, nous avons les mêmes évolutions des paramètres avec le polissage. L'annexe C.2 montre l'évolution de ces paramètres pour toutes les zones, tous les états de polissages et pour toutes les formules d'enrobés. Le Tableau 3.9 donne les coefficients de variation pour tous les paramètres 3D calculés, pour toutes les formules et tous les états de polissage. Les valeurs particulières (moyenne, maxima et minima) sont présentées dans le Tableau 3.10.

		Coefficients de variation (%)															
			F1		F2				F3				F4				
Etats	0	5000	90000	180000	0	5000	90000	180000	0	6000	90000	180000	0	4000	90000	180000	
Sq	13	23	55	35	17	44	23	30	20	22	8	23	38	42	46	45	
Sdq	25	20	48	44	39	22	34	21	19	10	14	11	45	60	57	59	
Sds	18	20	22	12	15	27	13	7	16	27	22	32	18	23	28	19	
Ssc	14	11	48	36	10	12	31	17	17	22	10	10	27	24	16	21	
Sfd	3	4	3	2	З	4	2	1	2	3	2	4	2	1	1	1	
Vmp	54	16	93	48	41	26	47	37	46	24	24	24	69	43	55	65	
		F4 bis F5									F6		F7				
Etats	0	7000	90000	180000	0	6000	90000	180000	0	7000	90000	180000	0	7000	90000	180000	
Sq	22	15	17	15	56	51	48	48	64	55	64	58	19	20	20	19	

Tableau 3.9 : Coefficients de variation des paramètres 3D pour toutes les formules d'enrobés bitumineux
Sdq	27	24	24	27	45	53	48	56	46	44	40	38	20	28	28	19
Sds	7	13	9	11	24	13	9	27	12	10	11	8	14	16	18	13
Ssc	28	15	9	6	24	35	26	30	18	28	24	18	32	16	21	13
Sfd	2	2	1	1	5	3	6	5	3	3	2	3	4	1	2	2
Vmp	12	13	8	12	42	60	66	54	67	48	51	74	25	17	7	8

Les valeurs particulières (moyenne, maxima et minima) sont présentées dans le Tableau 3.10.

Tableau 3.10 : Coefficients de variation moyennes des paramètres 3D pour les enrobés bitumineux

	Coefficients de variation (%)									
	Sq	Sdq	Sds	Ssc	Sfd	Vmp				
Moyenne	33,64	34,23	16,78	20,85	2,65	39,84				
Max	64,45	60,48	32,38	48,27	5,64	92,64				
Min	7,61	10,48	7,40	5,80	0,88	7,49				

Parmi tous les paramètres calculés, comme pour les mosaïques de granulats, seule la dimension fractale présente de faibles variations. Les autres paramètres sont grandement dépendants de l'état de surface de la zone sélectionnée, présence de vallées, de sommets, texture homogène ou présence de bitume. Ceci explique la grande variation de ces paramètres sur ces zones. Cependant, la moyenne sur ces zones permet de représenter la texture de la formule. Cette moyenne, comme dans le cas des mosaïques permettra de représenter la texture générale de chaque échantillon.

La Figure 3.32 montre l'évolution des paramètres de texture pour les différentes formules d'enrobés bitumineux.



Figure 3.32 : Evolution des paramètres 3D pour les enrobés

Sur la Figure 3.32, pour toutes les formules, nous remarquons généralement une grande variation des paramètres de texture avec le polissage entre l'état initial et l'état de frottement maximal comme pour les mosaïques de granulats. Dans la littérature, cette phase est associée au décapage du liant bitumineux et à la mise à nu des granulats [10, 93, 94].

La variation de hauteur (Sq) est plus remarquée pour les formules ayant une grande quantité de sable. Elle est plus grande pour la formule F7 qui en contient le plus suivie de F4, F4 bis, F3 et F6. Pour ces formules, nous avons une réduction de la hauteur des aspérités. Pour les autres formules contenant en plus des granulats 1/2, nous avons une quasi-constance de la hauteur des aspérités. Avec l'observation des cartographies faites (confère annexe B.2.3), nous remarquons que ce décapage est fait en parallèle avec un détachement des granulats les plus fragiles comme le sable et les fillers. Cela s'accompagne d'une grande diminution du Sdq, Sds, Ssc et Sfd. Après cette phase la variation des paramètres de texture est faible. Ces débris arrachés sont alors soit éjectés hors de la surface des échantillons soit restent piégés et sont compactés sur la surface des échantillons.

Entre l'état du frottement maximal et 90 000 passages, la diminution des paramètres de texture est globalement faible pour le Sq, Sdq et le Sds. Pour le Ssc et le Vmp, nous notons une très légère augmentation avec le polissage. Pour le Sfd, nous notons une évolution variable en fonction des formules après l'état de frottement maximal.

L'augmentation du Sfd témoigne d'une complexification de la surface de l'échantillon. Ceci est dû au compactage d'une partie des débris à la surface de l'échantillon. Ce compactage est favorisé par la présence de débris de bitume.

Après 90 000 passages, nous avons une évolution variable des paramètres de texture. Mais, généralement, nous remarquons soit une diminution ou une quasi-constance des paramètres de texture. Ces variations (diminution) sont plus remarquées pour le Sfd. Ceci est dû à la forte diminution et la proportion de bitume limitant ainsi le compactage des débris sur l'échantillon et diminuant ainsi la complexité de la surface.

Les différences de variation des paramètres de texture observées entre les formules sont aussi dépendantes du décapage non uniforme du bitume pour toutes les formules (Figure 3.15 et Figure 3.16). L'évolution des paramètres de texture des enrobés bitumineux, si on la considère pour tous les états de polissage, ne reflète pas l'évolution du frottement. Cependant, en considérant deux phases d'évolution, entre l'état initial et l'état de frottement maximal et entre ce dernier et 180 000 passages, nous constatons des similarités. En effet, c'est entre l'état initial et l'état de frottement maximal que nous notons la grande variation du frottement comme pour le Sdq, le Ssc, le Sds et le Sfd. Après cette phase, nous constatons de faibles variations pour les paramètres de texture et le frottement.

Cette différence d'évolution des paramètres de texture pour tous les états de polissage et le frottement est reflétée par la matrice de corrélation linéaire du Tableau 3.11. Dans ce tableau, nous avons des nuances de couleurs allant du vert, pour un coefficient de corrélation égal à 1, au rouge, pour un coefficient de corrélation égal à 0.

Pour tous les paramètres, comme pour les mosaïques de granulats, nous remarquons une grande variation entre les différentes formules d'enrobés. Cependant, cette grande variation n'est pas observée sur les valeurs du frottement. Pour pouvoir alors corréler ces différentes valeurs des paramètres de texture et le frottement, les valeurs ont été normalisées pour chaque formule par rapport aux valeurs maximales des paramètres.

Coefficient de corrélation										
Frottement Sq Sdq Sds Ssc Sfc										
Frottement	1,000	0,082	0,474	0,242	0,576	0,346	0,099			
Sq	0,082	1,000	0,574	0,257	0,450	0,281	0,510			
Sdq	0,474	0,574	1,000	0,417	0,928	0,645	0,073			

Tableau 3.11 : Coefficients de corrélation entre les paramètres de texture 3D et le frottement

Sds	0,242	0,257	0,417	1,000	0,565	0,503	0,095
Ssc	0,576	0,450	0,928	0,565	1,000	0,717	0,110
Sfd	0,346	0,281	0,645	0,503	0,717	1,000	0,096
Vmp	0,099	0,510	0,073	0,095	0,110	0,096	1,000

A travers ce tableau, nous remarquons que les corrélations linéaires les plus grandes entre les paramètres de texture et le frottement sont obtenues pour la courbure (Ssc), la pente (Sdq), la dimension fractale (Sfd) et la densité des sommets (Sds). Ces paramètres influencent la manière dont le pneu est déformé lors de son passage sur l'échantillon. La pente et la courbure ont un effet sur la surface de contact entre le pneu et l'échantillon et la densité des sommets sur la fréquence de déformation du pneu et la perte d'énergie provoquée par la déformation asymétrique du pneu. La dimension fractale représentant la complexité de la surface est corrélée à la pente, la courbure et la densité des sommets. Ceci souligne l'intérêt que peut représenter ce paramètre dans la description de la texture en fonction de l'adhérence. Le Sq et le Vmp sont les paramètres les moins influents sur la variation générale du frottement. La Figure 3.33 montre la corrélation entre les paramètres de texture 3D et le frottement.



Figure 3.33 : Corrélation entre les paramètres de texture 3D et le frottement

L'analyse des courbes d'adhérence avait révélée deux phases d'évolution. Cette séparation est aussi remarquée sur les paramètres de texture et sur le graphe de corrélation. Pour les enrobés, deux phases peuvent être considérées [8]: la phase de décapage (0 et 5 000 – 7 000 passages) et la phase d'usure (entre le frottement maximal (4 000 – 7 000 passages) et 180 000 passages). Cette séparation permet de séparer les paramètres de texture les plus influents à chaque phase. Cela est illustré sur la Figure 3.34. Les corrélations faites entre les paramètres de texture et le frottement pour ces deux phases sont présentées sur la Figure 3.35 et la Figure 3.36.

Les corrélations sont plus grandes dans la phase de décapage. Les paramètres les plus influents sont la densité des sommets (Sds), la pente (Sdq) et la courbure (Ssc). Ils sont suivis de la dimension fractale. Nous notons une augmentation de la corrélation entre le Sq, le Vmp et le frottement dans cette phase. L'évolution des paramètres de texture avec le polissage est plus importante dans cette phase. Nous notons la diminution des paramètres de texture avec l'augmentation du frottement. L'augmentation du frottement est fortement liée à la diminution du Sdq et du Ssc. Cette diminution dans cette phase est associée au décapage du bitume et à l'arrachement des très petites aspérités. La diminution de la densité des sommets vient encore témoigner de la suppression des petites aspérités.



Figure 3.34 : Regroupement des données



Figure 3.35 : Corrélation entre les paramètres de texture 3D et le frottement lors dans la phase de décapage



Figure 3.36 : Corrélation entre les paramètres de texture 3D et le frottement dans la phase d'usure

Dans la phase d'usure, l'analyse des courbes d'adhérence a montré que nous avons les mêmes évolutions d'adhérence pour les enrobés bitumineux et les mosaïques de granulats. Cependant, dans notre cas, les corrélations sont plus faibles.

Cela est dues aux différences d'évolution observées pour certaines formules, dues au décapage non uniforme et au fait du compactage ou non des débris arrachés. En exemple, nous pouvons observer l'évolution de la pente des formules F1, F2. Nous notons une légère augmentation du Sdq pour ces formules. Pour les autres formules, nous remarquons une diminution de la pente. Cette observation peut-être aussi faite pour les autres paramètres de texture.

Malgré ces faibles corrélations, nous retrouvons des tendances semblables à ceux des mosaïques comme les bonnes corrélations du Sq et du Vmp par rapport aux autres paramètres de texture. Les paramètres les plus influents sont la densité des sommets Sds, le Sq la pente Sdq et le Vmp. Ce sont ceux qui varient le plus avec la diminution du frottement.

Contrairement aux mosaïques, nous observons une diminution de la densité des sommets (Sds) et de la dimension fractale (Sfd). Cela est due à l'utilisation de plusieurs tailles de granulats dans la formulation des enrobés. Les petits granulats comme le sable et les granulats 1/2 sont facilement arrachés lors du polissage avec la diminution de la quantité du liant. De plus, les granulats 4/6 et 6/10 utilisés pour les enrobés ont une dureté semblable au granulats 6/10 utilisés pour la mosaïque S5. Pour cette dernière, nous avions une quasi-constance de la densité des pics. Avec l'action combinée, de l'arrachement des petits granulats pour les enrobés, nous auront une diminution de la densité des sommets et ainsi de la dimension fractale. Ceci explique aussi la légère augmentation du volume de matière des sommets.

### 3.4.3. Conclusion

L'analyse des paramètres de texture a permis de relever leur utilité dans la description de l'évolution de l'adhérence avec le polissage.

L'analyse des paramètres de texture des mosaïques de granulats a permis dans un premier temps de démontrer la dépendance texture-adhérence. Le Sq, le Vmp et le Ssc sont les paramètres présentant une corrélation linéaire avec le frottement quelle que soit la dureté du granulat. Ils traduisent l'usure générale que subit les granulats lors du polissage. Les autres paramètres Sds, Sfd et Sdq permettent de révéler la différence de comportement en fonction de la composition minéralogique et la fragilité du granulat. Ces propriétés sont à l'origine de l'usure différentielle (pour les granulats contenant plusieurs minéraux) et des micro-rayures (pour les granulats fragiles) que subissent les granulats. Notre étude a révélé une dépendance quadratique entre le frottement et le Sds, Sfd et le Sdq, surtout dans les premiers états de polissage (entre 0 et 5 000 passages). La diminution de la hauteur (Sq), de la largeur des aspérités sur les granulats (diminution du Ssc, Vmp et du Sdq) ainsi que l'apparition des petites aspérités très proches (augmentation du Sds et du Sfd) expliquent la diminution de l'adhérence.

Pour les enrobés, les paramètres hybrides comme la courbure (Ssc), la pente (Sdq), la densité des sommets (Sds) et la dimension fractale sont ceux qui décrivent le mieux l'évolution de l'adhérence. Pour l'analyse, deux phases sont aussi considérées, la phase de décapage du liant avec l'augmentation de l'adhérence et la phase d'usure avec la diminution de l'adhérence.

Dans la phase de décapage, il est remarqué que ce sont les petites aspérités comme le sable qui sont arrachées par le polissage. Cela se traduit par une faible variation du Sq et du Vmp. Les grandes variations du Sdq, Ssc, Sds et du Sfd sont remarquées dans cette phase. Cette phase est aussi associée au décapage du liant bitumineux. Comme pour les mosaïques de granulats, c'est dans cette phase que sont remarquée les plus grandes évolutions des paramètres de texture et de l'adhérence.

Dans la phase d'usure, nous avons une faible évolution des paramètres de texture ainsi que du frottement. Contrairement aux mosaïques de granulats, dans cette phase, nous notons une diminution de la densité des sommets et de la dimension fractale. Cela est associé à l'utilisation des plusieurs petits granulats (sable, Filler) dans la fabrication des enrobés.

L'analyse des courbes d'adhérence en fonction de la composition des échantillons a fait ressortir l'effet de la taille des granulats et de la microtexture sur l'adhérence. Les paramètres de texture standards confirment l'effet de la texture (dépendant de la nature et de la taille des granulats) sur l'adhérence. Cependant, ces paramètres de texture standards ne permettent pas de connaitre la taille des irrégularités (échelle) de la surface les plus influentes sur l'adhérence. Une analyse multiéchelle permettrait de répondre à cette question.

## 4. Analyse multiéchelle

Une analyse multiéchelle est faite sur les différentes cartographies. Le but est d'analyser l'effet des différentes échelles de texture notamment de la microtexture sur les valeurs d'adhérence et leur évolution avec le polissage.

Pour ce faire, la transformée en ondelettes continues (section 1.2.3) est utilisée. Cette méthode permet une discrétisation fine des échelles et une fidélité dans la représentation de l'amplitude de la texture contenue dans chaque échelle.

Le nombre d'échelles de la décomposition dépend de la taille des échantillons ainsi que du pas de mesure. Rappelons que pour les échantillons en enrobés bitumineux, des zones de  $3 mm \times 3 mm$  ont été cartographiées avec un pas de mesure de  $0,88 \mu m$ . Pour les mosaïques de granulats, des zones de  $5 mm \times 5 mm$  ont été sélectionnées avec un pas de mesure de  $1,76 \mu m$  (section 3.2.2).

La décomposition a été faite en utilisant l'ondelette du chapeau mexicain. Le pas de discrétisation des échelles choisi est de 0,5 (section 1.2.3). Les échelles sont discrétisées selon l'équation (1.32) avec un nombre d'échelles défini par l'équation (1.33). En utilisant ces formules, nous avons discrétisé 22 échelles pour les mosaïques de granulats et 23 échelles pour les enrobés bitumineux. La Figure 4.1 montre la discrétisation de ces échelles d'analyse.



Figure 4.1 : Discrétisation des échelles d'analyse pour les enrobés bitumineux

La discrétisation des échelles est fine surtout dans la gamme d'échelles  $0 - 500 \mu m$  correspondant à la microtexture qui est la gamme de texture sur laquelle se focalise notre étude.

La décomposition multiéchelle permet, pour une échelle donnée, de générer la surface correspondante. Un exemple de décomposition multiéchelle est faite pour la formule S1 sur la zone 1 à l'état initial. La surface correspondante est représentée sur la Figure 4.2.



Figure 4.2 : Formule S1, zone 1, état initial

Pour illustrer la variation de la texture en fonction des échelles, les surfaces correspondantes à 12 échelles sont représentées sur les Figure 4.3, Figure 4.4 et Figure 4.5.



Figure 4.3 : Formule S1, zone 1, état initial, échelles  $4 \mu m - 500 \mu m$ 



Figure 4.4 : Formule S1, zone 1, état initial, échelles 783  $\mu m$  – 4 240  $\mu m$ 



Figure 4.5 : Formule S1, zone 1, état initial, échelles  $783 \mu m - 4240 \mu m$ (zoom)

Nous remarquons pour chaque échelle, la variation des amplitudes sur la surface en fonction de la présence effective ou non de l'échelle en question sur la surface non décomposée. Ceci vient montrer l'intérêt de la méthode décomposition à base d'ondelettes continues sur les autres méthodes. Les échelles supérieures à  $1500 \ \mu m$  ont des amplitudes très faibles. Ceci est dû d'une part aux tailles des cartographies ( $5 \ mm \ \times 5 \ mm$  pour les mosaïques de granulats et  $3 \ mm \ \times 3 \ mm$  pour les enrobés bitumineux) et d'autre part au prétraitement (suppression de la forme et redressement de la cartographie, section 3.2.2) effectué.

L'évolution de quelques échelles de la microtexture est montrée pour la formule S5 en annexe D.1. L'ordre de grandeur de la variation de la texture n'est pas le même pour toutes les échelles. Nous notons cependant une diminution générale de la texture avec le polissage. Cette diminution de la texture est plus grande entre 0 et 5 000 passages de polissage.

Sur les résultats de la décomposition, les paramètres de texture comme le Sq, le Sdq, le Ssc, le Sds et le Sfd sont calculés. L'analyse de ces paramètres à différentes échelles permettra de déterminer ceux les plus discriminants dans l'étude du polissage et les échelles de texture les plus influentes sur l'évolution de l'adhérence.

L'analyse sera divisée en deux parties : une partie sur les mosaïques de granulats et l'autre sur les enrobés bitumineux. Dans les deux cas, comme pour le calcul des paramètres de texture sans décomposition multiéchelle, les paramètres calculés sur chaque zone sont moyennés pour chaque formule à chaque état de polissage.

## 4.1. Echantillons de mosaïques de granulats

### 4.1.1. Evolution multiéchelle des paramètres de texture pour les mosaïques de granulats

Cette section présente l'évolution multiéchelle des différents paramètres de texture calculés dans la section 3.4.1.

#### Evolution multiéchelle du Sq (hauteur quadratique moyenne) et Vmp (volume de matière des sommets)

Les Figure 4.6 et Figure 4.7 montrent l'évolution multiéchelle respectivement du Sq et du Vmp pour les cinq formules de mosaïques de granulats pour les différents états de polissage.





Figure 4.6 : Evolution multiéchelle du Sq pour les mosaïques de granulats

Figure 4.7 Evolution multiéchelle du Vmp pour les mosaïques de granulats

Comme pour le paramètre Sq calculé sur les cartographies sans la décomposition multiéchelle, nous remarquons une diminution du Sq avec le polissage pour toutes les échelles. Cependant, les ordres de réduction dépendent des échelles considérées et de la nature du granulat utilisé dans la fabrication de la mosaïque.

Pour toutes les formules, les valeurs les plus grandes à l'état initial sont obtenues pour la gamme d'échelles  $100 \ \mu m - 300 \ \mu m$  avec un maximum à l'échelle  $300 \ \mu m$ . C'est autour de cette gamme d'échelles que sont remarquées les plus grandes évolutions du Sq avec le polissage. Cette diminution est plus grande quand le granulat de base de la mosaïque est composé de minéraux doux [95], comme pour les formules S2, S3 et S4 en calcaire.

Ces mêmes observations sont faites pour le paramètre Vmp avec une diminution des valeurs du paramètre avec le polissage pour toutes les échelles. Les proportions de réduction en fonction des échelles et de la nature des granulats sont à l'image de celles de Sq.

Les pourcentages de variations multiéchelles de ces deux paramètres entre l'état initial et 180 000 passages sont représentés sur la Figure 4.8. Les valeurs positives traduisent une augmentation et les valeurs négatives, une diminution.



Figure 4.8 : Variation du Sq et du Vmp entre l'état initial et 180 000 passages

Pour les formules S2, S3 et S4 à base de calcaire (granulat monominéral), nous remarquons une réduction du Sq et du Vmp pour toutes les échelles de texture. Cela est expliqué par le fait que ces formules ne sont soumises qu'à une usure générale (Figure 3.27). Cependant en fonction de la dureté (PSV), nous notons quelques différences entre les formules S3 et S4 (PSV respectivement de 36 et 35) et la formule S2 plus dure (PSV de 52). C'est pour ces formules que nous remarquons les plus grandes réductions respectivement pour les formules S3, S4 et S2. Pour les formules S3 et S4, la réduction est uniforme pour toutes les échelles (80% de réduction par rapport à l'état initial). Pour la formule S2, la réduction maximale est observée pour les échelles comprises entre 100  $\mu m - 500 \mu m$ .

Cette même observation est faite pour les formules S1 et S5 (granulat polyminéral) avec une réduction maximale du Sq et du Vmp entre  $500 \ \mu m - 1 \ 000 \ \mu m$  pour la formule S1 et entre  $300 \ \mu m - 500 \ \mu m$  pour la formule S5. Cette réduction est plus grande pour la formule S1.

La différence entre ces deux dernières formules et les autres (monominérales) est remarquée pour les échelles supérieures à  $2\,000\,\mu m$  pour le Sq et pour les échelles supérieures à  $2500\,\mu m$  pour le Vmp. Nous notons une faible diminution et/ou une augmentation du Sq et du Vmp. Ce comportement peut être attribué à l'usure différentielle que subit ces deux formules en plus de l'usure générale. L'usure différentielle entraine une usure plus prononcée des minéraux fragiles (silice, feldspath) par rapport aux minéraux durs (quartz). Ce phénomène entraine une recréation de la texture, notamment des grandes échelles.

En considérant la formule S5, nous remarquons que 90 % de la réduction des valeurs des paramètres Sq et Vmp est faite entre 0 et 5 000 états de polissage comme pour le frottement.

Ces deux paramètres sont utilisés pour caractériser l'enlèvement de la matière et la réduction de la hauteur des aspérités lors du polissage qui a une influence sur la réduction de l'adhérence (section 3.3.1). L'analyse multiéchelle permet de représenter les phénomènes d'usure générale et différentielle que subissent les mosaïques de granulats. En considérant les évolutions du Sq et du Vmp des formules S1 et S5, l'effet des petites échelles de texture (inférieures à  $1 000 \, \mu m$ ) sur l'évolution de l'adhérence avec le polissage est révélé. Ces échelles sont celles les plus arrachées avec le polissage. Les micro-fragments arrachés peuvent provoquer des rayures sur les surfaces des granulats (Figure 3.29). Les largeurs (échelles) ainsi que les profondeurs de ces rayures dépendent de la dureté des minéraux constituants le granulat [95, 97]. L'analyse du Sds (densité des sommets) permettra de connaitre la largeur des rayures qui sont générés lors du polissage.

#### Evolution multiéchelle du Sds (densité des sommets) et du Sfd (dimension fractale)

L'évolution multiéchelle du Sds est représentée sur les Figure 4.9, Figure 4.10 et Figure 4.11.



Figure 4.10 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre  $0 \ \mu m - 200 \ \mu m$ 

Entre les échelles  $0 \mu m - 50 \mu m$ , nous remarquons une augmentation du Sds pour les formules S2, S3 et S4. Cette augmentation est plus grande pour les formules S3 et S4 qui sont moins dures que la formule S2. Le Sds est quasi-constant pour les formules S1 et S5 qui sont les plus dures.

Entre les échelles  $50 \mu m - 200 \mu m$ , l'augmentation du Sds est remarquée pour les formules S1, S2, S3 et S4. Dans cette plage d'échelle, l'augmentation est plus grande pour les formules S1 et S2. La quasi-constance du Sds est encore remarquée pour la formule S5.



Figure 4.11 : Evolution multiéchelle du Sds pour les mosaïques de granulats, zoom entre  $200 \ \mu m - 5 \ 000 \ \mu m$ 

Entre les échelles  $200 \ \mu m - 500 \ \mu m$ , nous avons une évolution variable du Sds. Cependant, nous notons généralement une augmentation du Sds pour les formules S1, S2 et S5 avec une légère diminution autour de l'échelle  $300 \ \mu m$ . La diminution autour de cette échelle est plus grande sur la formule S2. La diminution de cette échelle peut être reliée à l'arrachement des fragments remarqué sur l'évolution du Sq et du Vmp. Sur la formule S4, nous avons une diminution du Sds et pour la formule S3 une augmentation du Sds.

Entre les échelles  $500 \ \mu m - 5\ 000 \ \mu m$  l'augmentation du Sds est conservée pour la formule S3. Pour les formules S2 et S5, nous notons une diminution générale du Sds. Pour les formules S1 et S4, nous avons une diminution du Sds entre  $500 \ \mu m - 1\ 500 \ \mu m$  et  $2\ 500 \ \mu m - 5\ 000 \ \mu m$  et une légère augmentation entre  $1\ 500 \ \mu m - 2\ 500 \ \mu m$ .

Cette analyse est présentée en terme de pourcentages de variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages sur la Figure 4.12.



Figure 4.12 : Variation du Sds entre l'état initial et 180 000 passages

L'augmentation du Sds est reliée aux micro-rayures (S2, S3 et S4 entre 0  $\mu m - 50 \mu m$ ), aux différentes fragmentations des granulats lors du passage des cônes de polissage [95] et à l'usure différentielle pour les granulats avec un contraste de dureté des minéraux (S1 et S5). Ces actions provoquent une récréation de la texture. Avec la diminution du Sq, nous avons une harmonisation des hauteurs des aspérités à la surface des granulats. Ainsi, la gomme du pneu, avec ces petites échelles subira de grandes fréquences de déformation. Ceci limite la perte d'énergie et explique ainsi les grandes diminutions du frottement pour les formules S3 et S4.

La même analyse est faite pour le Sfd représenté sur les Figure 4.13 et Figure 4.14.



Figure 4.13 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats



Figure 4.14 : Evolution multiéchelle du Sfd pour les mosaïques de granulats, zoom

Nous avons une faible variation du Sdf entre  $0 \mu m - 500 \mu m$ . Nous notons généralement une augmentation de ce paramètre avec un maximum d'augmentation pour la formule S2. Cette augmentation du Sfd pour ces échelles est liée à l'augmentation du Sds.

Les différences d'évolution sont plus remarquées entre  $500 \mu m - 5000 \mu m$ . Dans cette plage d'échelle, nous notons une diminution du Sfd pour les formules S1 et S2 et une augmentation du Sfd pour les formules S4 et S5. Nous avons une évolution plus variable pour la formule S3 avec une diminution du Sfd jusqu'à l'échelle 1 500  $\mu m$  suivi d'une diminution.

Nous notons quelques similitudes d'évolution entre le Sds et le Sfd. Cependant, le Sds est plus discriminant et apporte plus d'informations sur la récréation de la texture.

#### Evolution multiéchelle du Sdq (pente quadratique moyenne) et du Ssc (courbure des sommets)

L'analyse est aussi faite pour les paramètres Sdq et Ssc. Les Figure 4.15 et Figure 4.16 montrent l'évolution multiéchelle du Sdq avec le polissage.



Figure 4.15 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats



Figure 4.16 : Evolution multiéchelle du Sdq pour les mosaïques de granulats, zoom

Nous remarquons une diminution du Sdq avec le polissage pour toutes les échelles. Comme pour le Sq et le Vmp, les plus grandes évolutions sont remarquées pour des échelles inférieures à  $500 \ \mu m$ . Une réduction plus grande est remarquée pour les formules S3 et S4 en calcaire qui ne contiennent qu'un minéral doux, la calcite. La variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passage est présentée sur la Figure 4.17.



Figure 4.17 : Variation du Sdq entre l'état initial et 180 000 passages

Comme pour le Sq et le Vmp, la variation du Sdq dépend de la composition minéralogique des granulats et de leur dureté.

Les plus grandes réductions sont remarquées entre  $100 \ \mu m - 1 \ 000 \ \mu m$  respectivement pour les formules S3, S4, S2, S1 et S5. Pour les formules S3 et S4 très fragiles, nous avons une réduction uniforme (80 % de réduction) du Sdq. Elle est plus variable sur les autres formules surtout celles contenant plusieurs minéraux (S1 et S5). Sur ces derniers, nous remarquons une faible réduction (S1) et/ou une augmentation (S5) pour des échelles supérieures à  $2 \ 000 \ \mu m$  due à l'usure différentielle.

Quant à la réduction du Sdq par rapport aux différentes étapes du polissage, 90 % de la réduction du Sdq est faite entre 0 et 5 000 passages comme pour le Sq et le Vmp pour la formule S5.

La même observation est faite pour le Ssc représenter sur les Figure 4.18, Figure 4.19 et Figure 4.20.



Figure 4.19 : Evolution multiéchelle du Ssc pour les mosaïques de granulats, zoom



Figure 4.20 : Evolution multiéchelle du Ssc pour la formule S5, zoom entre  $0 \mu m - 500 \mu m$ Nous notons une diminution du Ssc avec le polissage. Comme pour le Sdq, cette réduction est plus grande entre 0 et 5 000 passages de polissage. Les variations du Ssc entre l'état initial et 180 000 passages sont présentées sur la Figure 4.21.



Figure 4.21 : Variation du Ssc entre l'état initial et 180 000 passages

Entre  $0 \mu m - 400 \mu m$ , nous notons une réduction du Ssc pour toutes les formules. Cette réduction comme dans le cas du Sdq dépend de la composition minéralogique et de la dureté des granulats.

Cette diminution est remarquée pour les formules S2, S3, S4 et S5 entre  $400 \mu m - 5000 \mu m$ . Cependant, dans cette gamme d'échelles, elle plus rapide pour la formule S5 comparé à la formule S2. Nous remarquons aussi, pour la formule S1, une augmentation du Ssc dans cette gamme d'échelles. Ceci pourrait expliquer le meilleur maintien d'un bon niveau de frottement pour les formules S1 et S2 (illustré sur la Figure 4.22) après 5 000 passages comparé aux autres formules notamment la formule S5. Dans cette gamme d'échelles, l'augmentation du Ssc permet d'avoir un meilleur relief et ainsi un bon frottement.





#### Conclusion

En conclusion, pour tous les paramètres analysés, leurs variations diffèrent en fonction de l'échelle d'analyse. Cela vient souligner l'intérêt d'une analyse multiéchelle dans la compréhension de la variation de l'adhérence avec le polissage.

Cette analyse multiéchelle permet de tenir compte de la nature des granulats et de leur dureté dans l'étude du polissage. Elle permet d'observer les phénomènes d'usure générale et différentielle.

Le polissage entraine une diminution du Sq et du Vmp due à l'enlèvement de la matière. Cette diminution est plus grande lorsque le granulat a une faible dureté (S2, S3, S4), est monominéral ou quand il contient des minéraux fragiles (S2, S3 S4 qui ne contiennent que de la calcite qui est fragile). Cette diminution (90%) est plus grande entre l'état initial et 5 000 passages de polissage. La plage d'échelles des fragments arrachés est comprise entre 100  $\mu m$  – 1000  $\mu m$  avec le maximum autour de 300  $\mu m$ .

Ces fragments provoquent des rayures à la surface des granulats et donc une recréation de la texture. Ceci est illustré par l'augmentation du Sds et du Sfd. Des petites échelles ( $0 \ \mu m - 50 \ \mu m$ ) sont créées sur les surfaces les moins dures (S3 et S4). Pour les surfaces plus dures, l'échelle minimale créée est  $50 \ \mu m$ . L'augmentation du Sds et du Sfd est aussi liée à la dureté des granulats.

Quant au Sdq et du Ssc, le polissage entraine une réduction importante de ces paramètres entre  $0 \ \mu m - 1 \ 000 \ \mu m$  et en fonction de la dureté des granulats.

Ces différentes variations expliquent la diminution de l'adhérence avec le polissage avec l'apparition de très petites échelles et la diminution des arêtes vives.

# 4.1.2. Corrélation multiéchelle entre les paramètres de texture et le frottement pour les mosaïques de granulats

Une corrélation (quadratique pour tenir compte de l'évolution en fonction des propriétés des granulats des paramètres de texture et du frottement) a été faite entre les paramètres multiéchelles et le frottement afin de confirmer les influences des paramètres de texture multiéchelles. Les paramètres multiéchelles ont été normalisés par rapport à leurs valeurs maximales. Le résultat de cette corrélation est montré sur la Figure 4.23.



Figure 4.23 : Corrélation multiéchelle entre les paramètres de texture et le frottement

Comme dans le cas de l'analyse sur les cartographies sans décomposition multiéchelle, nous notons une grande corrélation entre les paramètres de texture multiéchelle et le frottement.

Les diminutions du Sq, du Vmp et du Sdq sont ceux qui décrivent mieux la diminution du frottement avec l'adhérence pour toutes les échelles. Les coefficients de corrélations correspondants sont supérieurs à 0,8 pour toutes les échelles. Les maxima de corrélation (coefficient de corrélation > 0,9) sont remarqués pour la gamme d'échelle  $100 \ \mu m - 500 \ \mu m$ . C'est cette gamme d'échelles qui évoluait le plus avec le polissage comme le frottement.

C'est aussi dans cette plage d'échelles que nous avons la plus grande corrélation pour le Ssc (>0,9). Après cette gamme, nous notons une diminution de la corrélation (0,6 < coefficient de corrélation < 0,85).

Les grandes variations du coefficient de corrélation sont remarquées pour le Sds et le Sfd. L'évolution du coefficient de corrélation est similaire pour ces deux paramètres en fonction des échelles.

Pour des échelles inférieures à  $300 \ \mu m$  nous avons un coefficient de corrélation négatif signifiant l'augmentation du Sds et du Sfd avec la diminution du frottement. Les plus grandes valeurs sont remarquées pour les échelles inférieures à  $100 \ \mu m$ . Les échelles ayant un coefficient de corrélation positif sont celles comprises entre  $300 \ \mu m - 1 \ 000 \ \mu m$ . Au-delà, nous avons de faibles corrélations avec le frottement.

En conclusion, nous pouvons dire que le polissage entraine un enlèvement de matière sur toute la surface du granulat en fonction de la dureté de ce dernier. La gamme d'échelles la plus impactée par ce phénomène est  $100 \ \mu m - 1 \ 000 \ \mu m$ . Cet enlèvement de matière est suivi d'une réduction de la pente et de la courbure entrainant une diminution du frottement.

Les fragments arrachés participent à la récréation de la texture notamment des petites échelles qui sont inférieures à  $100 \,\mu m$  quand le granulat n'est pas dur (S1, S2). Ceci entraine des grandes fréquences de sollicitation de la gomme du pneu limitant ainsi la perte d'énergie par déformation.

## 4.2. Echantillons d'enrobés bitumineux

# 4.2.1. Evolution multiéchelle des paramètres de texture des enrobés bitumineux

Cette section présente l'évolution multiéchelle des différents paramètres de texture calculés dans la section 3.4.2.

#### Evolution multiéchelle du Sq (hauteur quadratique moyenne) et Vmp (volume de matière des sommets)

Les Figure 4.24, Figure 4.25 et Figure 4.26 montrent l'évolution multiéchelle du Sq pour les huit formules d'enrobés bitumineux pour les différents états de polissage.



Figure 4.25 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux, zoom entre  $0 \mu m - 500 \mu m$ 



Figure 4.26 : Evolution multiéchelle du Sq pour enrobés bitumineux, zoom entre  $500 \ \mu m - 3 \ 000 \ \mu m$ Les Figure 4.27, Figure 4.28 et Figure 4.29 montrent l'évolution multiéchelle du Vmp pour les huit formules d'enrobés bitumineux pour les différents états de polissage.



Figure 4.27 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux





Figure 4.28 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux, zoom entre  $0 \mu m - 500 \mu m$ 

Figure 4.29 : Evolution multiéchelle du Vmp pour enrobés bitumineux, zoom entre  $500 \ \mu m - 3 \ 000 \ \mu m$ 

Comme dans le cas des mosaïques de granulats, les mêmes évolutions sont remarquées entre le Sq et le Vmp avec le polissage. Cependant, entre l'état initial et 180 00 passages, nous ne remarquons pas une réduction générale du Sq et du Vmp pour toutes les échelles avec le polissage. Dans le cas des enrobés bitumineux, la variation multiéchelle du Sq dépend de la composition granulométrique et du liant utilisé.

L'analyse sera divisée en deux phases comme pour l'évolution du frottement : la phase d'augmentation et celle de diminution.

Les Figure 4.30 et Figure 4.31 montrent respectivement les pourcentages de variations du Sq et du Vmp entre l'état initial et l'état de frottement maximal. Les valeurs positives correspondent à une augmentation des paramètres de texture et les valeurs négatives à une diminution.



Figure 4.31 : Variation du Vmp entre l'état initial et le frottement maximal

Nous remarquons des pourcentages de variation similaires entre les formules ayant globalement la même composition granulométrique : entre F1, F2 et F3 ; entre F4, F4 bis et F7 et entre F5 et F6. Les tendances d'évolution sont influencées par la quantité de sable de la formule.

Hormis les formules F5 et F2, entre  $0 \mu m - 300 \mu m$ , nous notons une réduction du Sq et du Vmp avec le polissage. Pour la formule F2, elle n'est remarquée qu'entre  $100 \mu m - 300 \mu m$  et entre  $0 \mu m - 50 \mu m$  pour la formule F5. Ces deux formules sont les seules qui ne contiennent pas du sable et qui contiennent le plus de filler. Les réductions observées entre  $0 \mu m - 300 \mu m$  sont plus grandes pour les formules contenants du sable.

Entre  $300 \ \mu m - 500 \ \mu m$ , nous notons une augmentation du Sq et du Vmp pour les formules F2, F6, F1, F5 et F3. La réduction de ces deux paramètres est remarquée comme dans la gamme d'échelles

précédente pour les formules F4, F4 bis et F7.

Pour les échelles comprises entre  $500 \ \mu m - 3000 \ \mu m$ , nous notons une augmentation du Sq et du Vmp pour les formules F1, F2, F3 et F6. Cette augmentation est plus grande respectivement pour les formules F2, F3, F1 et F6. Ces formules contiennent moins de sable (moins de 20% de sable) par rapport aux formules F4 et F7 pour lesquelles, nous avons une diminution du Sq et du Vmp pour toutes les échelles avec le polissage. Nous notons cependant une légère augmentation du Sq et du Vmp pour la formule F4 bis comparée à la formule F4 ayant la même composition granulométrique. L'utilisation d'un liant de qualité pour la formule F4 bis explique cette faible variation du Sq et du Vmp par rapport à la formule F4. Comparée à la formule F7, cette différence de comportement proviendrait de l'utilisation des granulats 4/6.

La diminution entre  $0 \mu m - 300 \mu m$  ainsi que l'augmentation entre  $300 \mu m - 3000 \mu m$  de ces deux paramètres de texture est associée au décapage du liant bitumineux [10, 93, 94] et du filler. La présence du bitume à la surface des granulats entraine un masquage de ces derniers. Le décapage progressif du liant dans les premières phases du polissage entraine la mise à nu des granulats expliquant l'augmentation de l'amplitude des échelles surtout les plus grandes. Ceci peut être remarqué sur les Figure 3.15 et Figure 3.16. Quand la formule contient beaucoup de sable, ce décapage du liant est accompagné par l'arrachement de ce dernier. Ceci est dû à sa fragilité (des minéraux de silices) par rapport aux autres granulats. Cet arrachement de ces granulats de sable entraine ainsi la réduction du Sq et du Vmp pour toutes les échelles.

Les Figure 4.32 et Figure 4.33 montrent la variation du Sq et du Vmp entre l'état de frottement maximal et 180 000 passages.



Figure 4.32 : Variation du Sq entre le frottement maximal et 180 000 passages



Figure 4.33 : Variation du Vmp entre le frottement maximal et 180 000 passages

Entre  $0 \mu m - 500 \mu m$ , nous avons une évolution variable du Sq et du Vmp. Nous notons une augmentation respectivement pour les formules F6, F2, F3 et F4. Une diminution est remarquée pour les formules F1, F4 bis, F5 et F7.

Entre 500  $\mu m$  – 3 000  $\mu m$  nous notons la réduction de ces deux paramètres sauf pour les formules F5 et F7. Elle est plus grande pour les formules pour lesquelles nous avions noté une augmentation dans la première phase.

Cette évolution variable est liée au décapage continu du liant bitumineux. Ceci peut être remarqué sur la Figure 4.34 pour la formule F7 et la Figure 3.16 pour la formule F5.



Figure 4.34 : Décapage continu du liant sur la formule F7

Ce décapage continu explique d'une part l'augmentation du Sq et du Vmp de certaines formules.

D'autre part, l'augmentation est due à la recréation de la texture due aux fragments arrachés lors du polissage. Ces derniers peuvent provoquer des rayures ou être compactés sur la surface créant ainsi de nouvelles vallées et de nouveaux sommets. Cela peut être remarqué sur l'évolution multiéchelle de la texture et la distribution des hauteurs de la formule F5 sur les Figure 4.35 et Figure 4.36.



Figure 4.35 : Evolution multiéchelle de la texture , F5, zone 1



Figure 4.36 : Distribution des hauteurs, F5, zone

L'évolution multiéchelle de la texture pour toutes les formules est présentée en annexe D.2. Ce décapage est associé à un aplanissement progressif de la surface. En effet, une fois le liant bitumineux décapé, les granulats subissent une usure sous l'action du polissage. Ceci explique la grande diminution du Sq et du Vmp des formules F1, F2 et F3 pour lesquelles nous avions une augmentation due au décapage dans la première phase de polissage.

#### Evolution multiéchelle du Sds (densité des sommets) et Sfd (dimension fractale)

Les Figure 4.37, Figure 4.38, Figure 4.39, Figure 4.40 et Figure 4.41 montrent l'évolution multiéchelle du Sds pour toutes les formules d'enrobés bitumineux avec le polissage.



Figure 4.37 : Evolution multiéchelle du Sds pour enrobés bitumineux

Nous notons de faibles variations du Sds avec le polissage. Sur la Figure 4.37, les plus grandes variations sont remarquées pour les très petites échelles notamment entre  $0 \mu m - 50 \mu m$ . Nous notons une diminution du Sds avec le polissage.



Figure 4.38 : Evolution multiéchelle du Sds pour enrobés bitumineux, zoom entre  $0 \mu m - 50 \mu m$ Entre  $0 \mu m - 50 \mu m$  nous notons des grandes variations du Sds pour les échelles inférieures à  $10 \mu m$ , associée au décapage du liant et du filler. Pour toutes les formules, les variations maximales sont remarquées entre l'état initial et l'état de frottement maximal. Au-delà de  $10 \mu m$ , il n'y a pas de variation du Sds.





Figure 4.39 : Evolution multiéchelle du Sds pour enrobés bitumineux, zoom entre  $50 \ \mu m - 200 \ \mu m$ Entre  $200 \ \mu m - 500 \ \mu m$ , nous notons la quasi-constance du Sds pour toutes les formules avec le



Figure 4.40 : Evolution multiéchelle du Sds pour enrobés bitumineux, zoom entre  $200 \ \mu m - 500 \ \mu m$


Figure 4.41 : Evolution multiéchelle du Sds pour enrobés bitumineux, zoom entre  $500 \ \mu m - 3 \ 000 \ \mu m$ 

La même tendance est observée pour les autres échelles avec une variation très faible du Sds surtout pour les formules F4, F4 bis et F7. Ces faibles variations sont en partie dues à la qualité des granulats utilisés dans la formulation des enrobés. En effet, le granulat utilisé est de la même qualité que celui utilisé pour la formule S5 dont on avait de faibles variations.

Les mêmes observations sont faites pour le Sfd représenté sur les Figure 4.42, Figure 4.43, Figure 4.44 et Figure 4.45.



Figure 4.42 : Evolution multiéchelle du Sfd pour enrobés bitumineux

Comme pour le Sds, des zooms sont faits sur les différentes gammes d'échelles pour analyser l'évolution du Sfd avec le polissage.



Figure 4.43 : Evolution multiéchelle du Sfd pour enrobés bitumineux, zoom entre  $0 \mu m - 50 \mu m$ 

Entre  $0 \mu m - 50 \mu m$ , les grandes variations multiéchelles du Sfd sont remarquées pour les formules contenant les granulats 1/2 (F1, F2 et F5). Nous avons une augmentation du Sfd entre l'état initial et l'état de frottement maximal. Après cet état de polissage, la variation du Sfd est faible.



Figure 4.44 : Evolution multiéchelle du Sds pour enrobés bitumineux, zoom entre  $50 \mu m - 500 \mu m$ 

Entre 50  $\mu m$  – 500  $\mu m$ , la variation du Sfd est plus grande. L'évolution du Sfd avec le polissage n'est pas uniforme pour toutes les formules. Nous notons une augmentation entre l'état initial et l'état de frottement maximal pour les formules F1 (entre 50  $\mu m$  – 200  $\mu m$ ), F2, F3 et F4. Après cet état de polissage, nous notons une diminution du Sfd. Pour les formules F1 (entre 200  $\mu m$  – 500  $\mu m$ ), F5, F6 et F7, nous avons une diminution du Sfd avec le polissage. De faibles variations sont remarquées pour la formule F4 bis.



Figure 4.45 : Evolution multiéchelle du Sds pour enrobés bitumineux, zoom entre  $500 \ \mu m - 3 \ 000 \ \mu m$ La variabilité d'évolution du Sfd est aussi remarquée entre  $500 \ \mu m - 3 \ 000 \ \mu m$ . Une faible évolution du Sfd est remarquée avec le polissage.

L'évolution variable du Sds et du Sfd pour les différentes formules d'enrobés est liée à leurs formulations : plusieurs granulats et le liant bitumineux.

Le polissage entraine, comme vu sur les courbes d'évolution du Sq et du Vmp, la diminution des petites échelles  $0 \mu m - 300 \mu m$ . Cette diminution est liée à l'arrachement des aspérités et au décapage du liant bitumineux. Quand la formule ne contient pas beaucoup de sable, entre l'état initial et l'état de frottement maximal, ce décapage entraine l'apparition de nouvelles échelles et ainsi de nouveaux sommets. En présence d'une grande quantité de sable, nous avons noté la diminution de toutes les échelles avec le polissage. Cela est due au polissage qui entraine une usure du sable. En fonction de la formation et du flux de débris arrachés, des compactages peuvent se produire sur la surface de l'échantillon lors du polissage. Cela entraine une recréation de la texture. Tous ces phénomènes, combinés à la dureté du granulat utilisé, permettent de maintenir une quasi-constance de la densité des sommets (Sds) et de la dimension fractale (Sfd).

## Evolution multiéchelle du Sdq (pente quadratique moyenne) et Ssc (courbure des sommets)

L'évolution multiéchelle du Sdq est représentée sur les Figure 4.46, Figure 4.47 et Figure 4.48.



Figure 4.46 : Evolution multiéchelle du Sdq pour enrobés bitumineux

Un zoom est fait sur la Figure 4.47 entre  $0 \mu m - 500 \mu m$  et sur la Figure 4.48 entre  $500 \mu m - 3000 \mu m$ .



Figure 4.47 : Evolution multiéchelle du Sdq pour enrobés bitumineux, zoom entre  $0 \mu m - 500 \mu m$ 



Figure 4.48 : Evolution multiéchelle du Sdq pour enrobés bitumineux, zoom entre  $500 \ \mu m - 3 \ 000 \ \mu m$ Entre  $0 \ \mu m - 300 \ \mu m$ , nous notons une diminution du Sdq. Les plus grandes variations sont remarquées entre l'état initial et l'état de frottement maximal. Entre  $300 \ \mu m - 3 \ 000 \ \mu m$ , comme pour le Sq et le Vmp, nous remarquons une légère augmentation du Sdq entre l'état initial et l'état de frottement maximal Dur les formules contenant peu de sable. La Figure 4.49 montre l'évolution du Sdq entre ces deux états pour toutes les formules.



Figure 4.49 : Variation du Sdq entre l'état initial et le frottement maximal

Les variations multiéchelles du Sdq sont à l'image de ceux du Sq et du Vmp. Pour les échelles inférieures à  $300 \,\mu m$ , nous notons la diminution du Sdq hormis pour les formules F5 et F2. L'augmentation du Sdq est remarquée pour des échelles supérieures à  $300 \,\mu m$  respectivement pour les formules F2, F3, F1, F6. Dans cette gamme d'échelles, la quasi-constance est remarquée pour la formule F4 bis. La réduction du Sdq est remarquée pour les formules F4, F5 et F7.

La variation du Sdq entre l'état de frottement maximal et 180 000 est représentée sur la Figure 4.50 pour toutes les formules d'enrobés.



Figure 4.50 : Variation du Sdq entre le frottement maximal et 180 000 passages

Les mêmes évolutions sont remarquées comme dans le cas du Sq et du Vmp. La même analyse est faite sur les courbes d'évolution multiéchelle du Ssc représentées sur les Figure 4.51, Figure 4.52, Figure 4.53 et Figure 4.54.



Figure 4.51 : Evolution multiéchelle du Ssc pour enrobés bitumineux

Un zoom est fait entre  $0 \mu m - 500 \mu m$  sur les Figure 4.52 et Figure 4.53 et entre  $500 \mu m - 3000 \mu m$  sur la Figure 4.54.



5 × 10<sup>-3</sup> \*---0 ▲--- 5000 ⊖--- 90 000 ∢--- 180 000 - 0 - 5000 - 90 000 - 180 000 - 0 - 4000 - 90 000 - 180 000 \* Ssc (Courbure, /µm) Ssc (Courbure, /µm) Ssc (Courbure, /µm) (mul/ Ssc (Courbure, N 6 0 L 50 0 50 0 50 0 50 250 350 Echelles (µm) 150 250 350 Echelles (µm) 450 150 250 350 Echelles (µm) 450 150 250 350 Echelles (µm) 450 150 450 5 × 10<sup>-3</sup> F4 bis 5 × 10<sup>-3</sup> F5 5 × 10<sup>-3</sup> 5 × 10<sup>-3</sup> F7 F6 Ssc (Courbure, /µm) Ssc (Courbure, /µm) Ssc (Courbure, /µm) (mrl/ Ssc (Courbure, v v 0 50 0 50 0 50 0 50 250 350 Echelles (µm) 250 350 Echelles (µm) 150 450 150 250 350 Echelles (µm) 250 350 Echelles (µm) 150 450 150 450 450

Figure 4.52 : Evolution multiéchelle du Ssc pour enrobés bitumineux, zoom entre  $0 \mu m - 50 \mu m$ 

Figure 4.53 : Evolution multiéchelle du Ssc pour enrobés bitumineux, zoom entre  $50 \ \mu m - 500 \ \mu m$ 



Figure 4.54 : Evolution multiéchelle du Ssc pour enrobés bitumineux, zoom entre  $500 \mu m - 3000 \mu m$ 

Entre  $0 \mu m - 300 \mu m$ , nous notons une diminution générale du Ssc. La variation maximale est remarquée entre  $0 \mu m - 200 \mu m$ . Cette variation est plus grande quand la formule contient du sable. Dans la majorité des cas (sauf F1 et F2), les variations maximales sont remarquées entre l'état initial et l'état de frottement maximal. Les variations du Ssc entre ces deux états sont représentées sur la Figure 4.55.



Figure 4.55 : Variation du Ssc entre l'état initial et le frottement maximal entre

Nous notons les mêmes variations qu'avec le Sq, Vmp et le Sdq. L'augmentation du Ssc entre l'état initial et l'état de frottement maximal, comme dans le cas du Sdq est aussi remarquée pour les échelles comprises entre  $300 \ \mu m - 3 \ 000 \ \mu m$ .

Les variations entre l'état de frottement maximal et 180 000 passages sont représentées sur la Figure 4.56.



Figure 4.56 : Variation du Ssc entre le frottement maximal et 180 000 passages

La variation du Ssc est à l'image du Sdq. Entre  $0 \mu m - 300 \mu m$ , en dehors des formules F2 et F3, nous notons la diminution du Sdq due au polissage. L'augmentation observée pour les formules F2 et F3 entre  $0 \mu m - 300 \mu m$  et entre  $300 \mu m - 3 000 \mu m$  pour les formules F7, F5 et F1 est associée au décapage continu du liant bitumineux et à la recréation de la texture.

### > Conclusion

En conclusion, nous pouvons noter la similarité d'évolution multiéchelle des paramètres de texture tels que le Sq, le Vmp, le Sdq et le Ssc comme dans le cas des mosaïques de granulats. L'analyse multiéchelle permet d'étudier les différents phénomènes impliqués dans l'évolution de l'adhérence des enrobés bitumineux : le décapage et l'usure.

Entre l'état initial et le frottement maximal, nous notons une augmentation de ces paramètres pour les formules contenant moins de sable (moins de 20%). Entre  $0 \ \mu m - 300 \ \mu m$ , cette augmentation n'est remarquée que pour les formules ne contenant pas de sable (F2 et F5). Entre  $300 \ \mu m - 3000 \ \mu m$ , cette augmentation est remarquée respectivement sur les formules F2, F3, F1, F5 et F6.

Cette augmentation est liée au décapage du liant bitumineux et du filler entrainant la mise à nu des granulats. Quand la formule contient beaucoup de sable, ce décapage du liant est accompagné par l'usure de ce dernier, expliquant ainsi la diminution des paramètres multiéchelles pour les formules F4, F4 bis et F7.

Cette analyse peut être faite en parallèle avec l'augmentation du frottement illustrée sur la Figure 4.57.



Figure 4.57 : Pourcentage d'augmentation du frottement par rapport à l'état initial

L'augmentation du frottement est plus grande pour les formules F2, F3 et F1. Elle est plus faible pour les formules F4 bis, F4 et F7. Les formules ayant la plus grande augmentation de frottement sont celles dont nous notons une grande augmentation du Sq, Vmp, Sdq et du Ssc.

Entre l'état de frottement maximal et 180 000 passages, nous notons en majorité une diminution des paramètres de texture. L'augmentation observée pour certaines formules F7 et F5 est due à l'aplanissement progressif de la surface combiné au décapage continu du liant bitumineux et au compactage des débris arrachés.

Le Sds et le Sfd varie très peu avec le polissage. Les plus grandes variations sont remarquées pour les petites échelles,  $0 \ \mu m - 50 \ \mu m$ . Une diminution de ces dernières est remarquée et est associée au polissage. Au-delà de cette gamme d'échelles, la quasi-constance est remarquée. Ceci est associé à la recréation de la texture induite par le polissage : compactage et rayures provoquées par les fragments arrachés.

## 4.2.2. Corrélation multiéchelle entre les paramètres de texture et le frottement pour les enrobés bitumineux

Une corrélation (quadratique pour tenir compte de l'évolution des paramètres de texture en fonction de la composition granulométrique) a été faite entre les paramètres multiéchelles et le frottement pour les différentes phases de polissage. Les paramètres multiéchelles ont été normalisés par rapport à leurs valeurs maximales.

Le résultat de cette corrélation dans la phase de décapage (entre l'état initial et le frottement maximal) est montré sur la Figure 4.58.



Figure 4.58 : Corrélation multiéchelle dans la phase de décapage pour les enrobés bitumineux

Dans cette phase, la similarité d'évolution du Sq, Vmp, Sdq et Ssc se reflète à travers les mêmes valeurs de coefficients de corrélation avec l'augmentation du frottement. L'augmentation du frottement est corrélée à la diminution de ces paramètres entre  $0 \ \mu m - 300 \ \mu m$  et à leur augmentation entre  $300 \ \mu m - 3 \ 000 \ \mu m$ . Dans la gamme d'échelle  $0 \ \mu m - 300 \ \mu m$ , la diminution des petites échelles (<50 \ \mumma) est celle qui explique le mieux l'augmentation du frottement. La diminution de ces échelles est associée au décapage du liant bitumineux et du filler. Il en est de même de la gamme  $50 \ \mu m - 300 \ \mu m$ . Ce décapage entraine la mise à nu des granulats augmentant les échelles supérieures à  $300 \ \mu m$  et augmente le relief de la texture. Ceci augmente la déformation du pneu et ainsi la perte d'énergie par déformation et donc du frottement.

La corrélation est faible pour le Sds et le Sfd sauf pour les échelles inférieures à  $50 \ \mu m$ . Dans cette gamme, la corrélation est très variable. Cette variabilité est liée à la complexité des surfaces des enrobés due à la présence du liant bitumineux pouvant occasionner le compactage des débris arrachés.

Le résultat de cette corrélation dans la phase d'usure (entre le frottement maximal et 180 000) est montré sur la Figure 4.59.



Figure 4.59 : Corrélation multiéchelle dans la phase d'usure pour les enrobés bitumineux

Dans cette phase, c'est le Sq, le Vmp, le Sdq et le Ssc qui ont les plus grandes corrélations avec le frottement pour toutes les échelles. La diminution du frottement est corrélée avec la diminution de ces paramètres. Comme dans le cas des mosaïques de granulats, elle est plus grande pour les échelles inférieures à 500  $\mu m$ . La diminution du frottement est aussi liée à la diminution du Sds et du Sfd pour les échelles supérieures à 100  $\mu m$ .

## 4.3. Conclusion

L'analyse multiéchelle a démontré sa capacité à décrire le polissage des mosaïques de granulats et des enrobés bitumineux.

Pour les mosaïques de granulats, elle permet de suivre l'évolution des paramètres multiéchelles avec le polissage en fonction de la dureté et de la composition minéralogique des granulats. Elle permet d'observer les phénomènes d'usure générale, différentielle et de micro-usinage que subissent les granulats. La diminution de l'adhérence avec le polissage est essentiellement attribuée à la diminution du Sq, Sdq, Ssc et du Vmp des échelles inférieures à  $500 \ \mu m$ . La diminution de ces échelles entraine un aplanissement progressif de la surface des granulats et la disparition des arêtes vives. Cet aplanissement, associé aux petites échelles (inférieures à  $50 \ \mu m$ ) générées par le micro-usinage, limite la perte d'énergie par déformation de la gomme et ainsi entraine la diminution de l'adhérence. Les échelles comprises entre  $500 \ \mu m - 1 \ 000 \ \mu m$  sont aussi importantes dans le maintien d'un bon niveau de frottement. Cette dernière gamme d'échelles permet d'avoir un bon relief.

Pour les enrobés bitumineux, l'analyse multiéchelle permet de suivre les phénomènes de décapage du liant bitumineux et la mise à nu des granulats, puis l'usure de ces derniers. Cette analyse dépend de la composition granulométrique des différentes formules. Ainsi, le décapage, quand la formule contient peu de sable (inférieur à 20%), nous observons la diminution du Sq, Sdq, Ssc et du Vmp pour les échelles inférieures à  $300 \ \mu m$ . Une augmentation de ces paramètres multiéchelles est observée pour les échelles supérieures à  $300 \ \mu m$ , ce qui traduit une augmentation du relief. Quand la formule contient beaucoup de sable et des granulats fragiles, ce décapage est associé à une usure de ces derniers entrainant la diminution des paramètres multiéchelles pour toutes les échelles. Pour toutes les formules, la diminution des échelles inférieures à  $50 \ \mu m$  et l'augmentation des autres échelles sont les phénomènes qui expliquent au mieux l'augmentation du frottement. Dans la phase d'usure, nous observons la diminution des paramètres multiéchelles. Comme dans le cas des mosaïques, la diminution des échelles inférieures à  $500 \ \mu m$  expliquent la diminution de l'adhérence.

En complément de cette analyse, un modèle de contact multiéchelle est développé dans la partie 5 pour quantifier le poids des différentes échelles dans les niveaux d'adhérence et son évolution.

## 5. Modélisation physique de l'adhérence

Cette partie traite de la modélisation développée dans le cadre de cette thèse. L'objectif est de prédire numériquement l'adhérence gomme/chaussée et de quantifier l'effet des différentes échelles de texture sur l'adhérence. Le modèle de contact utilisé est basé sur la théorie du massif semi-infini. Ce modèle permet de prendre en compte l'aspect multi-aspérités du contact.

Il fait l'hypothèse du contact entre un indenteur très petit et rigide et un corps déformable infini par rapport à l'indenteur. 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 plusieurs points de contact [11, 12, 15].

Nous faisons l'hypothèse que les pentes des corps en contact sont assez faibles pour pouvoir approcher leurs surfaces dans le plan (x, y) et nous nous plaçons dans le domaine des petites déformations.

Ce modèle prend en données d'entrée la surface de la chaussée ainsi que les propriétés viscoélastiques du pneu. En sortie du modèle, nous disposons du champ des pressions de contact, des déplacements au niveau de chaque aspérité et de l'aire réelle de contact.

La théorie des potentiels utilisée par [98–101] pour déterminer les champs de pression et de déplacement pour tout type de chargement est utilisée dans notre étude.

Dans la suite de ce chapitre, la résolution du problème de contact pour un chargement normal en élasticité et viscoélasticité sera détaillée. Ces modèles seront utilisés pour analyser l'effet des échelles de texture sur les paramètres de contact (pressions, déplacements et aires de contacts).

## 5.1. Modèle de contact élastique

Nous considérons deux corps 1 et 2 définis dans le repère orthogonal Oxyz par  $z_1(x, y)$  et  $z_2(x, y)$  représenté sur la Figure 5.1.



Figure 5.1 : Géométrie du contact[102]

L'écart entre ces deux corps est défini par l'équation (5.1) :

$$h_{i}(x, y) = |z_{1}(x, y) - z_{2}(x, y)|$$
(5.1)

Le déplacement élastique généré par l'application d'une pression p(x, y) au point (x, y) est calculé en utilisant la fonction de Green Gel(x, y) pour l'espace semi-infini élastique [98] définie par l'équation (5.2) :

$$u(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} Gel(x-x',y-y')p(x',y')dx'dy', Gel(x,y) = \frac{1-\nu}{2\pi G\sqrt{x^2+y^2}}$$
(5.2)

*G* est le module de cisaillement du matériau élastique. Gel(x, y) représente le déplacement normal induit au point (x, y) par une force unitaire concentrée à l'origine du plan suivant l'axe  $\vec{z}$ .

L'intégrale est résolue de façon semi-analytique en discrétisant le plan en plusieurs cellules et en considérant la distribution de pression constante sur chaque cellule.

Chaque cellule est représentée par son milieu, par les indices (i, j).Le plan entier est discrétisé en (nx, ny) cellules. La taille de chaque cellule est de  $dx \times dy$ , dx et dy étant les pas d'échantillonnage en x et y.

Ainsi, p(i,j) correspond à la pression au centre de la cellule (i,j), i = 1, ..., nx, j = 1, ..., nx. La pression peut alors être factorisée de l'intégrale de l'équation (5.2).

L'intégrale de Green sur une cellule de taille  $dx \times dy$  donne les coefficients d'influence définis par l'équation (5.3):

$$IC_{el}(i-k, j-l) = \int_{y(l)-\frac{dy}{2}}^{y(l)+\frac{dy}{2}} \int_{x(k)-\frac{dx}{2}}^{x(k)+\frac{dx}{2}} G(x-x', y-y') p(x', y') dx' dy'$$
(5.3)

 $IC_{el}(i - k, j - l)$  représente le déplacement au centre de la cellule (i, j) induit par une pression de valeur  $\frac{1}{dx \times dy} Pa$  au centre de la cellule (k, l). La solution de cette intégrale est donnée par [103], équation (5.4) :

$$IC_{el}(i,j) = \frac{1-\nu}{2\pi G} \begin{pmatrix} f\left(x(i) + \frac{dx}{2}, y(j) + \frac{dy}{2}\right) + f\left(x(i) - \frac{dx}{2}, y(j) - \frac{dy}{2}\right) \dots \\ -f\left(x(i) - \frac{dx}{2}, y(j) + \frac{dy}{2}\right) - f\left(x(i) + \frac{dx}{2}, y(j) - \frac{dy}{2}\right) \end{pmatrix}$$
(5.4)

Avec  $f(x,y) = xln(y + \sqrt{x^2 + y^2}) + yln(x + \sqrt{x^2 + y^2})$ . Ainsi, l'équation (5.2) prend la forme de l'équation (5.5) :

$$u(i,j) = \sum_{k=1}^{nx} \sum_{l=1}^{ny} IC_{el}(i-l,j-l) p(k,l)$$
(5.5)

Il s'agit d'une double convolution entre les coefficients d'influence et la pression. Elle est réalisée en utilisant la transformée de Fourrier discrète qui permet un calcul plus rapide  $O((nx \times ny)ln(nx \times ny))$  comparé à la double convolution  $O((nx \times ny) \times (nx \times ny))$  [104, 105]. La méthode de la convolution discrète en association avec la transformée de Fourier discrète (DC-FFT) définie par [104] est utilisée. Elle permet d'éviter l'erreur numérique due à la discrétisation spatiale dans un domaine fini et discret par rapport à la convolution continue dans un domaine infini.

La convolution discrète circulaire de  $z = x \otimes h$  est définie à partir de la fonction de Heaviside. La fonction de Heaviside est définie par l'équation (5.6) :

$$H(x) = \begin{cases} 0, x < 0\\ 1, x \ge 0 \end{cases}$$
(5.6)

La convolution discrète circulaire est définie par l'équation (5.7) :

$$z_{j} = \sum_{r=1}^{nx} x_{r} h_{j-r+NH(r-j)}$$
(5.7)

Avec x et h ayant le même nombre de termes  $j \in [1, nx]$ . La fonction de Heaviside est active lorsque j - r < 0 permettant d'éviter un indice négatif. L'indice négatif est remplacé dans ce cas par j - r + nx + 1. Cette opération introduit une périodicité circulaire. Dans l'espace de Fourier, cette convolution est équivalente à un simple produit matriciel  $z = TF^{-1}(\hat{x} \times \hat{h})$ . A représente la transformée de Fourier et  $TF^{-1}$  la transformé inverse de Fourier.

L'application de cette méthode à notre problème de contact induit une erreur résultante de la non périodicité des matrices à convoluer. Cela entraine un problème de recouvrement comme illustrer sur la Figure 5.2.



Figure 5.2 : Périodicité et recouvrement [105]

Ce recouvrement donne des résultats erronés par rapport à la solution réelle. Pour résoudre ce problème, La taille de la matrice des pressions est doublée en utilisant le zero-padding  $(p(1:nx, 1:ny) \rightarrow p(1:2 \times nx, 1:2 \times ny))$  [104]. Cela se fait en ajoutant des zéro à la matrice des pressions pour les termes  $(nx + 1:2 \times nx, ny + 1:2 \times ny)$ ,  $p(nx + 1:2 \times nx, ny + 1:2 \times ny) = 0$ . Cela est illustré sur la Figure 5.3.



Figure 5.3 : Zero-padding pour éviter le recouvrement [105]

C'est la solution utilisée par [104]. Dans son cas, les coefficients d'influence sont échantillonnés dans le domaine fréquentiel. Dans notre cas, étant donné que les coefficients d'influence sont échantillonnés dans le domaine spatial avant la transformé de Fourier, il apparaît donc une erreur d'aliasing ou de crénelage [104, 105] ou de repliement de spectre. De plus, nous pouvons noter une annulation des coefficients d'influence due à l'augmentation de la taille de la matrice des pressions. Pour résoudre ce problème, [105] utilise la technique du wrap-around.

La taille de la matrice des coefficients d'influence est doublée  $(IC(1:nx, 1:ny) \rightarrow IC(1:2 \times nx, 1:2 \times ny))$ . Les coefficients d'influences sont calculés sur la zone (1:nx, 1:ny). Les coefficients d'indices x = nx + 1 ou y = ny + 1, sont mis égal à 0. Les coefficients de  $(nx + 2:2 \times nx, ny + 2:2 \times ny)$  sont obtenus à partir des coefficients de (2:nx, 2:ny) mais rangés dans le sens inverse.

Après ces deux opérations, la transformée de Fourier est faite sur ces deux matrices. La convolution devient un produit de matrice dans l'espace de Fourier défini par l'équation (5.8) :

$$U = IC_{el} (1: 2 \times nx, 1: 2 \times ny) \times p(1: 2 \times nx, 1: 2 \times ny)$$
(5.8)

U représente la transformée de Fourier du déplacement. Il est de taille  $(1:2 \times nx, 1:2 \times ny)$ . Le déplacement est obtenu en faisant la transformée inverse de Fourier et en ne conservant que les termes (1:nx, 1:ny):

$$u1 = TF^{-1}(U), u = u1(1:nx, 1:ny)$$
(5.9)

Une méthode d'optimisation basée sur l'algorithme du gradient conjugué [15, 106] est utilisée pour trouver la solution du problème de contact entre deux corps. Le problème de contact est défini par les équations (5.10) à (5.14) :

$$dx \times dy \times \sum_{i=1}^{nx} \sum_{j=1}^{ny} p(i, j) = W$$
(5.10)

$$r(i,j) = h_i(i,j) + u(i,j) - w, (i,j) \in A$$
(5.11)

$$p(i, j) > 0, h(i, j) = 0, (i, j) \in Ac$$
 (5.12)

$$p(i,j) = 0, h(i,j) > 0, (i,j) \epsilon A - Ac$$

$$(5.13)$$

$$\sum_{k=1}^{nx} \sum_{l=1}^{ny} IC_{el}(i-l,j-l) p(k,l) = u(i,j), (i,j) \in A$$
(5.14)

w représente le déplacement de corps solide et W la force appliquée. A représente la surface totale discrétisée et Ac la surface effective de contact. r représente l'écart entre les surfaces déformées. Les différentes étapes de la méthode du gradient conjugué sont détaillées ci-dessous :

- Etape 1 : une initialisation des variables auxiliaires de l'algorithme est faite :

$$\theta = 0, R_{old} = 1, d(i, j) = 0, p_{old}(i, j) = 0, (i, j) \in A$$
(5.15)

- Etape 2 : une première estimation de la pression est faite. On considère que toutes les cellules sont en contact. Ainsi, la pression est définie par l'équation (5.16) :

$$p(i,j) = \frac{W}{nx \times dx \times ny \times dy}, (i,j) \in A = Ac$$
(5.16)

Une initialisation avec des pressions nulles ne permet pas d'utiliser cette méthode pour la résolution du problème de contact. Cela apporte des singularités dans les opérations mathématiques.

- Etape 3 : le déplacement est calculé dans cette étape en utilisant les équations (5.8) et (5.9)
- Etape 4 : le déplacement de corps rigide est ensuite évalué par l'équation (5.17) :

$$w = Moy(u(i, j) + h_i(i, j)), (i, j) \in Ac$$
(5.17)

*Moy* représente la moyenne arithmétique. Ainsi, l'équation (5.11) devient un système linéaire à résoudre. La méthode de résolution est itérative. L'itération pour la résolution du problème commence par la détermination de l'écart entre les surfaces déformées.

- Etape 5 : détermination de l'écart entre les surfaces déformées et de la norme Euclidienne de cet écart pour les points définit par l'ensemble  $D = \{(i, j) \in A : p(i, j) > 0\}$ 

$$r(i, j) = h_i(i, j) + u(i, j) - w \epsilon A; \ R = \sum_{(i, j) \in D} \left( r(i, j) \right)^2$$
(5.18)

 Etape 6 : la prochaine étape consiste à calculer la direction de descente de l'algorithme du gradient conjugué :

$$d(i,j) \leftarrow \begin{cases} r(i,j) - d(i,j) \times \theta \times \frac{R}{R_{old}}, (i,j) \in D \\ 0, (i,j) \in A - D \end{cases}$$
(5.19)

La flèche indique que la valeur est calculée à partir de la valeur de l'itération précédente. La valeur de  $R_{old}$  est mise à jour par la valeur  $R, R_{old} = R$ .

- Etape 7 : détermination de la longueur  $\alpha$  qui sera faite dans la direction de descente :

$$\alpha = \left(\sum_{(i,j)\in D} c(i,j) d(i,j)\right)^{-1} \sum_{(i,j)\in D} r(i,j) d(i,j)$$
(5.20)

c(i, j) est calculé par la convolution entre les coefficients d'influence et la direction de descente:

$$c(i,j) = \sum_{k=1}^{nx} \sum_{l=1}^{ny} IC_{el}(i-l,j-l)d(k,l), (i,j) \in A$$

$$c(i,j) \leftarrow c(i,j) - Moy(c(i,j); (i,j) \in D)$$
(5.21)

Après cette étape, l'ancienne valeur du champ de pression est enregistrée dans la variable  $p_{old}, p_{old}(i,j) = p(i,j), (i,j) \epsilon A$ .

- Etape 8 : la pression est recalculée par la formule définie par l'équation (5.22) :

$$p(i,j) \leftarrow p(i,j) - \alpha \times d(i,j), (i,j) \in D$$
 (5.22)

Les étapes 5 à 8 permettent de résoudre l'équation (5.11). Les équations (5.12) et (5.13) sont résolues dans les étapes suivantes.

- Etape 9 : les conditions définies par les équations (5.12) et (5.13) sont imposées. Les cellules ayant des pressions négatives sont remises à zéro. Soit  $M = \{(i, j) \in A : p(i, j) < 0\}$ :

$$Ac \leftarrow Ac - M, p(i, j) = 0, (i, j) \in M$$
(5.23)

Etape 10 : les corps sont considérés impénétrables. Donc les cellules ayant des pressions nulles, mais des écarts négatifs sont réintroduites dans l'aire de contact. Définissons *I* = {(*i*,*j*)*εA*: *p*(*i*,*j*) = 0, *r*(*i*,*j*) < 0} :</li>

$$Ac \leftarrow Ac \cup I - M, p(i, j) \leftarrow p(i, j) - \alpha \times r(i, j), (i, j) \in I$$
(5.24)

- Etape 11 : après l'étape 10, nous avons l'introduction de nouvelles cellules sur lesquelles l'optimisation n'a pas été faite. Ainsi, une nouvelle direction de descente sera recherchée à l'itération suivante. Si l'ensemble *I* est vide, alors  $\theta = 0$ , sinon,  $\theta = 1$ .
- Etape 12 : la condition d'équilibre statique définie par l'équation (5.10) est appliquée :

$$p(i,j) \leftarrow p(i,j) \times W \left( dx \times dy \times \sum_{i=1}^{nx} \sum_{j=1}^{ny} p(i,j) \right)^{-1}$$
(5.25)

- Etape 13 : la convergence en fonction de la précision  $\varepsilon$  de calcul est vérifiée :

$$W^{-1} \times dx \times dy \sum_{(i,j) \in Ac} \left| p(i,j) - p_{old}(i,j) \right| \le \varepsilon$$
(5.26)

Si la convergence n'est pas atteinte après cette étape, une nouvelle itération est faite en partant de l'étape 3.

Cette méthode est appliquée à un problème de contact classique pour vérifier l'exactitude de la

solution numérique : une demi-sphère rigide de rayon *R* et espace semi-infini élastique. Les propriétés de cet espace sont données par le coefficient de Poisson v = 0,3 et le module de Young E = 210 *GPa*. A partir de ces données, le module de cisaillement est calculé par la formule suivante :  $G = \frac{E}{2(1+v)}$ . Les résultats sont comparés à la solution de Hertz. La relation effort (*Fe* )/enfoncement ( $\delta$ ) est donnée par l'équation (5.27) :

$$Fe = \frac{4E^* R^{1/2} \delta^{3/2}}{3}$$
(5.27)

E\* représente le module composé des matériaux des deux solides. Il est calculé par la formule (5.28) :

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2}$$
(5.28)

Les indices 1 et 2 se réfèrent aux matériaux du solide 1 et 2,  $E_1 = E$ ,  $v_1 = v$ . Dans notre cas,  $E_2$  est supposé infini. Le calcul a été effectué pour une sphère de rayon  $R = 512 \ \mu m$  avec des pas de discrétisation  $dx = dy = 4 \ \mu m$ . Les résultats sont donnés sur la Figure 5.4 :





Le calcul numérique permet de retrouver les valeurs d'enfoncement analytiques calculées à partir du modèle de Hertz. Cela vient prouver l'exactitude du modèle de contact.

Le comportement viscoélastique de la gomme peut être introduit dans ce modèle de contact. Cette procédure est détaillée dans la section 5.2.

## 5.2. Prise en compte de la viscoélasticité

Les corps élastiques sont décrits par le module de cisaillement et le coefficient de Poisson. Pour les corps viscoélastiques, ces propriétés varient avec le temps et différents modèles permettent de les décrire.

Pour la modélisation du contact, nous nous plaçons dans le cas de la viscoélasticité linéaire. Ceci permet de faire l'hypothèse d'une constance de la pression entre chaque incrément de temps et de simplifier les calculs. Cela est réalisable en considérant un incrément de temps  $\Delta t$  très petit devant le temps de relaxation du matériau [12].

Cette hypothèse permet en outre d'appliquer le principe de superposition de Boltzmann qui stipule

que la réponse en déformation ou en contrainte à une application de déformation ou de contrainte à un temps t' est équivalente à la somme des réponses de ces charges appliquées séparément dans le temps avec  $0 \le t \le t'$ .

De plus, nous considérons le matériau incompressible. Ainsi, la loi de comportement déformation - contrainte en cisaillement est décrite pour la contrainte et la déformation déviatorique respectivement *s* et *e* définie par l'équation (5.29) :

$$s = 2Ge \tag{5.29}$$

*G* représente le module de cisaillement.

La réponse à une séquence de chargement arbitraire en contrainte ou en déplacement est décrite par la fonction de fluage (ou complaisance)  $\phi(t)$  et le module de relaxation  $\psi(t)$  en utilisant l'intégrale de Boltzmann définie par l'équation (5.30) :

$$s(t) = \int_{0}^{t} \psi(t-t') \frac{\partial e(t')}{\partial t'} dt', \quad e(t) = \int_{0}^{t} \phi(t-t') \frac{\partial s(t')}{\partial t'} dt'$$
(5.30)

Rappelons que le module de relaxation permet de décrire la réponse en contrainte suite à l'application d'une déformation constante  $\varepsilon_0$  à  $t \ge 0$ ,  $\psi(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0}$ . La fonction de fluage quant à elle décrit la réponse en déformation suite à l'application d'une contrainte constante  $\sigma_0$ ,  $\phi(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0}$ .

Ces deux fonctions sont interchangeables (équation (5.31)) :

$$\int_{0}^{t} \psi(t - t') \phi(t) dt' = t$$
(5.31)

Les paramètres de contact en viscoélasticité sont calculés à partir des paramètres de contact dans le domaine élastique en utilisant le principe de correspondance élastique/viscoélastique. Ce principe est celui utilisé par [107].

Ce principe stipule que dans le domaine de Laplace ou de Fourier, les équations en viscoélasticité sont équivalentes à celles en élasticité en omettant la variable de temps.

L'utilisation de ce principe dans notre étude passe par le changement des coefficients d'influence en élasticité par ceux en viscoélasticité. Comme décrit dans [108], le terme  $\frac{1}{2G}$  dans l'expression de la fonction de Green (équation(5.2)) est remplacé par la fonction de fluage  $\phi(t)$ .

Une discrétisation temporelle est nécessaire pour simuler l'effet mémoire du matériau. La fenêtre temporelle est divisée en Nt + 1 éléments avec  $Nt = \frac{t}{\Delta t}$ .

L'expression du déplacement à un temps  $\alpha \Delta t$  en l'adaptant à l'équation (5.2) [109] est donnée par l'équation (5.32) :

$$u(x, y, \alpha \Delta t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{G}(x - x', y - y') dx' dy'$$
  
 
$$\times \sum_{k=0}^{\alpha} \phi \left[ (\alpha - k) \Delta t \right] \times \left[ p(x', y', k) - p(x', y', k - 1) \right]$$
(5.32)

Avec  $\bar{G}(x, y) = \frac{1-\nu}{\pi\sqrt{x^2+y^2}}$ .

A t = 0 s, compte tenu de l'absence d'un historique de pression, le déplacement est calculé comme dans le cas élastique en utilisant  $\phi(0)$ . Il est nécessaire de stocker la pression calculée à chaque incrément de temps. Les équations (5.10) à (5.13) définissant le contact élastique sont adaptées au contact viscoélastique en introduisant la variable temporelle. A chaque incrément de temps, l'algorithme du gradient conjugué est utilisé pour résoudre le problème de contact. Le modèle de contact viscoélastique est appliqué au contact entre une demi-sphère rigide et un plan viscoélastique. Le plan viscoélastique est modélisé par un solide de Zener à une branche représenté par un ressort de rigidité G0 en série avec, un amortisseur de viscosité  $\eta 1$  en parallèle avec un ressort de rigidité G1 (Figure 5.5).



Figure 5.5 : Modèle de Zener

Dans ce cas, la fonction de fluage est définie par l'équation (5.33):

$$\phi(t) = \frac{1}{G0} + \frac{1}{G1} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau'}} \right), \tau' = \frac{\eta 1}{G1}, \tau = \frac{\eta 1}{G0 + G1}$$
(5.33)

Les valeurs des propriétés considérées sont les suivantes comme dans [12] :  $G0 = 1 MPa, G1 = 0,1 MPa, \tau' = 1 s, \tau = 0,09090 s$ . Nous appliquons sur la demi-sphère, comme dans l'étude de [12], une force  $W_0 = 0,02 mN$  à t = 0 s.

[12] a fait une étude de sensibilité du modèle en fonction de la discrétisation spatiale et temporelle. Les résultats de son étude sont présentés sur la Figure 5.6.



Figure 5.6 : Sensibilité du modèle à la discrétisation spatiale et temporelle

Les erreurs dues à ces discrétisations sont généralement faibles (inférieures à 0,1). Pour avoir une erreur sur le rayon calculé numériquement de 1%, nous avons pris des pas de discrétisation en x et y,  $dx = dy = 0,1 \,\mu m$ . Compte tenu du pas de discrétisation spatiale très petit, un petit rayon de la demi-sphère est considéré,  $R = 128 \,\mu m$  donnant une grille de (nx, ny) = (2560, 2560) points. Pour la discrétisation temporelle, nous avons  $\Delta t^* = 0, 25 \, s, dt = 1 \times 0, 015 \, s, dt \ll \tau$ . Le contact est simulé sur  $3 \, s$ .

Pour la validation du calcul numérique la solution analytique du rayon de contact définie par [110, 111] (équation (5.34) est utilisée :

$$a(t) = \left(\frac{3RW_0\phi(t)}{8}\right)^{1/3}$$
(5.34)

Le rayon de contact issu du calcul numérique est défini par l'équation (5.35):

$$anum(t) = \sqrt{\frac{Aire\,de\,contact}{\pi}} \tag{5.35}$$

L'aire de contact est définie par l'ensemble des cellules ayant une pression de contact non nulle. Le résultat de la simulation est présenté sur la Figure 5.7 :



Figure 5.7 : Validation du modèle de contact viscoélastique

L'erreur moyenne relative commise par le calcul numérique du rayon de contact est de 2%. Cette erreur faible, vient confirmer la précision du modèle de contact.

L'évolution du rayon de contact peut être divisée en deux parties, une partie transitoire pour  $t \le \tau'$  et une partie quasi-stationnaire pour  $t > \tau'$ . Cela peut aussi être remarqué sur l'évolution des pressions et des déplacements. Une coupe à y = R a été faite. Les déplacements et les pressions correspondantes sont présentés sur la Figure 5.8.



Figure 5.8 : Evolution de l'enfoncement et des pressions avec le temps

A t = 0 s, le résultat du calcul correspond au calcul élastique. Entre t = 0 s et t = 1 s, nous observons le régime transitoire avec une forte diminution de la pression maximale et une importante augmentation de l'enfoncement de la demi-sphère dans l'espace semi-infini viscoélastique.

Après t = 1 s, nous avons une faible évolution de la pression et du déplacement. Dans le régime quasi-stationnaire (ou stationnaire), nous avons la même forme des solutions en déplacements et en pressions que dans le calcul en élasticité. Ainsi, pour l'étude de l'effet des échelles de texture sur le

contact, pour diminuer les temps de calculs, nous utiliserons la solution élastique. La solution viscoélastique sera utilisée dans le calcul de l'adhérence pour tenir compte des régimes transitoire et quasi-stationnaire et des différentes pertes d'énergie correspondantes.

La suite de ce chapitre traitera de la caractérisation viscoélastique de la gomme de la machine Wehner&Schulze (section 5.3), de l'étude de l'effet des échelles de texture sur le contact (section 5.4), de la modélisation de l'adhérence (section 5.5) et du couplage du modèle d'adhérence et de la méthode de décomposition multiéchelle (section 5.6).

# 5.3. Caractérisation viscoélastique de la gomme de la machine Wehner&Schulze

Pour pouvoir avoir des résultats comparables aux mesures d'adhérence, nous avons besoin de connaitre les propriétés viscoélastiques de la gomme utilisée sur la machine Wehner&Schulze. L'introduction de ces propriétés dans notre modèle de contact se fait à travers la fonction de fluage (ou de relaxation). L'objectif de cette section est alors la détermination de la fonction de fluage et de relaxation de la gomme.

Les matériaux viscoélastiques présentent à la fois des propriétés de matériaux élastiques et visqueuses. Plusieurs modèles rhéologiques permettent de décrire leurs comportements. Celui le plus utilisé est celui de Maxwell [112].

C'est un modèle simple et robuste. Il est constitué d'un ressort de raideur *E* en série avec un amortisseur de viscosité  $\eta$  (Figure 5.9,a ).

L'utilisation d'une seule branche ne permet pas une bonne représentation de la viscosité des matériaux complexes comme le pneu. Ainsi, le modèle de Maxwell généralisé (Figure 5.9,b) est utilisé. Il est composé de plusieurs branches du modèle élémentaire en parallèle avec un ressort. Ce ressort permet de décrire le comportement du matériau aux temps infinis (grands).



Figure 5.9 : Modèle de Maxwell généralisé

Ce modèle peut être identifié par un essai de relaxation ou un essai dynamique (DMA, Analyse Mécanique Dynamique). L'essai DMA est plus complet, permettant d'avoir accès au module complexe, à la variation de ce module avec les fréquences et la température. De plus, il permet d'avoir le facteur de perte.

Un essai DMA est fait sur deux échantillons de gommes extraits des patins de la machine Wehner&Schulze. Les échantillons sont de forme cylindrique. La Figure 5.10 représente les échantillons ainsi que leurs dimensions.



Figure 5.10 : Echantillons de gomme [113]

En DMA, l'échantillon est soumis à un chargement oscillatoire. Le chargement dynamique appliqué sur les échantillons est un chargement uniaxial en traction/compression. Un déplacement dynamique d'amplitude  $\varepsilon_0 = 0,005 mm$  a été appliqué.

La forme de la déformation dynamique est donnée par l'équation (5.36) :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t) \tag{5.36}$$

t représente la variable temporelle et  $\omega$  la pulsation.

Cette sollicitation entraine une contrainte de la même forme sinusoïdale que la déformation, mais avec un déphasage  $\delta$ . Ce déphasage est dû à la viscoélasticité.

La forme de la réponse est donnée par l'équation (5.37) :

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \tag{5.37}$$

L'essai nous permet d'obtenir le module complexe dynamique de l'échantillon. L'essai a été fait pour différentes fréquences 1, 10, 20 *et* 50 *Hz* et différentes températures -10, 0, 10, 20 *et* 30°.

Le module complexe dynamique  $E^*$  est obtenu par l'équation (5.38) :

$$E^{*}(\omega) = \frac{\sigma_{0}}{\varepsilon_{0}} \left( \cos(\delta) + j\sin(\delta) \right)$$
(5.38)

*j* représente le nombre complexe. Ce module est composé d'une partie réelle  $E'(\omega)$  et d'une partie imaginaire  $E''(\omega)$  ayant pour expression :

$$E'(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos(\delta), E'(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin(\delta)$$
(5.39)

La partie réelle représente le module de stockage et la partie imaginaire représente le module de perte. Pour avoir la courbe complète dans le domaine fréquentiel le principe d'équivalence Temps/Température est utilisé pour avoir la courbe maitresse [114].

Ceci revient à décaler à partir d'une température de référence, les courbes du module complexe ayant une température inférieure à gauche et celle ayant une température supérieure à droite. Les résultats obtenus pour les deux échantillons sont représentés sur la Figure 5.11 :



Figure 5.11 : Module complexe dynamique [113]

L'écart entre les valeurs des deux échantillons est très faible, 3%. Dans la suite de cette section, une moyenne a été faite sur les valeurs des deux échantillons.

## 5.3.1. Détermination de la fonction de relaxation

Notre objectif est de déterminer la fonction de relaxation associée à notre matériau. En utilisant le modèle rhéologique généralisé de Maxwell, la fonction de relaxation peut être exprimée sous forme de série de Prony. Cette série est la forme discrète et finie de la série de Dirichlet [115, 116] et permet d'avoir des valeurs de propriétés mécaniques de la gomme à des instants finis.

L'expression de la fonction de relaxation est donnée par l'équation (5.40) [117] :

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^{n} E_{i} e^{-\frac{t}{\tau_{i}}}$$
(5.40)

 $E_{\infty}$  représente le module aux temps infini (temps final) ou aux très petites fréquences. *n* représente le nombre de branches du modèle.  $E_i$ ,  $\tau_i$  représentent respectivement la raideur de chaque branche et le temps de relaxation de chaque branche avec  $\tau_i = \frac{\eta_i}{E_i}$ .

Cette équation est équivalente dans le domaine fréquentiel à l'équation (5.41) [3] :

$$E'(\omega) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^{n} \frac{E_{i}\omega^{2}\tau_{i}^{2}}{1 + \omega^{2}\tau_{i}^{2}}, \quad E''(\omega) = \sum_{i=1}^{n} \frac{E_{i}\omega\tau_{i}}{1 + \omega^{2}\tau_{i}^{2}}$$
(5.41)

L'objectif est la détermination des paramètres  $E_i$ ,  $\tau_i n$  et  $E_{\infty}$ . Pour cela, une minimisation peut être faite en partant des valeurs mesurées pour trouver ces paramètres optimaux. Cela se résume à l'équation (5.42) [117–121] :

$$min = \frac{\left(E'_{mes}(\omega) - E'_{calc}(\omega)\right)^{2}}{\sigma\left(E'_{mes}(\omega)\right)} + \frac{\left(E''_{mes}(\omega) - E''_{calc}(\omega)\right)^{2}}{\sigma\left(E''_{mes}(\omega)\right)} + \frac{\left(tan(\delta)_{mes}(\omega) - tan(\delta)_{calc}(\omega)\right)^{2}}{\sigma\left(tan(\delta)_{mes}(\omega)\right)}$$
(5.42)

Les indices *mes* et *calc* font référence respectivement aux valeurs mesurées et à celles calculées ou estimées.  $\sigma(.)$  représente l'écart-type.

Plusieurs valeurs de branches sont testées. Pour chaque valeur de nombre de branches, des valeurs initiales de  $E_i$ ,  $\tau_i$  sont supposées. La minimisation permet de trouver des valeurs de  $E_i$ ,  $\tau_i$  optimales. Au final, le nombre de branches du modèle généralisé de Maxwell est celui qui permet d'avoir la plus petite erreur entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées.

Huit branches sont trouvées après l'optimisation. Le Tableau 5.1 donne les valeurs de rigidité du ressort ainsi que le temps de relaxation de chaque branche. La valeur à l'infini trouvée est  $E_{\infty} = 24 MPa$ .

Tableau 5.1 : Paramètres de la série de Prony pour la fonction de relaxation

$ au_i$ (S)	3,0E-08	3,1E-06	2,8E-05	2,9E-04	4,6E-03	6,0E-02	2,5E-01	3,1E+00
E <sub>i</sub> (MPa)	85,0	36,7	11,2	11,7	8,0	6,1	3,1	8,2

La comparaison entre les valeurs mesurées et celles calculées est représentée sur la Figure 5.12.



Figure 5.12 : Validation des paramètres de la série de Prony

La technique de minimisation adoptée permet d'avoir une erreur relative moyenne faible entre les valeurs mesurées et celles estimées de 3% pour E' (module réel), 8% pour E'' (module imaginaire) et de 9% pour tan( $\delta$ ) (facteur de perte).

La fonction de relaxation en traction/compression est alors donnée par l'équation (5.43) :

$$E(t)(MPa) = 24 + 85 \times e^{\left(\frac{-t}{3,0E-08}\right)} + 36,7 \times e^{\left(\frac{-t}{3,1E-06}\right)} + 11,2 \times e^{\left(\frac{-t}{2,8E-05}\right)} + 11,7 \times e^{\left(\frac{-t}{2,9E-04}\right)} + 8 \times e^{\left(\frac{-t}{4,6E-03}\right)} + 6,1 \times e^{\left(\frac{-t}{0,006}\right)} + 3,1 \times e^{\left(\frac{-t}{0,25}\right)} + 8,2 \times e^{\left(\frac{-t}{3,1}\right)}$$
(5.43)

La gomme a été supposée incompressible. Ainsi, son coefficient de poisson est v = 0,5. La fonction de relaxation en cisaillement peut être déterminée à partir de celle en traction. La formule correspondante est donnée par l'équation (5.44) :

$$\psi(t) = \frac{E(t)}{2(1+\nu)} \tag{5.44}$$

### 5.3.2. Détermination de la fonction de fluage

Comme pour la fonction de relaxation, la fonction de fluage peut être exprimée sous la forme de série de Prony. L'équation correspondante est l'équation (5.45) :

$$\phi(t) = \phi_0 + \sum_{i=1}^n \phi_i \left[ 1 - exp^{\left(-\frac{t}{w_i}\right)} \right]$$
(5.45)

 $\phi_0$  représente la complaisance instantanée.  $\phi_i$  représente la complaisance des *n* différentes branches.  $w_i$  représente les temps de retard des différentes branches.

La fonction de complaisance peut être obtenue à partir de la fonction de relaxation [122]. La relation

entre les deux fonctions est donnée par l'équation (5.31). Cette relaxation peut être exprimée dans l'espace de Laplace-Carson. Le problème de conversion est défini alors comme un problème d'optimisation.

L'algorithme d'interconversion est décrit dans [122]. Le même nombre de branches est considéré pour la fonction de complaisance. Le résultat de conversion est donné par le Tableau 5.2 :

$w_i(s)$	5,3E-08	4,6E-06	3,3E-05	3,6E-04	5,5E-03	7,0E-02	2,7E-01	4,1E+00
$\phi_i(/MPa)$	1,19E-02	1,32E-02	8,05E-03	1,18E-02	1,17E-02	1,20E-02	8,56E-03	3,23E-02

Tableau 5.2 : Paramètres de la série de Prony pour la fonction de fluage

La complaisance instantanée est : $\phi_0 = 1,55E - 02 / MPa$ . Ces résultats seront intégrés dans le modèle de contact décrit dans la section 5.2 pour la détermination de l'adhérence dans la section 5.5.

## 5.4. Influence des échelles de texture sur le contact élastique

Dans cette partie, le modèle élastique de contact est utilisé pour étudier l'effet des échelles de texture sur le contact.

Il est d'abord appliqué sur des surfaces contrôlées numériquement : surface composée de plusieurs demi-sphères (simuler la macrotexture et la microtexture), surfaces fractales (simuler l'effet multiéchelle de la texture routière).

L'intérêt de faire cette étude sur ces surfaces est de simplifier le problème dû à la complexité des surfaces réelles routières. Une variation des rayons et des dimensions fractales est faite pour simuler les différentes échelles de texture. Pour chaque surface générée, le paramètre Sq est contrôlé. La valeur utilisée est Sq =  $50 \ \mu m$ , pour se rapprocher des valeurs du Sq dans la section 3.4.

Il est ensuite appliqué sur les surfaces de mosaïques de granulats et d'enrobés bitumineux. Il sera couplé à la décomposition multiéchelle.

Le modèle élastique de la section 5.1 est appliqué en exemple au contact entre une demi-sphère rigide (représentant un granulat) et un plan élastique. La sphère a un rayon  $R = 512 \ \mu m$  (donc une échelle  $a = 1024 \ \mu m$ , dans la gamme de la macrotexture) avec des pas de discrétisation en x et en y de  $dx = dy = 1,95 \ \mu m$ .

Les propriétés du plan élastique choisies sont : coefficient de Poisson  $\nu = 0.5$  et module de Young  $E = E(\infty) = 24 MPa$ . Ces propriétés de matériau seront celles utilisées dans cette partie (section 5.4).

La géométrie de la demi-sphère est présentée sur la Figure 5.13.



Figure 5.13 : Géométrie de la demi-sphère

En appliquant une force F = 0,1 N, les résultats en champ de pression et déplacement sont donnés par la Figure 5.14 :



Figure 5.14 : Déplacements et pressions issus du contact entre une demi-sphère rigide et un plan élastique

Sur la Figure 5.14, nous remarquons une cohérence du résultat obtenu par rapport à la géométrie de la demi-sphère et du chargement. Les plus grandes pressions et déplacements sont obtenus au centre du plan où s'effectue le premier contact entre la demi-sphère et le plan.

## 5.4.1. Application du modèle de contact sur des surfaces contrôlées

Le modèle est ensuite appliqué à une surface composée de demi-sphères de rayon (plusieurs granulats)  $R = 300 \ \mu m$  (donc une échelle  $a = 600 \ \mu m$ , dans la gamme de la macrotexture), générée numériquement. La taille de la surface est de 2,1  $mm \times 2,1 \ mm$  avec des pas en x et y égal à  $dx = dy = 1,95 \ \mu m$  donnant une grille de (nx, ny) = (1228, 1228) points. La surface générée est représentée sur la Figure 5.15.



Figure 5.15 : Surface constituée de demi-sphères

Une force F = 0,1 N est appliquée sur cette surface. Les résultats en champ de pression et de déplacement sont donnés par la Figure 5.16.





Sur la Figure 5.16, nous notons une cohérence des résultats par rapport à la géométrie de la surface. La présence de plusieurs demi-sphères permet de mieux répartir la charge et de limiter l'enfoncement.

De la microtexture est ajoutée à cette surface de macrotexture constituée de demi-sphères de rayon  $R = 300 \ \mu m$ . Cela correspond à une échelle de texture de  $600 \ \mu m$ . Cette échelle est utilisée dans notre cas pour représenter la macrotexture.

Deux types de microtexture sont considérés : la microtexture constituée de demi-sphères et la microtexture fractale. Dans la suite, l'évolution des paramètres de contact tels que l'enfoncement maximal, la pression maximale et l'aire de contact en fonction des différents cas d'études est analysée.

#### Effet de l'ajout de la microtexture constituée de demi-sphères

Sept rayons  $(4 \ \mu m, 8 \ \mu m, 16 \ \mu m, 32 \ \mu m, 50 \ \mu m, 70 \ \mu m \text{ et } 80 \ \mu m)$  sont choisis dans la gamme d'échelles de la microtexture  $(0 \ \mu m - 500 \ \mu m, \text{ donc rayon} \le 250 \ \mu m)$ . Ces derniers sont choisis de manière à représenter les plus petites échelles de texture  $(0 \ \mu m - 200 \ \mu m)$ .

En exemple, la Figure 5.17 montre la surface obtenue suite à l'ajout d'une microtexture constituée de demi-sphères de rayon  $R_{micro} = 50 \ \mu m$ .



Figure 5.17 : Surface constituée de macrotexture et de microtexture à base de demi-sphères

Le modèle de contact est ensuite appliqué sur cette surface. Les résultats en champ de déplacement et pression dû à l'application d'une force F = 0.1 N sont représentés sur la Figure 5.18.



Figure 5.18 : Déplacements et pressions issus du contact entre une surface de demi-sphères rigide (macrotexture + microtexture) et un plan élastique

Nous notons une cohérence des résultats par rapport à la géométrie de la surface. L'ajout de la microtexture entraine une augmentation de l'enfoncement et de la pression maximale.

Le modèle de contact est ensuite appliqué pour l'ajout de plusieurs échelles de microtexture. Les résultats sont présentés sur la Figure 5.19. En abscisse, sont indiqués les rayons des demi-sphères ajoutées. Les paramètres de contact sont normalisés par rapport à leurs valeurs maximales. Ceci permet de comparer l'ensemble de ces paramètres sur la même figure.



Figure 5.19 : Effet de l'ajout de la microtexture composée de demi-sphères sur les paramètres de contact

Sur la Figure 5.19, l'ajout des petites aspérités représentant la microtexture entraine l'augmentation des pressions maximales et la diminution de l'aire de contact. Nous notons aussi une augmentation générale de l'enfoncement maximal. Cependant, sa variation est plus faible que la pression maximale et l'aire de contact. Ces résultats ont les mêmes tendances d'évolution que ceux de [123].

Les demi-sphères de petits rayons ont des courbures très grandes (*courbure* = 1/Rayon [13]). Ainsi, la surface de contact au-dessus de la demi-sphère devient très petite occasionnant des pressions de contact élevées.

L'enfoncement dépend de la distribution des aspérités de la surface. Lorsqu'il y a plusieurs demisphères en contact avec la gomme, la charge est repartie entre ces dernières, limitant ainsi l'enfoncement de la gomme. Ceci explique l'enfoncement plus grand pour l'ajout des demi-sphères de taille  $80 \ \mu m$  par rapport à celle de taille  $4 \ \mu m$  (distribution des hauteurs des points de la surface sur la Figure 5.20).





La présence des nombreux grands sommets est remarquée sur la Figure 5.20 avec l'ajout des demisphères de rayon  $4 \mu m$  par rapport à ceux de rayon  $80 \mu m$ . Cela permet de mieux répartir la charge et de limiter l'enfoncement comme observé sur la Figure 5.19.

### > Effet de l'ajout de la microtexture fractale

Des surfaces fractales sont générées numériquement et ajoutées à la macrotexture. Les paramètres utilisés dans la génération de ces surfaces sont la dimension fractale (Sfd) et la hauteur quadratique moyenne (Sq).

Le principe repose sur la génération d'un bruit blanc gaussien. La surface fractale est alors obtenue par une transformée inverse de Fourier. Elle est ensuite normalisée par rapport au Sq. Les étapes de génération de ces surfaces sont décrites dans [124–126].

La Figure 5.21 montre des exemples des surfaces fractales générées avec un Sq =  $50 \ \mu m$ .



Figure 5.21 : Exemples de surfaces fractales

Nous remarquons une complexification de la surface avec l'augmentation de la dimension fractale. Ceci est traduit par l'apparition de pics pointus et rapprochés.

L'effet de ces surfaces fractales sur le contact est étudié. Le modèle de contact élastique est d'abord appliqué sur ces dernières et ensuite appliqué en les ajoutant sur la surface de macrotexture constituée de demi-sphères.

#### Application sur les surfaces fractales

La dimension fractale est variée entre les valeurs possibles de la dimension fractale pour une surface : 2,1 - 2,9 avec un pas de 0,1. A titre d'exemple, le calcul fait pour la surface de dimension fractale Sfd= 2,3, pour une force F = 0,1 N, est présenté sur la Figure 5.22.



Figure 5.22 : Déplacements et pressions issus du contact entre une surface fractale rigide et un plan élastique

Nous remarquons une cohérence des résultats par rapport à la géométrie de la surface. L'existence de petits pics pointus sur la surface entraine des pics de pressions.

Le calcul a été fait pour toutes les dimensions fractales. L'évolution des paramètres de contact (enfoncement, pression maximale et aire de contact) est représentée sur la Figure 5.23. Les valeurs ont été normalisées par rapport aux valeurs maximales.



Figure 5.23 : Effet de la variation de la dimension fractale sur les paramètres de contact

Sur la Figure 5.23, l'augmentation de la dimension fractale entraine une augmentation de la pression maximale et une diminution de l'aire de contact.

Nous notons une évolution variable de l'enfoncement surtout entre deux dimensions fractales successives, due à la distribution des hauteurs de chaque surface (Figure 5.24). La présence de plusieurs grands sommets permet de limiter l'enfoncement de la gomme. Cependant, la tendance générale est l'augmentation de l'enfoncement maximal. Ceci est en accord avec les études de [11, 127].

L'augmentation de la dimension fractale entraine une complexification de la surface avec l'apparition des petits pics entrainant une diminution de l'aire de contact et une augmentation de la pression.



Figure 5.24 : Distribution des hauteurs des points de la surface des surfaces fractales

#### Application sur les surfaces composées de demi-sphères et de surfaces fractales

Les différentes surfaces fractales sont ajoutées à la surface de macrotexture constituée de demisphères. En exemple, la Figure 5.25 présente la surface obtenue en ajoutant la microtexture fractale de dimension fractale, Sfd=2.3.





Ces nouvelles surfaces générées sont celles qui se rapprochent des surfaces routières, des granulats (demi-sphères de rayon  $300 \ \mu m$ ) recouverts de microtexture multiéchelle. Le modèle de contact est appliqué à cette surface. Les résultats, pour l'application d'une force F = 0.1 N, sont présentés sur la Figure 5.26.



Figure 5.26 : Déplacements et pressions issus du contact entre une surface composé de macrotexture et de microtexture fractale rigide et un plan élastique

Les valeurs de l'enfoncement maximal et de la pression maximale trouvées se rapprochent de celles trouvées sur le calcul fait sur la surfaces fractales Sfd=2,3.

Le calcul est ensuite fait pour les autres dimensions fractales (2,1-2,9), avec un pas de 0,1). L'évolution des paramètres de contact normalisés par rapport à leurs valeurs maximales est représentée sur la Figure 5.27.



Figure 5.27 : Effet de l'ajout de la microtexture fractale sur de la macrotexture sur les paramètres de contact

Les mêmes évolutions des paramètres de contact sont remarquées que dans le cas de l'application du modèle de contact sur la microtexture fractale. Nous notons une diminution de l'aire de contact et de l'augmentation de la pression maximale. La même évolution variable avec une tendance générale d'augmentation de l'enfoncement maximal est remarquée. Ces évolutions sont expliquées par l'augmentation des pics pointus due à l'augmentation de la dimension fractale.

#### Conclusion

En conclusion, l'ajout des petites échelles de texture entraine une augmentation des pressions de contact et la diminution de la surface de contact. Ceci est lié à l'augmentation de la courbure audessus des aspérités. L'enfoncement maximal de la gomme est lié à la distribution des hauteurs des aspérités, à l'existence de plusieurs grands pics (densité) permettant d'avoir une meilleure répartition de la charge. L'ajout de la microtexture fractale a permis de confirmer que dans le contact pneu/chaussée, la microtexture au-dessus des granulats est celle qui permet d'avoir des grandes pressions de contact et une bonne adhérence.

Le modèle de contact est ensuite appliqué aux surfaces réelles, de mosaïques de granulats et d'enrobés bitumineux. L'évolution des différents paramètres de contact (enfoncement maximal, pression maximale et aire de contact) est analysée.

Dans cette partie, pour se rapprocher des paramètres de la mesure expérimentale, la force appliquée est choisie en se basant sur la force appliquée par la machine Wehner&Schulze sur les patins de mesure de l'adhérence (3 patins). La taille de chaque patin est de  $14,5 mm \times 30 mm$ .

Sachant que la force appliquée par la Wehner&Schulze est de 253 *N*, la force qui est choisie dans notre modèle de contact sur les mosaïques de granulats dans la section 5.4.2 (taille des échantillons :  $5 mm \times 5 mm$ ) est obtenue par la formule (5.46) :

$$F = \frac{(\frac{253}{3}) \times (5 \times 5)}{(14, 5 \times 30)} = 4,84N$$
(5.46)

La même force est appliquée sur les échantillons en enrobés bitumineux dans la section 5.4.3.

## 5.4.2. Application du modèle de contact sur des surfaces de mosaïques de granulats

Le modèle de calcul élastique est appliqué sur les surfaces de mosaïques de granulats sans et avec un couplage avec la méthode décomposition multiéchelle de la texture.

### Application sur les surfaces de mosaïques de granulats sans décomposition multiéchelle

En exemple, le calcul des déplacements et des pressions issues du contact entre la zone 1 de la formule S2 et la gomme est fait. Le calcul est fait à l'état initial et à 180 000 passages de polissages de la Wehner&Schulze. Les surfaces correspondantes sont présentées sur la Figure 5.28.



Figure 5.28 : S2, zone 1

Le polissage entraine une réduction des hauteurs des aspérités. Les déplacements résultant du contact entre la gomme et les deux surfaces sont représentés sur la Figure 5.29.



Figure 5.29 : Déplacements résultants du contact entre la gomme et la surface S2, zone 1

Nous notons une diminution des déplacements avec le polissage, semblable aux géométries observées sur la Figure 5.28. La réduction de la hauteur des grandes aspérités permet d'avoir plus
d'aspérités en contact avec la gomme. Les pressions induites par ce contact sont représentées sur la Figure 5.30.



Figure 5.30 : Pressions résultantes du contact entre la gomme et la surface S2, zone 1

Le polissage entraine une diminution des pressions maximales de contact. Ceci est dû à diminution de la courbure et de la pente des aspérités (arêtes pointues).

Les paramètres de contact (enfoncement maximal, pression maximale et aire de contact) sont calculés pour toutes les formules de mosaïques de granulats à chaque état de polissage.

Les déplacements résultant de ce contact sont présentés sur la Figure 5.31. Les barres d'erreurs sur la Figure 5.31,b) représentent le maximum et le minimum entre les trois valeurs sur les trois zones.



Figure 5.31 : Déplacements issus du contact entre les mosaïques de granulats et la gomme, a) pour toutes les trois zones, b) moyenne sur les trois zones

La réduction de la hauteur des aspérités par le polissage est remarquée dans la réduction de l'enfoncement maximal des aspérités dans la gomme. A 180 000 passages, nous avons des faibles différences entre les valeurs d'enfoncements ( $50 \ \mu m - 150 \ \mu m$ ) par rapport à l'état initial ( $80 \ \mu m - 480 \ \mu m$ ). Cela est dû à l'aplanissement de toutes les surfaces avec le polissage. L'évolution de l'enfoncement des aspérités dans la gomme avec le polissage est semblable à l'évolution du frottement mesuré (Figure 3.18).

L'évolution des pressions maximales de contact est représentée sur la Figure 5.32. Les barres d'erreurs sur la Figure 5.32,b) représentent le maximum et le minimum entre les trois valeurs sur les trois zones.



Figure 5.32 : Pressions issues du contact entre les mosaïques de granulats et la gomme, a) pour toutes les trois zones, b) moyenne sur les trois zones

Nous notons une diminution des pressions maximales avec le polissage due à la suppression des arêtes vives et à l'aplanissement des surfaces. De faibles différences de pression maximale sont aussi remarquées, comme pour l'enfoncement maximal, entre les différentes formules à 180 000 passages. L'évolution des pressions maximales est semblable à l'évolution du frottement.

La même analyse est faite pour l'aire de contact représentée sur la Figure 5.33. Les barres d'erreurs sur la Figure 5.33,b) représentent le maximum et le minimum entre les trois valeurs sur les trois zones.



Figure 5.33 : Aires de contact entre les mosaïques de granulats et la gomme, a) pour toutes les trois zones, b) moyenne sur les trois zones

Nous notons une augmentation de l'aire de contact avec le polissage. Cette augmentation est plus grande pour les formules les plus fragiles (respectivement S3, S4 et S2). Cela est dû à l'aplanissement plus rapide des granulats de ces dernières à base de granulats fragiles. L'évolution de l'aire de contact avec le polissage est quant à lui à l'inverse de l'évolution du frottement.

La pression maximale évolue toujours à l'inverse de l'aire de contact. La pression et le déplacement sont les paramètres utilisés pour la détermination des pertes d'énergie par déformation de la gomme dont dépend le niveau d'adhérence. Ceci explique l'évolution similaire (pression et enfoncement) et inverse (aire de contact) de ces paramètres avec le polissage à l'évolution de l'adhérence.

L'évolution de ces trois paramètres de contact avec le polissage dépend de l'évolution de la texture (hauteur, de la pente et de la courbure des aspérités) de la surface comme observée pour l'évolution de l'adhérence dans la section 3.4.1.

Comme vu dans la section 4.1.1, cette évolution de la texture en fonction du polissage dépend des échelles de texture. Dans la section 5.4.1, il est montré sur des surfaces artificielles que les petites échelles sont celles qui permettent d'avoir de grandes pressions de contact. Le modèle de contact est alors couplé avec la décomposition multiéchelle de la texture des surfaces réelles des mosaïques de granulats. L'objectif est d'évaluer la capacité du couplage modèle de contact/décomposition multiéchelle à décrire le polissage des différentes formules de mosaïques de granulats. Les paramètres de contact multiéchelle sont analysés.

#### Application sur les surfaces de mosaïques de granulats avec une décomposition multiéchelle

Le modèle de contact est appliqué sur chaque surface obtenue suite à la décomposition multiéchelle de la texture.

L'évolution multiéchelle de l'enfoncement maximal moyen des trois zones de chaque formule est présentée sur la Figure 5.34.



Figure 5.34 : Evolution multiéchelle de l'enfoncement maximal issu du contact gomme/mosaïque

Nous notons une diminution de l'enfoncement maximal avec le polissage pour tous les types de granulats. Les variations sont remarquées pour les échelles inférieures à  $1\,000\,\mu m$ . Elles sont très faibles pour les autres échelles. Cela est due à la faible amplitude des échelles supérieures à  $1\,000\,\mu m$  (comme remarqué sur la Figure 4.4).

A l'état initial, le plus grand gradient entre les enfoncements des différentes échelles de texture est remarqué pour la formule S1 avec de grands enfoncements ( $80 \ \mu m$ ) pour les échelles inférieures à  $200 \ \mu m$  suivi d'une diminution à moins de  $50 \ \mu m$  pour les échelles supérieures à  $200 \ \mu m$ . Pour les autres types de granulats, la distribution des enfoncements maximaux est uniforme entre les échelles  $0 \ \mu m - 400 \ \mu m$ .

A 180 000 passages, ces mêmes gradients sont observés pour les formules S1, S2 (diminution du gradient) et S5. Pour les formules S3 et S4, nous avons une constance générale de l'enfoncement pour les échelles comprises entre  $0 \ \mu m - 1 \ 000 \ \mu m$ . Ceci est liée à l'usure des différents granulats. Pour les formules S3 et S4, toutes les échelles sont usées avec le polissage entrainant une harmonisation de la surface et une harmonisation de l'enfoncement. Le gradient conservé surtout pour les formules S1 et S5 est relié à l'usure différentielle que subissent ces dernières en plus de l'usure générale.

Les variations de l'enfoncement maximal entre l'état initial et 180 000 passages sont représentées sur Figure 5.35. Les valeurs positives correspondent à une augmentation de l'enfoncement et les valeurs négatives à une diminution.



Figure 5.35 : Variation multiéchelle de l'enfoncement maximal en fonction du polissage pour les mosaïques de granulats

La diminution différentielle de l'enfoncement est remarquée pour les granulats S1, S5 et faiblement sur le granulat S2 (dure, PSV=52). La gamme d'échelles ayant la même évolution que l'adhérence est celle comprise entre  $150 \ \mu m - 600 \ \mu m$ . Dans cette gamme d'échelles, les diminutions sont les plus faibles respectivement pour les granulats S1, S5, S2, S3 et S4.

La même analyse est faite pour les pressions maximales de contact présentées sur la Figure 5.36.



Figure 5.36 : Evolution multiéchelle de la pression maximale issue du contact gomme/mosaïque

Les pressions maximales sont obtenues pour les petites échelles (inférieures à  $100 \ \mu m$ ). L'évolution des pressions maximales est similaire aux évolutions multiéchelles du Sdq (pente) et du Ssc (courbure) présentées sur les Figure 4.15 et Figure 4.18. En effet, plus la pente et la courbure sont grandes, plus les sommets sont pointus induisant ainsi de grandes pressions de contact.

Nous notons une diminution générale de la pression de contact avec le polissage. La variation





Figure 5.37 : Variation multiéchelle de la pression maximale en fonction du polissage pour les mosaïques de granulats

La diminution de la pression maximale de contact pour toutes les échelles est remarquée pour les granulats S2, S3 et S4. Pour les granulats S1 (entre  $500 \ \mu m - 600 \ \mu m$ ) et S5 (entre  $300 \ \mu m - 550 \ \mu m$ ), nous notons une augmentation de la pression maximale de contact. Cette augmentation est due à l'usure différentielle qui entraine l'apparition de nouveaux sommets.

Une évolution inverse est remarquée pour l'aire de contact multiéchelle présentée sur la Figure 5.38.



Figure 5.38 : Evolution multiéchelle de l'aire de contact gomme/mosaïque

Nous avons une augmentation de l'aire de contact avec le polissage. Cette augmentation est plus grande pour les granulats fragiles S2, S3 et S4. Elle traduit un aplanissement progressif de la surface et une diminution de la courbure et de la pente des sommets. Cela entraine une diminution de la pression et ainsi de l'adhérence. Les ordres de variations correspondants sont représentés sur la Figure 5.39.



Figure 5.39 : Variation multiéchelle de l'aire de contact en fonction du polissage pour les mosaïques de granulats

Pour tous les granulats, la plage d'échelle ayant la plus grande augmentation est  $0 \mu m - 400 \mu m$ . Des faibles augmentations de la surface de contact son remarquées pour les granulats les plus durs (S1 et S5, moins de 100 % d'augmentation) par rapport aux autres granulats (S2, S3 et S4, plus de 100%).

#### Conclusion

En conclusion, le modèle de contact permet d'avoir une distribution fidèle en fonction des géométries, des pressions et des déplacements issus du contact gomme/mosaïques de granulats. Il s'adapte au polissage des granulats avec une diminution de l'enfoncement des aspérités dans la gomme, une diminution des pressions de contact et une augmentation de l'aire de contact. Ces variations sont plus grandes pour les formules contenant des minéraux fragiles et monominérales. Pour les formules polyminérales avec un contraste de dureté, ces variations sont limitées par l'apparition de nouveaux sommets pointus suite à l'usure différentielle.

Cela est constaté sur l'évolution multiéchelle des paramètres de contact avec l'augmentation de la pression pour les granulats S1 et S5. Ceci vient aussi monter la capacité de la méthode de décomposition multiéchelle développée à être couplé à des modèles physiques pour l'étude de l'évolution de l'adhérence avec le polissage.

L'évolution des paramètres de contact (enfoncement maximal, pression maximale et l'aire de contact) avec le polissage est similaire à celle de l'adhérence. Ces paramètres de contact sont ceux utilisés dans le calcul de la perte d'énergie par déformation de la gomme dont dépend l'adhérence. Ce modèle de contact peut donc être utilisé pour estimer numériquement l'adhérence du couple gomme/granulats.

## 5.4.3. Application du modèle de contact sur des surfaces d'enrobés bitumineux

Le modèle de contact est cette fois-ci appliqué sur les formules d'enrobés bitumineux à différents états de polissage.

#### Application sur les surfaces d'enrobés bitumineux sans une décomposition multiéchelle

En exemple, le calcul des déplacements et des pressions issues du contact entre la zone 1 de la formule F7 et la gomme est fait. Les surfaces correspondantes sont présentées sur la Figure 5.40.



Figure 5.40 : F7, zone 1

Le polissage entraine une suppression des sommets et l'apparition des nouveaux sommets pointus entre 0 et 7 000 passages. Cela est dû à l'action combinée entre l'usure de la surface et du décapage du liant bitumineux. Entre 7 000 180 000 passages, nous notons une suppression de ces sommets pointus. Les déplacements résultant du contact entre la gomme et ces surfaces sont représentés sur la Figure 5.41.



Figure 5.41 : Déplacements résultants du contact entre la gomme et la surface F7, zone 1

Les déplacements obtenus sont à l'image des géométries des surfaces. Nous avons une augmentation de l'enfoncement maximal à 7 000 passages due aux nouveaux sommets observés sur la Figure 5.40. Après cet état, nous notons une diminution progressive de l'enfoncement maximal.

Les pressions correspondantes sont présentées sur la Figure 5.41.



Figure 5.42 : Pressions résultantes du contact entre la gomme et la surface F7, zone 1

Nous notons une augmentation des pressions de contact entre 0 et 7 000 passages suivie d'une diminution progressive des pressions de contact entre 0 et 180 000 passages. Cela est dû à l'apparition et à la suppression des sommets pointus. Entre 7 000 et 180 000 passages, la suppression des sommets pointus, permet d'avoir plusieurs points de contact et une diminution de la pression maximale de contact.

Le modèle est ensuite appliqué sur l'ensemble des surfaces d'enrobés à chaque état de polissage. Les paramètres de contact (enfoncement maximal, pression maximale et l'aire de contact) sont analysés.

Les enfoncements maximaux issus du contact entre la gomme et les différentes formules d'enrobés, sur toutes les zones à tous les états de polissages sont présentés sur la Figure 5.43.



Figure 5.43 : Enfoncements maximaux issus du contact entre la gomme et les surfaces d'enrobés bitumineux

Nous notons les mêmes variations des valeurs d'enfoncement maximales entre les différentes zones des mêmes formules dues aux différences de texture. Cependant, contrairement aux mosaïques de granulats, nous ne notons pas la même tendance d'évolution avec le polissage sur toutes les zones que le frottement comme présenté sur la Figure 5.44.



Figure 5.44 : Evolution de l'enfoncement maximal des aspérités dans la gomme avec le polissage pour les enrobés bitumineux

Ces mêmes observations sont faites pour la pression maximale de contact et la surface de contact présentées sur les Figure 5.45 et Figure 5.46 et sur les Figure 5.47 et Figure 5.48.



Figure 5.45 : Pressions maximales issues du contact entre la gomme et les surfaces d'enrobés bitumineux



Figure 5.46 : Evolution des pressions maximales de contact entre les surfaces d'enrobés bitumineux et la gomme avec le polissage



Figure 5.47 : Aires de contact entre la gomme et les surfaces d'enrobés bitumineux



Figure 5.48 : Evolution des aires de contact entre les surfaces d'enrobés bitumineux et la gomme avec le polissage

Ces différences d'évolution des paramètres de contact avec le polissage sont dues à la complexité de la texture des enrobés bitumineux et à son évolution avec le polissage. Cette complexité est due à la présence du bitume qui n'est pas prise en compte dans le modèle de contact.

En fonction des zones recouvertes par le liant bitumineux, nous n'aurons pas la même évolution de la texture. Pour les zones recouvertes de bitume, nous aurons un décapage continu du bitume et la mise à nu des granulats avec le polissage (confère Figure 3.15, Figure 3.16). Ce décapage n'est pas homogène sur toute la surface de l'enrobé. Cela rajoute une difficulté supplémentaire dans la modélisation du contact. Ce décapage est suivi d'une phase d'usure des granulats. Les zones non recouvertes de bitume ne seront soumises qu'à une usure. Ces différents aspects ne sont pas intégrés à notre modèle de contact non plus.

#### Application sur les surfaces d'enrobés bitumineux avec une décomposition multiéchelle

Le modèle de contact est appliqué sur chaque surface d'enrobés bitumineux obtenue à la suite à la décomposition multiéchelle de la texture.

L'évolution multiéchelle de l'enfoncement maximal moyen des quatre zones de chaque formule est représentée sur la Figure 5.49.



Figure 5.49 : Evolution multiéchelle de l'enfoncement maximal issu du contact gomme/enrobé

Comme pour les mosaïques de granulats, ce sont les petites échelles au-dessus des granulats qui s'enfoncent le plus dans la gomme. Les variations de l'enfoncement maximal avec le polissage ne sont observables que pour les échelles inférieures à  $1\,000\,\mu m$ . Pour ces échelles, les variations de l'enfoncement maximal pour les phases de décapage et d'usure sont représentées sur la Figure 5.50.



Figure 5.50 : Variation multiéchelle de l'enfoncement maximal pour les enrobés bitumineux

Nous observons un comportement similaire à celui observé sur la variation des paramètres de texture (section 4.2.1). La variation de l'enfoncement maximal dépend de la composition granulométrique des formules d'enrobés.

Entre l'état initial et celui du frottement maximal, pour les formules F7, F4 et F4 bis contenant une grande quantité de sable (>20%), nous avons une diminution de l'enfoncement maximal. Pour les autres formules, nous notons des augmentations de l'enfoncement maximal. Les augmentations de l'enfoncement maximal sont dues à la mise à nu de nouvelles aspérités compte-tenu du décapage du liant bitumineux. En effet, ce décapage entraine une diminution différentielle des sommets. La charge appliquée par la gomme est alors supportée par moins d'aspérités. Ainsi, une augmentation de l'enfoncement maximal est attribuée au décapage du liant bitumineux combiné à un arrachement des petites aspérités fragiles (sable, fillers). Cela entraine une diminution générale des sommets et un aplanissement progressif de la surface limitant ainsi l'enfoncement des aspérités dans la gomme.

Entre l'état de frottement maximal et 180 000 passages de polissage, nous notons une diminution générale de l'enfoncement maximal. Cette diminution est reliée à l'usure des aspérités par le polissage. Elle est plus grande pour les formules dont nous avions observé une augmentation importante de l'enfoncement dans la phase de décapage. En effet, une fois le liant bitumineux décapé, la vitesse d'usure des aspérités est plus grande. Les augmentations de l'enfoncement maximal remarquées pour les formules F6 et F7 sont liées au décapage continu du liant bitumineux et à la mise à nu continue des aspérités.

La même analyse est faite pour les pressions maximales de contact. L'évolution multiéchelle des pressions maximales moyennes des quatre zones de chaque formule est représentée sur les Figure 5.51 et Figure 5.52.



Figure 5.51 : Evolution multiéchelle de la pression maximale issue du contact gomme/enrobé



Figure 5.52 : Evolution multiéchelle de la pression maximale issue du contact gomme/enrobé, zoom entre 0  $\mu m - 100 \ \mu m$ 

L'évolution multiéchelle des pressions maximales de contact est similaire à l'évolution multiéchelle de la pente Sdq (confère Figure 4.46 et Figure 4.47). Nous observons des pressions nulles pour l'échelle 1,76  $\mu$ m pour laquelle nous avions une amplitude nulle sur la Figure 4.25. Au-delà de cette échelle, les petites échelles sont celles qui permettent d'avoir des grandes pressions de contact. Due à la faible amplitude des échelles supérieures à 1 000  $\mu$ m, les variations des pressions maximales avec le polissage ne sont remarquées que pour les échelles de texture inférieures à 1 000  $\mu$ m. Les faibles pressions maximales de contact traduisent une grande surface de contact au-dessus des aspérités.

Les variations des pressions maximales de contact dans les phases de décapage et d'usure sont représentées sur la Figure 5.53.



Figure 5.53 : Variation multiéchelle de la pression maximale en fonction du polissage pour les enrobés bitumineux

Nous constatons un comportement similaire à la variation de l'enfoncement maximal. Notons cependant aussi des augmentations des pressions maximales entre l'état initial et l'état de frottement maximal pour les formules F7 (à 400  $\mu$ m), F4 bis (à 300  $\mu$ m) et F4 (à 100  $\mu$ m, 500  $\mu$ m – 1 000  $\mu$ m) contrairement à l'enfoncement maximal. Ces augmentations des pressions, dues à la mise à nu de nouvelles aspérités, permettent d'expliquer l'augmentation du frottement dans la phase de décapage du liant bitumineux. Dans la phase d'usure, due au décapage continu du liant, nous ne remarquons pas la diminution générale des pressions maximales comme dans le cas des mosaïques de granulats.

Les évolutions des pressions maximales de contact sont à l'inverse des évolutions multiéchelles de l'aire de contact moyen des quatre zones de chaque formule représenté sur la Figure 5.54.



Figure 5.54 : Evolution multiéchelle de l'aire de contact gomme/enrobé

Les plus grandes valeurs de l'aire de contact sont remarquées pour l'échelle  $1,76 \,\mu m$  et les échelles supérieures à  $1\,000 \,\mu m$  pour lesquelles nous avions des pressions de contact faibles ou nulles. Pour les autres échelles (entre  $1,76 \,\mu m - 1000 \,\mu m$ ), nous avons une augmentation des valeurs de l'aire de contact avec l'augmentation de l'échelle d'observation.

Les variations multiéchelles de l'aire de contact dans les phases de décapage et d'usure sont représentées sur la Figure 5.55.



Figure 5.55 : Variation multiéchelle de l'aire de contact en fonction du polissage pour les enrobés bitumineux

Les variations de l'aire multiéchelle de contact sont à l'inverse des variations des pressions maximales de contact. Les phénomènes de décapage et d'usure y sont représentés.

#### Conclusion

En fonction des géométries des surfaces, le modèle de contact permet d'avoir des distributions fidèles des pressions et des déplacements issus du contact gomme/enrobés bitumineux.

Le couplage du modèle de contact avec la méthode de décomposition multiéchelle permet de voir l'effet du décapage du liant bitumineux et la mise à nu des granulats. Cela est remarqué par l'augmentation des pressions des contacts de certaines échelles de texture (en fonction de la composition des formules), de l'augmentation des enfoncements maximaux et de la diminution de l'aire de contact. L'usure des granulats est représentée par la diminution des enfoncements maximaux, la diminution des pressions maximales de contact et l'augmentation de l'aire de contact.

Quant à la description de l'évolution globale de l'adhérence, la non prise en compte du comportement du liant bitumineux (décapage, décapage non-uniforme et compactage) ne permet pas de faire un lien direct à partir de l'évolution globale des paramètres de contact avec le polissage.

# 5.5. Modélisation viscoélastique de l'adhérence appliquée aux surfaces brutes de texture

Cette partie est dédiée à la modélisation viscoélastique de l'adhérence entre les échantillons de mosaïques de granulats et d'enrobés bitumineux et la gomme de la machine Wehner&Schulze.

La gomme est déplacée sur la surface des échantillons d'un pas de dx à une vitesse constante. Le déplacement d'un pas plus petit nécessiterait une interpolation à chaque pas de temps pour déterminer la surface potentielle de contact. Le déplacement d'un pas plus grand réduirait la précision des calculs[12].

La durée de chaque pas de temps dt est calculée par rapport à la vitesse. Dans notre cas, l'adhérence est mesurée par la machine Wehner&Schulze à une vitesse  $V = 60 \ km/h$ . Le pas de temps est alors  $dt = \frac{dx=1.76}{V} = 1e^{-7}s$  pour les mosaïques de granulats et  $dt = \frac{dx=0.88}{V} = 5e^{-8}s$  pour les enrobés bitumineux.

Pour conserver la plus grande partie de la surface des mosaïques de granulats (5  $mm \times 5 mm$ ), la taille de la gomme est fixée à 4,96  $mm \times 4,96 mm$ . En tenant compte de la force appliquée par la machine Wehner&Schulze (253 N) et en se servant de l'équation (5.46), la force appliquée sur la gomme est  $F_0 = 4,78 N$ .

Quant aux échantillons d'enrobés bitumineux  $(3 mm \times 3 mm)$ , la taille de la gomme est fixée à 2,98 mm × 2,98 mm. En tenant compte de la force appliquée par la machine Wehner&Schulze (253 *N*) et en se servant de l'équation (5.46), la force appliquée sur la gomme est *F*<sub>0</sub> = 1,72 *N*.

La composante d'adhésion dans notre cas, due à l'état très rugueux des échantillons est négligée. Il en est de même des cisaillements. En effet, ayant fait l'hypothèse d'un matériau incompressible, il n'y a pas de couplage entre le déplacement normal et celui tangentiel [102, 128]. Ainsi, la perte d'énergie issue du contact normal permettra d'estimer le frottement.

L'adhérence est calculée en calculant la perte d'énergie par déformation de la gomme [12, 129, 130] définie par l'équation (5.47) :

$$W(t) = \int_{Ac} V \frac{\partial u_z(x, y, t)}{\partial x} p(x, y, t) dx dy$$
(5.47)

Cette énergie de déformation est équilibrée par la force tangentielle  $F_t$  générée par le déplacement de la gomme selon l'équation (5.48) :

$$W(t) = F_t(t) \times V \tag{5.48}$$

Ainsi, la force tangentielle est calculée par l'équation (5.49) :

$$F_{t}(t) = \int_{Ac} \frac{\partial u_{z}(x, y, t)}{\partial x} p(x, y, t) dx dy$$
(5.49)

L'adhérence à chaque instant est alors définie par l'équation (5.50) :

$$\mu(t) = \frac{F_t(t)}{F_0} = \frac{\int_{Ac} \frac{\partial u_z(x, y, t)}{\partial x} p(x, y, t) dx dy}{F_0}$$
(5.50)

Le terme  $\frac{\partial u_z(x,y,t)}{\partial x}$  est évalué par la méthode des différences finies. L'intégrale est évaluée par la méthode des rectangles. L'adhérence correspondant à chaque zone, à chaque état de polissage est la moyenne des adhérences de chaque pas de temps.

## 5.5.1. Application du modèle de contact sur les mosaïques de granulats

Le modèle est appliqué sur les différentes mosaïques de granulats. La Figure 5.56 montre les frottements calculés par rapport à ceux mesurés. Les barres d'erreurs indiquent le frottement maximal et minimal estimés sur les trois zones de chaque formule.



Figure 5.56 : Estimation du frottement des mosaïques de granulats

Le modèle de contact permet de retrouver globalement les valeurs de frottement mesuré. Les dispersions des valeurs entre les différentes zones sont plus grandes à l'état initial ou dans les premières phases de polissage (entre 0 et 5 000 passages). Les faibles dispersions après cet état sont dues à l'homogénéisation de la texture sur toute la surface des échantillons.

Les différences entre les valeurs du frottement mesuré et celui calculé peuvent être attribuées à la non application du modèle de contact sur toute la surface de l'échantillon. En effet, les valeurs mesurées par la machine Wehner&Schulze sont les moyennes des frottements mesurés sur toute la surface de l'échantillon. Par ailleurs, en considérant la répétabilité de la machine, le modèle permet une bonne estimation de l'adhérence d'un couple mosaïque de granulat/gomme.

La Figure 5.57 présente la corrélation entre les valeurs calculées et celles mesurées de l'adhérence. Les valeurs calculées ont été moyennées sur les trois zones. Cette moyenne permet de se comparer à la valeur d'adhérence mesurée par la Wehner&Schulze qui est une moyenne sur toute la surface de l'échantillon.



Figure 5.57 : Corrélation entre les valeurs mesurées et celles calculées de l'adhérence des mosaïques de granulats

L'efficacité du modèle est prouvée par une forte corrélation (0,95) entre les valeurs mesurées et celles calculées.

## 5.5.2. Application du modèle de contact sur les enrobés bitumineux

Le modèle de contact est ensuite appliqué aux différentes formules d'enrobés bitumineux. La Figure 5.58 montre les frottements calculés sur les différentes zones cartographiées par formule d'enrobés bitumineux.

Les différences d'évolution des valeurs calculées sur les différentes zones sont remarquées comme sur la Figure 5.42. Ces différences sont liées à la non prise en compte du liant bitumineux. Le décapage du bitume induit par le polissage n'est pas uniforme sur la surface de l'échantillon. Cette non prise en compte ne permet pas non plus d'observer l'augmentation de l'adhérence dans la phase de décapage.



Figure 5.58 : Evolution des frottements calculés sur les zones des enrobés bitumineux

Pour pouvoir faire une comparaison avec les valeurs mesurées par la machine Wehner&Schulze, une moyenne des frottements calculés sur les différentes zones est faite. Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 5.59. Les barres d'erreurs indiquent le frottement maximal et minimal estimés sur les quatre zones de chaque formule.



Figure 5.59 : Estimation du frottement des enrobés bitumineux

Sur la Figure 5.59, l'augmentation du frottement n'est pas représentée dans la phase de décapage. Les meilleures estimations sont remarquées dans la phase d'usure. Elles sont remarquées pour les formules contenant les granulats 6/10 (F4, F4 bis, F5, F6 et F7) et du sable (F6 et F7). Pour ces derniers, dans la phase de décapage, l'enlèvement du bitume est combiné à l'arrachement des granulats de sable et du filler. Ainsi, le contact entre la gomme et l'enrobé se rapproche d'un contact simple entre un granulat et la gomme. Cependant, même dans la phase d'usure, nous avons un décapage continu du liant (Figure 3.15, Figure 3.16 et Figure 4.34). Ainsi, la prise en compte du comportement du liant bitumineux (décapage) devrait permettre d'améliorer l'estimation de l'adhérence des enrobés bitumineux.

# 5.6. Modélisation viscoélastique multiéchelle de l'adhérence

Le modèle de contact viscoélastique est dans cette partie appliqué sur les résultats de la décomposition multiéchelle de chaque zone de chaque formule de mosaïque de granulat et d'enrobés bitumineux à chaque état de polissage. Le frottement est calculé pour chaque échelle de texture de la décomposition.

## 5.6.1. Application du modèle d'adhérence multiéchelle sur les mosaïques de granulats

L'évolution multiéchelle du frottement des mosaïques de granulats est présentée sur la Figure 5.60.



Figure 5.60 : Evolution multiéchelle de l'adhérence des mosaïques de granulats

L'évolution multiéchelle du frottement est similaire à celle des pressions maximales et enfoncements maximaux représentés sur les Figure 5.34 et Figure 5.36. Elle dépend aussi de l'évolution multiéchelle du Sdq (pente) et du Ssc (courbure) présentée sur les Figure 4.15 et Figure 4.18. Les petites échelles pentues sont celles qui permettent d'avoir la plus grande perte d'énergie par déformation de la gomme et donc une grande adhérence. Nous notons une diminution du frottement multiéchelle avec le polissage. Les pourcentages de variations entre l'état initial et 180 000 passages sont représentés sur la Figure 5.61.



Figure 5.61 : Variation multiéchelle du frottement entre l'état initial et 180 000 passages des mosaïques de granulats

Les diminutions les plus grandes sont remarquées pour les échelles comprises entre  $0 \ \mu m - 500 \ \mu m$ , échelles correspondantes à la microtexture. La diminution de l'adhérence multiéchelle est semblable à celle mesurée expérimentalement (plus grande respectivement pour S4, S3, S2, S5 et S1). Cela laisse suggérer que nous pouvons reconstruire l'adhérence globale grâce à l'adhérence multiéchelle.

Premièrement, nous supposons que toutes les échelles contribuent de façon équivalente au frottement global. Une somme des frottements multiéchelles est faite. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 5.62. Les barres d'erreurs représentent l'adhérence maximale et minimale des trois zones de chaque formule à chaque état de polissage.



Figure 5.62 : Somme des frottements multiéchelles des mosaïques de granulats

Les valeurs trouvées sont très grandes par rapport au frottement mesuré. Cependant, nous notons une forte corrélation entre ces valeurs calculées et celles mesurées sur la Figure 5.63. Les valeurs calculées ont été moyennées sur les trois zones.



Figure 5.63 : Corrélation entre le frottement mesuré et la somme des frottements multiéchelles des mosaïques de granulats

Cela suggère que toutes les échelles de texture ne contribuent pas de manière équivalente au frottement global. Des coefficients de pondération peuvent être définis pour tenir compte du poids de chaque échelle de texture pour chaque formule de mosaïque de granulats.

Pour définir ces coefficients de pondération nous nous basons sur ceux définis par [80, 81]. Ils définissent des paramètres à partir de l'énergie de chaque échelle de texture. Pour un signal z(x, y) de taille  $nx \times ny$ , cette énergie est définie par l'équation (5.51) :

$$Energie = \sum_{i=1}^{i=nx} \sum_{j=1}^{j=ny} (z(i,j))^2$$
(5.51)

Nous considérons que les échelles ayant des frottements multiéchelles contribueront grandement au frottement global mesuré. Ainsi, pour définir le poids de chaque échelle de texture, nous normalisons le carré de chaque frottement multiéchelle par le carré du frottement multiéchelle maximal. Les coefficients de pondération sont alors obtenus par l'équation (5.52) :

$$c_{a(k)} = \frac{\mu_{a(k)}^{2}}{\max(\mu_{a(k),k=1:J}^{2})}$$
(5.52)

*a* désigne les échelles de la décomposition et l'indice k, l'échelle de texture dont nous calculons le coefficient de pondération. *J* représente le nombre d'échelles de la décomposition multiéchelle. Le frottement global est calculé par l'équation (5.53) :

$$\mu = \sum_{k=1}^{k=J} c_{a(k)} \times \mu_{a(k)}$$
(5.53)

Les résultats de ce calcul sont présentés sur la Figure 5.64. Les barres d'erreurs représentent l'adhérence maximale et minimale des trois zones de chaque formule à chaque état de polissage.



Figure 5.64 : Frottements multiéchelles pondérés des mosaïques de granulats

La considération des poids des différentes échelles de texture permet d'améliorer l'estimation de l'adhérence globale à partir de l'adhérence multiéchelle. Cela est confirmé par l'augmentation du coefficient de corrélation entre l'adhérence mesurée et celle estimée par la pondération de l'adhérence multiéchelle sur la Figure 5.65. Les valeurs calculées sont moyennées sur les trois zones.



Figure 5.65 : Corrélation entre les valeurs d'adhérence mesurées et celles estimées par la pondération de l'adhérence multiéchelle des mosaïques de granulats

#### 5.6.2. Application du modèle d'adhérence multiéchelle aux enrobés bitumineux

L'évolution multiéchelle du frottement des enrobés bitumineux est représentée sur les Figure 5.66 et Figure 5.67.



Figure 5.66 : Evolution multiéchelle de l'adhérence des enrobés bitumineux



Figure 5.67 : Evolution multiéchelle de l'adhérence des enrobés bitumineux, zoom entre 0  $\mu m$  – 1 000  $\mu m$ 

L'évolution des frottements multiéchelles est semblable à celle des paramètres de contact des Figure 5.49 et Figure 5.51. Les grandes valeurs de frottement sont obtenues pour les petites échelles qui permettent d'avoir de grandes pressions de contact et qui s'enfoncent le plus dans la gomme. Comparées aux mosaïques de granulats, de grandes valeurs sont remarquées pour les enrobés bitumineux (0,7 pour la formule F5 et 0,3 pour la formule S5). La valeur maximale de frottement multiéchelle trouvée par exemple pour la formule F5 est supérieure au frottement global. Ces grandes valeurs proviennent de la non prise en compte de la modification de la texture due à la présence du bitume au-dessus des granulats. Cette considération permettrait de réduire le gradient des déplacements et/ou des pressions de contact et ainsi les valeurs de frottement.

Les variations du frottement multiéchelle dans les phases de décapage et d'usure sont présentées sur les Figure 5.68 et Figure 5.69.



Figure 5.68 : Variation du frottement multiéchelle des enrobés bitumineux avec le polissage



Figure 5.69 : Variation du frottement multiéchelle des enrobés bitumineux avec le polissage, zoom entre 0  $\mu m - 1000 \ \mu m$ 

Comme pour les paramètres de texture (section 4.2) et les paramètres de contact (section 5.4.3), nous remarquons une évolution variable en fonction des échelles de texture considérées et de la composition granulométrique des formules d'enrobés. L'augmentation du frottement multiéchelle est constatée pour les formules F1, F2, F3, F5 et F6 dans la phase de décapage pour les échelles comprises entre 0  $\mu m$  – 1 000  $\mu m$ . Pour les formules F4, F4 bis et F7, elle est très peu (F4) ou pas remarquée. Ces formules sont celles qui contiennent plus de sable (>20 %). Pour ces dernières, dans la phase de décapage, nous avons aussi un arrachement du sable limitant ainsi la mise à nu de nouvelles aspérités. Cela explique ces faibles variations du frottement.

Ces augmentations, constatées pour certaines échelles dans la phase de décapage, s'accompagnent d'une diminution générale du frottement dans la phase d'usure. Dû au décapage continu du liant bitumineux et à la mise à nu des granulats, l'augmentation du frottement est encore remarquée dans cette phase (F7, F6, F1).

Le frottement global estimé à partir de la somme des frottements multiéchelle est représenté sur la Figure 5.70. Les barres d'erreurs indiquent le frottement maximal et minimal estimés sur les quatre zones de chaque formule.



Figure 5.70 : Somme des frottements multiéchelles des enrobés bitumineux

Les valeurs du frottement calculé à partir du frottement multiéchelle sont très grandes comparés à celles mesurées. Cependant, nous avons les mêmes tendances d'évolution avec le frottement global calculé dans la section 5.5.2. Ce même constat est fait sur le frottement multiéchelle pondéré représenté sur la Figure 5.71.



Figure 5.71 : Frottements multiéchelles pondérés des enrobés bitumineux

Ces grandes valeurs sont dues à la somme des erreurs faites sur le calcul du frottement à chaque échelle de texture en ne considérant pas l'effet du liant bitumineux. Nous pouvons cependant noter des tendances similaires d'évolution du frottement avec le polissage entre le frottement estimé et celui mesuré dans la phase d'usure. Cela laisse suggérer qu'un modèle de contact prenant en compte le décapage via une fonction de décapage par exemple permettrait une meilleure estimation du frottement gomme/enrobé.

### 5.7. Conclusion

En conclusion, l'utilisation de la théorie des massifs infinis permet une modélisation rapide et précise du contact entre la gomme et les matériaux de chaussée (granulats, enrobés).

Les paramètres de contact comme la pression maximale de contact ainsi que l'enfoncement maximal des aspérités permettent d'étudier la variation de l'adhérence avec le polissage. Les petites échelles de texture permettent d'avoir des grandes pressions de contact et une bonne adhérence.

Pour les mosaïques de granulats, le modèle de contact élastique donne des résultats initiaux cohérents avec les valeurs des mesures de frottement. Pour les enrobés bitumineux, la non prise en compte du bitume et de son décapage non-uniforme avec le polissage dans le modèle de contact limite son efficacité dans l'étude de l'évolution de l'adhérence avec le polissage.

En complément, le calcul de la perte d'énergie de déformation de la gomme, suite à l'application du modèle de contact viscoélastique permet une bonne estimation numérique de l'adhérence globale mesurée.

Puis, le modèle est finalement appliqué sur les décompositions multiéchelles des surfaces. Les petites échelles ayant les plus grandes pressions de contacts sont celles qui ont les niveaux de frottement les plus élevés. L'évolution du coefficient de frottement multiéchelle est similaire à celle du frottement global mesuré. La somme des coefficients de frottement permet de retrouver le frottement global, mais avec un décalage. Ce décalage est dû à la non prise en compte du poids différent des différentes échelles dans le frottement global.

Des coefficients de pondération basées sur les niveaux de frottements multiéchelles permettent une meilleure estimation du frottement global à partir du frottement à chaque échelle. Cette pondération permet de tenir compte de la présence des petites échelles au-dessus des grandes échelles, comme la microtexture au-dessus des granulats des mosaïques. Pour les enrobés bitumineux, on retrouve les mêmes limitations que celles observées avec le modèle de contact élastique dues à la non prise en compte de la phase de décapage du liant. Cet aspect fait partie des perspectives de ce travail de thèse.

## 6. Conclusion générale

#### Bilan des travaux effectués

Cette étude est motivée par une meilleure compréhension des phénomènes physiques à l'origine de l'adhérence entre le pneu et la chaussée et son évolution avec le polissage. Les études précédentes sur ce sujet ont fait l'objet de l'étude bibliographique (chapitre 1) et montrent l'effet important de la texture de la chaussée sur les niveaux d'adhérence d'un couple gomme d'un pneu et la chaussée et son évolution avec le temps. Notre étude consistait à développer une méthode de décomposition multiéchelle de la texture de la chaussure permettant d'étudier l'effet des différentes échelles de texture sur l'adhérence et de son évolution avec le polissage. La méthodologie est détaillée au chapitre 2.

Dans le chapitre 3, une étude expérimentale est menée pour confirmer l'effet de la texture sur l'évolution de l'adhérence et pour faire la mesure de l'évolution de la texture ainsi que de l'adhérence avec le polissage. Cette étude est faite sur des échantillons de mosaïques de granulats fabriqués en laboratoire et d'enrobés bitumineux du projet I-STREET, financé dans le cadre du PIA (Plan d'Investissement et d'Avenir) et coordonné par Eiffage. Les mosaïques de granulats ont été considérés pour faire une analyse indépendante du liant bitumineux. Le polissage des différents échantillons est effectué avec la Wehner&Schulze qui permet de simuler l'effet du trafic routier sur l'évolution de la texture. Une cartographie 3D est faite à chaque état de polissage grâce à un microscope optique à variation focale, Alicona Infinite Focus.

Cette étude expérimentale a permis de remarquer que sur les mosaïques de granulats, le polissage entraine une harmonisation de la hauteur des aspérités de la surface et un aplanissement de la surface de l'échantillon. Une distinction est remarquée entre les formules monominérales et les formules polyminérales. Les formules monominérales subissent une usure générale caractérisée par une diminution de la hauteur de toutes les aspérités avec le polissage. Les formules polyminérales subissent en plus de l'usure générale, une usure différentielle. L'usure différentielle est caractérisée par une usure plus prononcée des minéraux fragiles par rapport aux minéraux durs. Cela occasionne une recréation de la texture et limite la variation de l'adhérence. En effet, c'est l'usure des aspérités avec le polissage qui entraine une diminution de l'adhérence. Cette diminution est plus remarquée dans les premières phases de polissage (entre 0 et 5 000 passages).

Sur les enrobés bitumineux, le polissage entraine un décapage continu du liant bitumineux ainsi qu'une usure des aspérités. Ce décapage est remarqué en majorité dans les premières phases de polissage (entre 0 et 10 000 rotations de la machine de polissage) occasionnant une mise à nu des granulats. Cela entraine une augmentation de l'adhérence. Ce décapage du bitume n'est pas uniforme sur toute la surface des échantillons, rajoutant ainsi une complexité dans l'étude de la texture des enrobés bitumineux. Cette augmentation est plus grande pour les formules d'enrobés contenant des granulats 0/2 qui permettent d'avoir des arêtes vives. Cette phase est suivie d'une diminution de l'adhérence due à l'usure des aspérités. Dans cette phase d'usure, l'évolution de l'adhérence des enrobés bitumineux est similaire à celle des mosaïques de granulats.

Les paramètres de texture standards sont calculés sur les cartographies faites. Les paramètres calculés sont les paramètres de hauteurs Sq, la pente Sdq, la densité des sommets Sds, la courbure Ssc, la dimension fractale Sfd et le volume de matière des sommets Vmp. L'analyse de l'évolution de ces paramètres de texture avec le polissage a permis de valider les observations faites précédemment. Le polissage entraine une réduction du Sq, du Sdq, du Ssc et du Vmp. Cette diminution est liée à l'usure des aspérités. Les micro-rayures provoquées par les poussières fines issues du polissage, l'usure différentielle ainsi que le compactage des débris arrachés (pour les enrobés bitumineux) peuvent entrainer une augmentation du Sds et du Sfd. Ceci entraine une recréation de la texture.

La méthode de décomposition multiéchelle à base d'ondelettes continues déjà utilisée dans d'autres domaines (traitement du signal, détection des défauts dans les structures, l'archéologie et l'étude des

finitions des pièces industrielles) est adaptée à la surface routière. Cette méthode est testée dans le chapitre 4. L'évolution multiéchelle des paramètres de texture standard est analysée.

Sur les mosaïques de granulats, l'évolution des paramètres de texture multiéchelles permet de représenter les phénomènes d'usure générale et d'usure différentielle. Ceci est remarqué par la différence de variation du Sq, du Ssc, du Sdq et du Vmp entre les formules polyminérales et celles monominérales. L'évolution des paramètres multiéchelles tient compte de la dureté et de la composition minéralogique des granulats. La faible réduction et/ou l'augmentation des paramètres multiéchelles de texture explique la faible diminution de l'adhérence avec le polissage. La méthode développée permet de confirmer l'effet de la microtexture sur l'évolution de l'adhérence avec le polissage. Cela correspond à des échelles inférieures à  $500 \ \mu m$ . Ces petites échelles sont celles qui ont les plus grandes pentes et les plus grandes courbures permettant d'avoir les plus grandes pressions de contact et ainsi une bonne adhérence.

Sur les enrobées bitumineux, la méthode développée permet d'observer les phénomènes de décapage du bitume, l'usure des granulats et le compactage des débris arrachés. Le décapage du bitume dans les premières phases du polissages (0 – 10 000 passages de la machine Wehner&Schulze) entraine une augmentation du Sq, du Vmp, du Sdq et du Ssc pour les échelles supérieures à  $300 \,\mu m$  permettant ainsi une augmentation de l'adhérence. La diminution de ces paramètres entre 10 000 passages et 180 000 passages de la machine Wehner&Schulze explique la diminution de l'adhérence.

Dans le chapitre 5, les modèles de contacts élastique et viscoélastique sont utilisés pour l'étude de l'effet des différentes échelles de texture sur les variations de l'adhérence. Ces modèles sont utilisés pour valider la possibilité du couplage de la méthode de décomposition multiéchelle et d'un modèle physique de contact dans l'estimation de l'adhérence.

Le modèle de contact utilisé est basé sur la théorie de l'espace semi-infini élastique. Le modèle viscoélastique est développé à partir du modèle élastique en se basant sur le principe de superposition. Le module de cisaillement est remplacé par la fonction de fluage qui dépend du temps. Une caractérisation viscoélastique de la gomme de la machine Wehner&Schulze est fait en utilisant la DMA (Dynamic Mechanical Analysis). La fonction de fluage qui a été obtenue a été intégrée au modèle de contact.

L'application du modèle est faite en premier sur des surfaces générées numériquement. Ceci permet de limiter leur complexité par rapport aux surfaces réelles. Des surfaces composées de demi-sphères sont générées. De la microtexture composée de demi-sphères et de la microtexture fractale est rajoutée sur cette surface. Les rayons des demi-sphères ainsi que la dimension fractale sont variés pour représenter les différentes échelles. Pour ces surfaces, le paramètre de texture Sq est aussi contrôlé. Il est pris dans la gamme de ceux obtenus expérimentalement pour se rapprocher des surfaces réelles. Cette étude à confirmer que ce sont les petites échelles qui permettent d'avoir de fortes pressions de contact. Ces petites échelles présentent des arêtes vives, très pentus générant de fortes pressions et de faibles surfaces de contact. Il est remarqué que la présence de plusieurs grands sommets permet de limiter l'enfoncement des aspérités dans la gomme.

L'application du modèle de contact sur les surfaces de mosaïques de granulats a prouvé son efficacité à être appliqué à l'étude de la variation de l'adhérence avec le polissage. Le polissage entraine une homogénéisation de la hauteur des aspérités. Ainsi, plusieurs aspérités viennent en contact avec la gomme limitant l'enfoncement de ces dernières. Cette homogénéisation de la hauteur des aspérités est faite en parallèle d'un aplanissement progressif de la surface des aspérités. Cela augmente la surface de contact et entraine une diminution des pressions de contact. Pour les enrobés bitumineux, la non prise en compte du comportement du liant bitumineux ne permet pas d'utiliser directement ce modèle de contact pour l'étude de l'évolution de l'adhérence.

La méthode de décomposition multiéchelle développée dans cette thèse a montré son efficacité avec le couplage à un modèle physique de contact pour l'étude de l'évolution de l'adhérence. L'évolution des paramètres de texture multiéchelles tels que le Sdq et le Ssc permet de décrire les paramètres de contacts (pressions maximales de contact, enfoncements maximaux des aspérités dans la

#### gomme).

Le calcul de l'énergie de déformation de la gomme lors de son déplacement sur la surface des échantillons permet une bonne estimation numérique de l'adhérence du couple gomme/mosaïque de granulats.

Le calcul de l'adhérence est finalement fait sur les résultats de la décomposition multiéchelle. Il est observé que toutes les échelles de texture ne contribuent pas de manière équivalente dans la génération de l'adhérence. La prise en compte du poids de chaque, basée sur un coefficient de pondération permet une amélioration de l'estimation de l'adhérence globale à partir de l'adhérence multiéchelle. Les résultats s'avèrent probants sur les mosaïques de granulats. Pour les enrobés bitumineux, les grandes tendances d'évolution sont respectées mais la non prise en compte du décapage du liant s'avère limitant.

#### > Perspectives

Cette étude a confirmé l'effet des différentes échelles de texture sur l'évolution de l'adhérence avec le polissage. La méthode de décomposition multiéchelle à base d'ondelettes continues permet l'étude de l'effet de ces échelles de texture sur l'adhérence. Cette méthode peut être couplée à un modèle de contact.

L'effet du liant bitumineux n'est pas pris en compte dans notre étude. Il serait intéressant de l'intégrer dans la définition des paramètres de texture. Des fonctions de décapage de la texture, existant dans la littérature associée à l'étude du comportement du troisième corps que représentent les particules arrachées par le polissage pourraient permettre de définir des paramètres de texture plus pertinents pour l'étude de la texture des enrobés bitumineux.

L'utilisation de ces fonctions de décapage ou l'application de la théorie des massifs semi-infinis avec un revêtement permettraient aussi de tenir compte du liant bitumineux dans le modèle de contact.

Ce modèle de contact peut être complété par la prise en compte du cisaillement, de la pression hydrodynamique générée par la présence de l'eau et des contaminants à la surface de la chaussée et l'effet de la température locale de contact.

L'association à la décomposition multiéchelle permettrait alors de déterminer le poids des différentes échelles de texture en fonction des phénomènes étudiés. Ces poids peuvent être associés à un système d'optimisation, en couplage avec plusieurs modèles physiques. Avec l'association à d'autres mécanismes issus du contact pneu/chaussée comme la résistance au roulement, le bruit de roulement, des compromis peuvent être trouvés pour avoir des chaussées sûres et écologiques.

La méthode de décomposition multiéchelle peut aussi être associé aux différentes méthodes de production des granulats. Cela permettra de choisir la méthode la plus efficace en fonction de l'échelle de texture privilégiée.

### Annexes



## A. Variation des mesures d'adhérence

Figure A.1 : Variabilité de la mesure de l'adhérence

## B. Cartographies des échantillons

### B.1. Prétraitement des cartographies



Figure B.1 : Cartographie brute


Figure B.2 : Rebouchage des points non mesurés



Figure B.3 : Artefacts et bruits de mesure



Figure B.4 : Suppression des artefacts et bruit de mesure



Figure B.5 : Forme de la cartographie



Figure B.6 : Suppression de la forme



Figure B.7 : Suppression de la pente



Figure B.8 : Extraction de la surface de taille souhaitée

#### B.2. Evolution 3D de la texture avec le polissage

# B.2.1. Echantillons de mosaïques de granulats : taille $50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$



Figure B.9 : S1, évolution de la texture avec le polissage



Figure B.10 : S2, évolution de la texture avec le polissage



Figure B.11 : S3, évolution de la texture avec le polissage



Figure B.12 : S4, évolution de la texture avec le polissage





Figure B.13 : S5, évolution de la texture avec le polissage

## B.2.2. Echantillons de mosaïques de granulats : taille $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ au-dessus des cailloux



Figure B.14 : S1, évolution de la texture avec le polissage



Figure B.15 : S2, évolution de la texture avec le polissage



Figure B.16 : S3, évolution de la texture avec le polissage



Figure B.17 : S4, évolution de la texture avec le polissage



Figure B.18 : S5, évolution de la texture avec le polissage





Figure B.19 : F1, évolution de la texture avec le polissage



Figure B.20 : F2, évolution de la texture avec le polissage





Figure B.21 : F3, évolution de la texture avec le polissage



Figure B.22 : F4, évolution de la texture avec le polissage





Figure B.23 : F4 bis, évolution de la texture avec le polissage



Figure B.24 : F5, évolution de la texture avec le polissage



Figure B.25 : F6, évolution de la texture avec le polissage



Figure B.26 : F7, évolution de la texture avec le polissage

## C. Paramètres standards de texture





Figure C.1 : Variation de la texture pour la formule S1



Figure C.3 : Variation de la texture pour la formule S3



Figure C.4 : Variation de la texture pour la formule S4



Figure C.5 : Variation de la texture pour la formule S5





Figure C.6 : Variation de la texture pour la formule F1



Figure C.7 : Variation de la texture pour la formule F2



Figure C.8 : Variation de la texture pour la formule F3



Figure C.9 : Variation de la texture pour la formule F4



Figure C.10 : Variation de la texture pour la formule F4 bis



Figure C.11 : Variation de la texture pour la formule F5



Figure C.12 : Variation de la texture pour la formule F6



Figure C.13 : Variation de la texture pour la formule F7

## D. Analyse multiéchelle

#### D.1. Evolution de la texture avec le polissage pour quelques échelles de la microtexture pour une mosaïque de granulat



Figure D.1 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage



Figure D.2 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage, échelle 7  $\mu m$ 



Figure D.3 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage, échelle 50 µm



Figure D.4 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage, échelle  $100 \ \mu m$ 



Figure D.5 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage, échelle 200 µm



Figure D.6 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage, échelle  $300 \ \mu m$ 



Figure D.7 : Formule S5, évolution de la texture avec le polissage, échelle  $500 \ \mu m$ 

#### D.2. Evolution de la texture avec le polissage pour quelques échelles de la microtexture pour des enrobés bitumineux



Figure D.8 : Evolution multiéchelle de la texture, F1, zone 1



Figure D.9 : Evolution multiéchelle de la texture, F2, zone 1



Figure D.10 : Evolution multiéchelle de la texture, F3, zone 1



Figure D.11 : Evolution multiéchelle de la texture, F4, zone 1



Figure D.12 : Evolution multiéchelle de la texture, F4 bis, zone 1



Figure D.14 : Evolution multiéchelle de la texture, F6, zone 1



Figure D.15 : Evolution multiéchelle de la texture, F7, zone 1

## Bibliographie

- 1. OMS: Les ministres vont adopter un nouveau programme mondial de sécurité routière à l'horizon 2030, https://www.who.int/fr/news/item/07-02-2020-ministers-to-agree-new-global-road-safety-agenda-to-2030, (2021)
- 2. ONISR: La sécurité routière en France, Bilan de l'accidentalité de l'année 2019. ONISR (2019)
- Kane, M., Edmondson, V.: Skid resistance: understanding the role of road texture scales using a signal decomposition technique and a friction model. International Journal of Pavement Engineering. 0, 1–15 (2020). https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1757669
- 4. Do, M.-T.: Contribution des échelles de texture routière à l'adhérence des chaussées. (2004)
- 5. ISO 13473-1: Characterization of pavement texture by use of surface profiles Part 1: determination of mean profile depth. ISO Standard, (2019)
- Nataadmadja, A.D., Do, M.T., Wilson, D.J., Costello, S.B.: Quantifying aggregate microtexture with respect to wear—Case of New Zealand aggregates. Wear. 332–333, 907–917 (2015). https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.11.028
- Zahouani, H., Vargiolu, R., Do, M.T.: Characterization of microtexture related to wet road/tire friction. Proceedings of the 4th international symposium on pavement surface characteristics. 195– 205 (2000)
- Cerezo, V., Ropert, C., Hichri, Y., Do, M.-T.: Evolution of the road bitumen/aggregate interface under traffic-induced polishing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 233, 1433–1445 (2019). https://doi.org/10.1177/1350650119829370
- 9. Do, M.-T., Cerezo, V.: Road surface texture and skid resistance. Surface Topography: Metrology and Properties. 3, 043001 (2015). https://doi.org/10.1088/2051-672x/3/4/043001
- 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
- 11. Persson, B.N.J.: Theory of rubber friction and contact mechanics. \jcp. 115, 3840-3861 (2001). https://doi.org/10.1063/1.1388626
- 12. Bugnicourt, R.: Simulation of the contact between a rough surface and a viscoelastic material with friction, (2017)
- Greenwood, J.A., Williamson, J.B.P., Bowden, F.P.: Contact of nominally flat surfaces. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 295, 300–319 (1966). https://doi.org/10.1098/rspa.1966.0242
- Greenwood, J.A., Tabor, D.: The Friction of Hard Sliders on Lubricated Rubber: The Importance of Deformation Losses. Proceedings of the Physical Society. 71, 989–1001 (1958). https://doi.org/10.1088/0370-1328/71/6/312
- 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). https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00113-1
- 16. Britton, S.C., Ledbetter, W.B., Gallaway, B.M.: Estimation of skid numbers from surface texture parameters in the rational design of standard reference pavements for test equipement calibration. Journal of Testing and Evaluation. 2, 1974
- 17. Stout, K.J., Dong, W.P., Mainsah, E., Luo, N., Mathia, T., Zahouani, E.H.: The development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions. , Brussels (1993)
- 18. ISO 25178: Spécifications géométriques des produits (GPS) Etat de surface : Surfacique Partie 2 : Termes, définitions et paramètres d'état de surface.
- 19. ISO 4287: Spécification géométrique des produits (GPS). ISO Standard (1998)
- ISO 13565-2: Geometrical Product Specifications (GPS) Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties — Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve. (1996)
- 21. Bhushan: Introduction to Tribology, 2nd Edition.
- 22. Antoine, J.-P., Murenzi, R.: Two-dimensional directional wavelets and the scale-angle representation. Signal Processing. 52, 259–281 (1996). https://doi.org/10.1016/0165-1684(96)00065-5
- 23. Farge, M., Schneider, K.: Wavelet transforms and their applications to MHD and plasma turbulence: a review. Journal of Plasma Physics. 81, 435810602 (2015). https://doi.org/10.1017/S0022377815001075

- 24. Kestern, P., Arneodo, A.: A wavelet-based method for multifractal analysis of 3D random fields : application to turbulence simulation data. Presented at the , Chamonix, France June (2003)
- 25. 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). https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00105-3
- Dunford, A.M., Parry, A.R., Shipway, P.H., Viner, H.E.: Three-dimensional characterisation of surface texture for road stones undergoing simulated traffic wear. Wear. 292–293, 188–196 (2012). https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.05.010
- 27. Zahouani, H., Mezghani, S., Vargiolu, R., Dursapt, M.: Identification of manufacturing signature by 2D wavelet decomposition. Wear. 264, 480–485 (2008). https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.08.047
- 28. Do, M.T.: Adhérence des chaussées : de l'étude cognitive aux applications, https://tel.archivesouvertes.fr/tel-00851220, (2010)
- 29. MICHELIN: Le pneu-l'adhérence. Société de technologie Michelin (2000)
- 30. Parczewski, K., Wnek, H.: Make use of friction coefficient during braking the vehicle, (2012)
- 31. Hall, J., Glover, L., Smith, K., Evans, L., Wambold, JC., Yager, T.J., Rada, Z.: Guide for Pavement Friction. (2006)
- 32. Savkoor, A.R.: Paper VIII (iii) Tribology of Tyre Traction on Dry and Wet Roads. In: Dowson, D., Taylor, C.M., and Godet, M. (eds.) Vehicle Tribology. pp. 213–228. Elsevier (1991)
- 33. Giles, C.G., Sabey, B.E.: The effect of pressure and friction on photographic emulsion, (1951)
- 34. Grime, G., Giles, C.G.: The skid resisting properties of road and tyres. Presented at the Proc. Instn Mech Engrs, London May (1954)
- 35. Taneerananon, P., Yandell, W.O.: Microtexture roughness effect on predicted road tyre friction in wet conditions. Wear. 69, 321–337 (1981)
- 36. Yandell, W.O.: A new theory of hydteretic sliding friction. Wear. 17, 229-244 (1971)
- 37. Britton, S.C., Ledbetter, W.B., Gallaway, B.M.: Estimation of skid numbers from surface texture parameters in the rational design of standard reference pavements for test equipement calibration. Journal of Testing and Evaluation. 2, 1974
- 38. Lees, G., Ktekhda, I. e. D., Bond, R., Williams, A.R.: The design and performance of high friction dense asphalts. (1976)
- 39. Williams, A.R., Lees, G.: Topographical and petrographical variation of road aggregates and wet skidding resistance of tyres. Journal of Engineering Geology. 2, 217–236 (1970)
- 40. Do, M.T., Marsac, P., MOSSET, A.: Tribology Approach to Predict the Variation of Tire/Wet Road Friction with Slip Speed. In: SURF 2004 - 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics. pp. 15p, tableaux, ill.schémas, graphiques, bibliogr., Canada (2004)
- 41. Kulakowski, BT., Hardwood, DW.: Effect of water-film thickness on tire-pavement friction. In: Surface characteristics of roadways. pp. 50–60. , Philadelphia (1990)
- 42. Veith, A.: Tires-roads-rainfall-vehicles: the traction connection. Presented at the , Philadelphia (1983)
- 43. Do, M.-T., Cerezo, V.: Road surface texture and skid resistance. In: Surface Topography: Metrology and properties (2015)
- 44. Hichri, Y.: Adhérence des chaussées contaminées par des particules, https://tel.archivesouvertes.fr/tel-02119522, (2019)
- 45. Caractéristiques de surface des routes et aérodromes Méthode d'essai Partie 4 : méthode d'essai pour mesurer l'adhérence d'une surface : l'essai au pendule Caractéristiques de surface des routes et aéroports. AFNOR (2012)
- 46. Delanne, Y., Do, M.-T., Gothié, M., Delalande, G.: Potentiel d'adhérence du couple pneumatique/chaussée. (2006)
- BEAUTRU, Y., Cerezo, V., Do, M.T., Kane, M.: Influence of thin water film on skid resistance. In: SURF 2012 (7th Symposium on Pavement Surface Characteristics). pp. 15p, tableaux, ill.schémas, graphiques, bibliogr., France (2012)
- 48. ASTM E1911-09ae1, Standard Test Method for Measuring Paved Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester. ASTM International, West Conshohocken, PA (2009)
- Comité Européen de Normalisation: Mélanges bitumineux Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 49: Détermination du coefficient de frottement après polissage. (2013)
- 50. Leu, M.C., Henry, J.J.: Prediction of skid resistance as a function of speed from pavement texture and measurements. (1978)
- 51. Do, M.-T., Marsac, P., Mosset, A.: Tribology Approach to Predict the Variation of Tire/Wet Road Friction with Slip Speed. Presented at the SURF 2004 - 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics, Canada June (2004)

- 52. Cerezo, V., Do, M.-T., Prevost, D., Bouteldja, M.: Friction/water depth relationship—In situ observations and its integration in tire/road friction models. Proc IMechE Part J: J Engineering tribology. 228, 1285–1297 (2014)
- 53. Greenwood, J.A.: A Unified Theory of Surface Roughness. Proceedings of the Royal Society of London Series A. 393, 133–157 (1984). https://doi.org/10.1098/rspa.1984.0050
- 54. Do, M.-T., Zahouani, H.: Frottement pneumatique / chaussée influence de la microtexture des surfaces de chaussée. Presented at the (2001)
- 55. Do, M.-T.: Contribution des échelles de texture routière à l'adhérence des chaussées. (2004)
- 56. Greenwood, J.A., Tabor, D.: The friction of hard sliders on lubricated Rubber: The importance of deformation losses, (1958)
- 57. Kane, M., Cerezo, V.: A contribution to tire/road friction modeling: From a simplified dynamic frictional contact model to a "Dynamic Friction Tester" model. Wear. 342–343, 163–171 (2015). https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.08.007
- Kane, M., Do, M.-T., Cerezo, V., Rado, Z., Khelifi, C.: Contribution to pavement friction modelling: an introduction of the wetting effect. International Journal of Pavement Engineering. 20, 965–976 (2019). https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1369776
- 59. Ueckermann, A., Wang, D., Oeser, M., Steinauer, B.: Calculation of skid resistance from texture measurements. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2, 3–16 (2015). https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.01.001
- Chou, C.-P., Lee, C.-C., Chen, A.-C., Wu, C.-Y.: Using a constructive pavement texture index for skid resistance screening. International Journal of Pavement Research and Technology. 10, 360– 368 (2017). https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.05.002
- Li, Q. (Joshua), Yang, G., Wang, K.C.P., Zhan, Y. (Jason), Wang, C.: Novel Macro- and Microtexture Indicators for Pavement Friction by Using High-Resolution Three-Dimensional Surface Data. Transportation Research Record. 2641, 164–176 (2017). https://doi.org/10.3141/2641-19
- 62. TANG, Z.: Polishing and Skid-Resistance of Road Pavements, (2007)
- 63. Zhao, D.: Evolution de l'adhérence des chaussées Influence des matériaux, du vieillissement et du trafic, (2011)
- 64. Characterization of pavement texture by use of surface profiles Part 1: determination of mean profile depth. ISO Standard, (1997)
- 65. Pomoni, M., Plati, C., Loizos, A., Yannis, G.: Investigation of pavement skid resistance and macrotexture on a long-term basis. International Journal of Pavement Engineering. 0, 1–10 (2020). https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1788029
- 66. Feder, J.: Fractals. , New Yor (1988)
- 67. Zahouani, H., Mansori, M.E.: Multi-scale and multi-fractal analysis of abrasive wear signature of honing process. Wear. 376–377, 178–187 (2017). https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.087
- 68. Schmittbuhl, J., Gentier, S., Roux, S.: Field measurements of the roughness of fault surfaces. Geophysical research letter. 20, 639–641 (1993)
- Zahouani, H., Vargiolu, R., Loubet, J.-L.: Fractal models of surface topography and contact mechanics. Mathematical and Computer Modelling. 28, 517–534 (1998). https://doi.org/10.1016/S0895-7177(98)00139-3
- 70. MountainsMap: https://www.digitalsurf.com/fr/
- 71. Stout, K.J., Dong, W.P., Mainsah, E., Luo, N., Mathia, T., Zahouani, E.H.: The development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions. , Brussels (1993)
- 72. Fahl, C.F.: Motif combination a new approach to surface profile analysis\*, (1982)
- 73. Zahouani, H.: Spectral and 3D motifs identification of anisotropic topographical components. Analysis and filtering of anisotropic patterns by morphological rose approach. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 38, 615–623 (1998). https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00109-0
- Peucker, T.K., Douglas, D.H.: Detection of Surface-Specific Points by Local Parallel Processing of Discrete Terrain Elevation Data. Computer Graphics and Image Processing. 4, 375–387 (1975). https://doi.org/10.1016/0146-664X(75)90005-2
- Brown, C.A., Hansen, H.N., Jiang, X.J., Blateyron, F., Berglund, J., Senin, N., Bartkowiak, T., Dixon, B., Goïc, G.L., Quinsat, Y., Stemp, W.J., Thompson, M.K., Ungar, P.S., Zahouani, E.H.: Multiscale analyses and characterizations of surface topographies. CIRP Annals. 67, 839–862 (2018). https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.06.001
- 76. Mezghani, S.: Approches multi-échelles de caractérisation tridimensionnelle des surfaces Applications aux procédés d'usinage –, (2005)

- 77. Chen, X., Raja, J., Simanapalli, S.: Multi-scale analysis of engineering surfaces. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 35, 231–238 (1995). https://doi.org/10.1016/0890-6955(94)P2377-R
- 78. Wolf, D., Husson, R.: Application des ondelettes à l'analyse de texture et à l'inspection de surface industrielle. Journal de Physique III. 3, 2133–2148 (1993). https://doi.org/10.1051/jp3:1993266
- 79. Martin, V., JELENA, K.: Wavelets and subband coding. , New Jersey (1995)
- Zelelew, H., Khasawneh, M., Abbas, A.: Wavelet-based characterisation of asphalt pavement surface macro-texture. Road Materials and Pavement Design. 15, 622–641 (2014). https://doi.org/10.1080/14680629.2014.908137
- Zelelew, H.M., Papagiannakis, A.T., Izeppi, E.D. de L.: Pavement macro-texture analysis using wavelets. International Journal of Pavement Engineering. 14, 725–735 (2013). https://doi.org/10.1080/10298436.2012.705004
- Du, Y., Weng, Z., Li, F., Ablat, G., Wu, D., Liu, C.: A novel approach for pavement texture characterisation using 2D-wavelet decomposition. International Journal of Pavement Engineering. 0, 1–16 (2020). https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1825712
- Torrence, C., Compo, G.P.: A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bulletin of the American Meteorological Society. 79, 61–78 (1998). https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2
- Mezghani, S., Sabri, L., Mansori, M.E., Zahouani, H.: On the optimal choice of wavelet function for multiscale honed surface characterization. Journal of Physics: Conference Series. 311, 012025 (2011). https://doi.org/10.1088/1742-6596/311/1/012025
- Edjeou, W., Cerezo, V., Zahouani, H., Salvatore, F.: Multiscale analyses of pavement texture during polishing. Surface Topography: Metrology and Properties. 8, 024008 (2020). https://doi.org/10.1088/2051-672x/ab8f1b
- 86. Mezghani, S.: Approches multi-échelles de caractérisation tridimensionnelle des surfaces Applications aux procédés d'usinage –, (2005)
- 87. Antoine, J.-P., Murenzi, R.: Two dimensional directional wavelets and the scale-angle représentation, (1996)
- 88. BS EN 1097-8: Tests for mechanical and physical properties of aggregates-Determination of the polished stone value,. British Standard Institution, London (2020)
- 89. Pouget, S., Olard, F.: Enrobé Acoustique à multiples discontinuités et porosités pour voie de circulation
- Gourdon, E., Pouget, S., Olard, F.: Use of image analysis to predict the sound absorption coefficient of bituminous mixtures. Road Materials and Pavement Design. 19, 1259–1274 (2018). https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1303393
- 91. Alicona: https://www.alicona.com/fr/produits/infinitefocus/?PageSpeed=noscript
- 92. Fillot, N., Iordanoff, I., Berthier, Y.: Wear modeling and the third body concept. Wear. 262, 949–957 (2007). https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.10.011
- 93. Bellanger, J., Delalande, G., Dupont, P., Ganga, Y.: In: Aggregate-skid resistance trial sections: one-year results (in French). pp. 40–43 (1994)
- 94. Bellanger, J., Delalande, G., Dupont, P., Ganga, Y.: In: Aggregate-skid resistance trial sections: three-year results (in French). pp. 42–46 (1996)
- 95. Tourenq, C., Fourmaintraux, D.: Propriétés des granulats et glissance routière. (1971)
- 96. Do, M.T., Tang, Z.Z., Kane, M., De Larrard, F.: Evolution of road-surface skid-resistance and texture due to polishing. Wear. 266, pp 574-577 (2009). https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.060
- 97. Lédée, V., Delalande, G., Dupont, P.: Adhérence et granulats.
- 98. Boussinesq, J.: application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. (1969)
- 99. Cerruti, V., Lincei, R.A. dei: Ricerche intorno all'equilibrio de' corpi elastici isotropi: memoria. Coi tipi del Salviucci (1882)
- 100. LOVE, A.E.H.: A treatise on the mathematical theory of elasticity. (1892)
- 101. Johnson, K.L.: Contact Mechanics. , London
- 102. Gallego, L., Nelias, D., Deyber, S.: A fast and efficient contact algorithm for fretting problems applied to fretting modes I, II and III. Wear. 268, 208–222 (2010)
- 103. Love, A.E.H.: The Stress Produced in a Semi-Infinite Solid by Pressure on Part of the Boundary. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character. 228, 377–420 (1929)
- 104. Liu, S., Wang, Q., Liu, G.: A versatile method of discrete convolution and FFT (DC-FFT) for contact analyses. Wear. 243, 101–111 (2000). https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00427-0
- 105. Gallego, L.: Fretting et Usure des contacts Mécaniques : Modélisation Numérique, (2007)

- 106. Spinu, S., Cerlind, D.: Modelling of Rough Contact between Linear Viscoelastic Materials. Modelling and Simulation in Engineering. 2017, 1–11 (2017)
- 107. Lee, E.H., Radok, J.R.M.: The Contact Problem for Viscoelastic Bodies. Journal of Applied Mechanics. 27, 438–444 (1960). https://doi.org/10.1115/1.3644020
- 108. Wayne Chen, W., Jane Wang, Q., Huan, Z., Luo, X.: Semi-Analytical Viscoelastic Contact Modeling of Polymer-Based Materials. Journal of Tribology. 133, (2011). https://doi.org/10.1115/1.4004928
- 109. Koumi, K.E., Nelias, D., Chaise, T., Duval, A.: Modeling of the contact between a rigid indenter and a heterogeneous viscoelastic material. Mechanics of Materials. 77, 28–42 (2014). https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2014.07.001
- 110. Ting, T.C.T.: The Contact Stresses Between a Rigid Indenter and a Viscoelastic Half-Space. Journal of Applied Mechanics. 33, 845–854 (1966). https://doi.org/10.1115/1.3625192
- 111. Ting, T.C.T.: Contact Problems in the Linear Theory of Viscoelasticity. Journal of Applied Mechanics. 35, 248–254 (1968). https://doi.org/10.1115/1.3601188
- 112. Findley, W., Lai, J., Onaran, K.: Creep and relaxation of Nonlinear viscoelastic materials.
- 113. Riahi, E., Do, M.T., Kane, M.: A new energetic approach to model the rolling resistance of road pavement (en review)
- Williams, M.L., Landel, R.F., Ferry, J.D.: The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. J. Am. Chem. Soc. 77, 3701–3707 (1955). https://doi.org/10.1021/ja01619a008
- 115. Mandelbrojt, S.: Dirichlet Series: Principles and Methods. Presented at the (1971)
- Hristov, J.Y.: Linear Viscoelastic Responses: The Prony Decomposition Naturally Leads Into the Caputo-Fabrizio Fractional Operator. Frontiers in Physics. 6, (2018). https://doi.org/10.3389/fphy.2018.00135
- Jalocha, D., Constantinescu, A., Neviere, R.: Revisiting the identification of generalized Maxwell models from experimental results. International Journal of Solids and Structures. 67–68, 169–181 (2015). https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.04.018
- 118. Netzband, D., Dietrich, S., Michael, G.: DMA2PRONY\_OPT, Manual -. South Westphalia University of Applied Science, Germany (2018)
- 119. Duan, J., Yang, C., Shuai, C.: Fitting methods for relaxation modulus of viscoelastic materials. Journal of Central South University of Technology. 14, 248–250 (2007). https://doi.org/10.1007/s11771-007-0049-5
- 120. Ho, C.-H., Romero, P.: Alternative Function to Represent Relaxation Modulus of Viscoelastic Materials. Journal of Materials in Civil Engineering. 24, 152–158 (2012). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000378
- Stadler, F.J., Bailly, C.: A new method for the calculation of continuous relaxation spectra from dynamic-mechanical data. Rheologica Acta. 48, 33–49 (2009). https://doi.org/10.1007/s00397-008-0303-2
- Luk-Cyr, J., Crochon, T., Li, C., Lévesque, M.: Interconversion of linearly viscoelastic material functions expressed as Prony series: a closure. Mechanics of Time-Dependent Materials. 17, 53– 82 (2013). https://doi.org/10.1007/s11043-012-9176-y
- 123. Sabey, B.E.: Pressure Distributions beneath Spherical and Conical Shapes pressed into a Rubber Plane, and their Bearing on Coefficients of Friction under Wet Conditions. Proceedings of the Physical Society. 71, 979–988 (1958). https://doi.org/10.1088/0370-1328/71/6/311
- 124. Miao, Y., Song, P., Gong, X.: Fractal and Multifractal Characteristics of 3D Asphalt Pavement Macrotexture. Journal of Materials in Civil Engineering. 26, 04014033–04014033 (2014)
- 125. Yongjie, L., Wenqing, H., Jun-ning, Z.: Construction of Three-Dimensional Road Surface and Application on Interaction between Vehicle and Road. Shock and Vibration. 2018, 1–14 (2018)
- 126. Vallet, C., Lasseux, D., Sainsot, P., Zahouani, H.: Real versus synthesized fractal surfaces: Contact mechanics and transport properties. Tribology International. 42, 250–259 (2008). https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.06.005
- 127. Zahouani, H., Tkaya, M.B., Mezghani, S., Pailler-Mattéi, C.: Adhesive contact in the context of multi-asperity interaction. Comptes Rendus Mécanique. 339, 502–517 (2011). https://doi.org/10.1016/j.crme.2011.05.008
- 128. Dundurs, J., Lee, M.S.: Stress concentration at a sharp edge in contact problems. Journal of Elasticity. 2, 109–112 (1972). https://doi.org/10.1007/BF00046059
- Carbone, G., Putignano, C.: A novel methodology to predict sliding and rolling friction of viscoelastic materials: Theory and experiments. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 61, 1822–1834 (2013). https://doi.org/10.1016/j.jmps.2013.03.005

 Zhang, X., Wang, Q.J., He, T.: Transient and steady-state viscoelastic contact responses of layer-substrate systems with interfacial imperfections. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 145, 104170 (2020). https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.104170



Titre : Analyse multiéchelle de la texture des chaussées – effet sur l'adhérence des revêtements routiers

Mots clés : adhérence, polissage, texture, analyse multiéchelle, modèle de contact, ondelettes

Résumé : Ce travail de thèse a pour objectif de mettre au point une méthode de décomposition multiéchelle permettant d'expliquer l'effet des différentes échelles de texture sur l'évolution de l'adhérence avec le polissage et pouvant être intégrée dans un système d'optimisation multicritères des propriétés des chaussées. Une étude expérimentale est faite en laboratoire sur des échantillons d'enrobés bitumineux et de mosaïques de granulats pour simuler le polissage induit par le trafic routier et cartographier la texture correspondante aux différents états de polissage. Une décomposition multiéchelles à base d'ondelettes continues est ensuite faite sur les différentes cartographies. L'analyse multiéchelle permet d'observer les différents phénomènes impliqués dans le polissage des chaussées (décapage du bitume, mise à nu des granulats,

usure générale, usure différentielle, ...). Enfin, un modèle de contact 3D basé sur la théorie de l'espace semi-infini est appliqué sur les différentes cartographies. Il permet de prendre en compte l'aspect multi-aspérités du contact et la viscoélasticité de la gomme du pneu. En sortie du modèle, nous avons les pressions de contact, les déplacements au niveau de chaque aspérité et l'aire de contact réelle. L'évolution de ces paramètres en fonction du polissage permet de décrire l'évolution de l'adhérence. Ce modèle permet de faire une bonne estimation de l'adhérence. Le couplage entre ce modèle de contact et la méthode de décomposition multiéchelle permet d'estimer l'adhérence globale à partir de l'adhérence multiéchelle. Les poids des différentes échelles sur l'adhérence sont considérés dans ces calculs.

Title : Multiscale analysis of pavement texture - effect on road pavement skid resistance

Keywords : skid resistance, polishing, texture, multiscale analysis, contact model, wavelets

Abstract : The objective of this thesis is to develop a multiscale decomposition method to explain the effect of different texture scales on the evolution of skid resistance with polishing and which can be integrated into a multicriteria optimization system of pavement properties. An experimental study is carried out in the laboratory on samples of asphalt mixes and aggregate mosaics to simulate the polishing induced by road traffic and to map the texture corresponding to the different polishing states. A multiscale decomposition based on continuous wavelets is then done on each map. This multiscale analysis allows us it to observe the various phenomena involve in the polishing of pavements (bitumen removal, general wear, differential wear). Finally, a 3D contact model

based on the theory of semi-infinite space is applied on each maps. It takes into account the multi – asperity aspect of the contact and the viscoelasticity of the tire rubber. At the output of the model, we have the contact pressures, the displacements induced by each asperity in the rubber and the real contact area. Evolution of these contact parameters with polishing permits to describe the evolution of skid resistance. This model permits to make good numerical estimation of skid resistance. Coupling between this contact model and multiscale decomposition metho allows us to estimate the overall skid resistance from multiscale skid resistance. The weights of different scales on skid resistance are considered in these calculations.