N° d'ordre NNT : 2026ECDL0004

THÈSE DE DOCTORAT DE L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON

membre de l'Université de Lyon

École Doctorale N°162 : MEGA - Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique

Spécialité de doctorat : Génie mécanique

Soutenue publiquement le 26 janvier 2026, par :

Garance LIABOEUF

Évolution de l'adhérence de revêtements routiers en fonction de facteurs environnementaux

---

Devant le jury composé de :

Cyrille Chazallon	Professeur des universités, INSA Strasbourg	*Rapporteur*
Honoré Yin	Directeur de recherche, ENPC	*Rapporteur*
Véronique Cerezo	Directrice de recherche, UGE	*Présidente du jury*
Erwan Le Bris	Docteur, ATMB	*Examinateur*
Simon Pouget	Docteur, Eiffage Route	*Examinateur*
Anne Dony	Enseignant-chercheur, ESTP	*Examinatrice*
Alain Le Bot	Directeur de recherche, CNRS	*Directeur de thèse*
Ali Daouadji	Professeur des universités, INSA Lyon	*Co-directeur de thèse*
Mohamed Bouteldja	Docteur, Cerema	*Invité*

Unité de recherche : LTDS - Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes - UMR CNRS 5513

Préambule

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un contrat CIFRE financé par l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT), pour le compte de l'entreprise Autoroutes et Tunnel du Mont-Blanc (ATMB), en collaboration avec les établissements académiques École Centrale de Lyon (Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes – LTDS) et INSA Lyon (Laboratoire de géomécanique, matériaux, structures – GEOMAS). Elle bénéficie du soutien opérationnel et scientifique de deux partenaires, le Cerema et GINGER - CEBTP, qui ont mis à disposition des moyens techniques et expérimentaux nécessaires à la réalisation de ce travail. Ce soutien s'est matérialisé par l'accès à des équipements de terrain et de laboratoire, ainsi qu'à des ressources matérielles, logicielles et humaines. La mise en œuvre de ce projet s'est donc appuyée sur une synergie entre des acteurs industriels, académiques et institutionnels, permettant d'assurer à la fois la faisabilité technique des essais et le suivi scientifique des recherches. Cette thèse témoigne de la richesse de cette collaboration pluridisciplinaire et du cadre propice qu'elle a offert à la réalisation de ces travaux.

Liste des communications

État des communications réalisées sur ce travail de thèse au 26 janvier 2026 :

— **17ème Congrès mondial de la Viabilité hivernale, de la Résilience et de la Décarbonation de la Route – 10-13/03/2026 - Chambéry (France)**
Article, présentation orale et poster - Récompensé par PIARC France de la médaille de bronze dans la catégorie « Jeune professionnel » : « Évaluation de l'impact à long terme du passage de lames de déneigement en acier sur l'adhérence de revêtements routiers »

— **Journées Techniques Route – 05-06/02/2025 - Nantes (France)**
Présentation d'un poster récompensé du 2ème prix

— **Conference Civil and Environmental Engineering – 09-10/01/2025 - Vancover (Canada)**
Article et présentation orale - Récompensé du prix du meilleur article - Best Paper Award : « Evaluation of the Impact of Scraping Operations during Winter Road Maintenance on Pavement Skid Resistance »

— **Journées Techniques Route – 07-08/02/2024 - Nantes (France)**
Présentation d'un poster récompensé du 1er prix

Résumé

L'adhérence des chaussées est un paramètre essentiel pour la sécurité et la durabilité des infrastructures routières. Elle est néanmoins soumise à des évolutions sous l'effet de facteurs extérieurs. Ces facteurs, qualifiés d'environnementaux, regroupent l'ensemble des sollicitations appliquées sur un revêtement routier durant sa mise en service. Cette thèse vise à comprendre comment ces facteurs modifient l'état de surface des chaussées et à proposer une loi prédictive permettant d'anticiper l'évolution de leur adhérence. Deux campagnes d'essais expérimentaux complémentaires ont été menées. En laboratoire, seize éprouvettes ont été soumises à des combinaisons de sollicitations équivalentes à trois années de service (trafic, cycles climatiques hivernaux et estivaux, épandage de saumure). Les analyses multi-échelles de texture et les mesures de frottement montrent que les dégradations suivent des mécanismes non linéaires et non cumulatifs. L'étude met également en évidence des évolutions distinctes de la microtexture et de la macrotexture. Sur le terrain, des planches expérimentales du réseau ATMB ont été exposées à un raclage répété par des lames de déneigement en acier, représentant douze années d'opérations de viabilité hivernale. Les résultats confirment l'impact significatif du raclage mécanique sur la surface des chaussées, dont l'intensité dépend de la nature des granulats, de la formulation et des conditions de mise en œuvre de ces dernières. Ces données expérimentales ont permis de développer une loi d'évolution de l'adhérence reposant sur deux modèles intermédiaires, restituant fidèlement les tendances expérimentales et offrant une première approche de prédiction en conditions réelles. Enfin, le modèle mécanique ra3d a été utilisé pour simuler le contact pneumatique-chaussée, mettant en évidence l'influence de la dégradation des surfaces sur la distribution des pressions dans la zone de contact. Ce travail contribue ainsi à une meilleure compréhension des mécanismes de dégradation de l'adhérence et propose des outils prédictifs utiles à la gestion et à la maintenance des réseaux routiers.

Mots-clé : adhérence, chaussée, trafic, climat, saumure, déneigement, texture, frottement, tribologie, loi d'évolution, modélisation, simulation, contact pneumatique-chaussée

Abstract

Road surface skid resistance is a critical factor for the safety and durability of road infrastructure. However, it is subject to changes caused by external factors. These factors, referred to as environmental factors, include all the stresses applied to a road surface during its service life.This thesis aims to understand how these factors alter the surface condition of road pavements and to propose a predictive model for anticipating changes in their skid resistance. Two complementary experimental tests were conducted. In the laboratory, sixteen test specimens were subjected to combinations of stresses equivalent to three years of service (traffic, winter and summer climate cycles, brine spreading). Multiscale texture analyses and friction measurements show that degradation follows non-linear and non-cumulative mechanisms. The study also highlights distinct changes in microtexture and macrotexture. In the field, road samples from the ATMB network were exposed to repeated scraping by steel snowplow blades, representing twelve years of winter maintenance operations. The results confirm the significant impact of mechanical scraping on pavement surfaces, the intensity of which depends on the nature of the aggregates, the mix design, and the conditions under which they are placed. These experimental data have enabled the development of a model for the evolution of skid resistance based on two intermediate models, which accurately reproduce the experimental trends and provide an initial predictive approach under real-world conditions. Finally, the ra3d mechanical model was used to simulate tire-pavement contact, highlighting the influence of surface degradation on pressure distribution in the contact patch. This work thus contributes to a better understanding of the mechanisms of adhesion degradation and proposes predictive tools useful for the management and maintenance of road networks.

Keywords : skid resistance, pavement, traffic, climate, brine, snow removal, texture, friction, tribology, evolution law, modeling, tire-pavement contact

Remerciements

Aujourd'hui que cette thèse est achevée, il m'est essentiel d'exprimer toute ma gratitude à celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. J'ai eu la chance d'être remarquablement bien entourée, tant sur le plan professionnel que personnel. Leur soutien, leurs encouragements et leur bienveillance ont rendu ces trois années non seulement plus riches, mais aussi plus légères. Si j'ai pu mener à bien ce travail, c'est avant tout grâce à l'ensemble des personnes qui m'ont accompagnée sur ce chemin, et je leur en suis profondément reconnaissante. Je n'ai pas cherché ici à être synthétique. Ces remerciements sont à la mesure de l'importance que chacun a eue dans ce parcours.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mes encadrants, qui ont été un véritable soutien tout au long de cette aventure doctorale. Leur présence, leurs conseils et leur disponibilité m'ont guidée et orientée à chaque étape de mes recherches. À Alain Le Bot, mon directeur de thèse, merci de m'avoir ouvert les portes du monde de la recherche et de m'avoir accordé ta confiance. Ta vaste culture scientifique a été une source d'inspiration et d'apprentissage précieux. À Ali Daouadji, mon co-directeur, merci pour ton accueil bienveillant et ton accompagnement constant. Tes réflexions pertinentes, alliées à ta présence attentive, m'ont permis d'avancer avec sérénité et confiance dans les moments les plus complexes. À Mohamed Bouteldja, j'adresse un merci tout particulier : ton aide précieuse, tes conseils avisés et nos longues discussions ont été essentiels à la réussite de ce travail. Tu m'as appris à prendre du recul, à mettre en valeur mes résultats et surtout à « romancer » mon travail pour en révéler toute la portée. Grâce à toi, j'ai grandi scientifiquement, mais aussi humainement. Ton soutien et ta présence constante ont rendu ces trois années bien plus sereines et agréables. Je suis fière d'avoir fait partie de tes doctorantes. À Nicolas Grignard, merci pour ton partage généreux de connaissances et pour la richesse de nos échanges, qu'ils soient scientifiques, techniques ou humains. Ta bonne humeur communicative et ton soutien constant ont été une vraie source d'énergie tout au long de cette thèse. À Antoine Martinet,

merci d'avoir pris ma thèse sous ton aile au sein de l'entreprise. Ton implication a toujours eu pour but de m'apporter sérénité et confiance. Tu as su être un repère solide et rassurant, veillant constamment à ce que tout se déroule au mieux pour moi. Tu as été un véritable pilier de cette aventure, et je t'en suis profondément reconnaissante. À Damien Pilet, merci pour ton expertise, la justesse de tes conseils et la qualité de ton accompagnement. Ta bonne humeur, ton enthousiasme et ton énergie positive ont rendu nos échanges aussi agréables qu'enrichissants, et ont largement contribué à rendre cette aventure plus stimulante. Enfin, je souhaite remercier tout particulièrement Julien Masciotra. Même si tu n'as pas pu faire partie de l'encadrement jusqu'au bout, tu as joué un rôle déterminant au démarrage de cette thèse. C'est grâce à ta confiance et à ton investissement que ce projet a pu voir le jour. Ton engagement, ta vision et ton attachement à cette thématique ont été pour moi une véritable source de motivation dès les premiers instants. J'espère sincèrement que ce manuscrit saura rendre hommage à ton idée, à l'impulsion que tu as donnée et à l'énergie que tu y as consacrée.

Je remercie chaleureusement l'entreprise ATMB, ainsi que le groupe 2D2I et l'équipe informatique, pour leur soutien constant et leurs encouragements. Je suis particulièrement reconnaissante envers la direction, qui a accepté de faire de moi la première doctorante de l'entreprise et qui m'a accordé sa confiance, sa compréhension et les moyens nécessaires pour mener à bien ce travail. Merci de m'avoir fait confiance et d'avoir cru en ce projet. J'espère, à travers ce manuscrit, avoir su rendre hommage à votre esprit d'innovation et à votre capacité à prendre des risques. J'exprime également toute ma gratitude aux techniciens du centre d'exploitation d'Éloise, ainsi qu'à Romain Zuccalli, pour leur rigueur, leur disponibilité et leur aide précieuse lors de la campagne terrain. Leur engagement et leur professionnalisme ont largement contribué à la réussite de cette étude.

Je tiens aussi à remercier toutes les personnes qui m'ont accompagnée sur le plan professionnel. Merci aux membres du Cerema de Bron, et surtout au groupe IA et RN (Zoher Senouci, Aziz Krib, Sylvie Alix, Bachir Tchana Tankeu, Antoine-Victor Chavas, Marc Rolland, Thierry Gibrat, Fabrice Rojat, Bernard Carnus et bien d'autres) pour leur aide constante, leur disponibilité, leurs conseils toujours avisés et les bons moments partagés. Vous avez été présents au quotidien, que ce soit pour répondre à mes demandes, m'accompagner lors des essais ou m'apporter un soutien précieux dans l'avancement de mes travaux. Merci également aux collègues du laboratoire GEOMAS de l'INSA Lyon pour leur énergie et leur joie communicative. Je tiens aussi à remercier Sheng Yuan, du laboratoire MATEIS de

l'INSA Lyon, pour le prêt de son appareil et pour la confiance témoignée à travers cette collaboration. J'adresse également mes remerciements au FABLAB de Vichy, et tout particulièrement à David Bijon, pour son aide précieuse, sa disponibilité et la qualité de son accompagnement.Enfin, un grand merci aux techniciens de GINGER, et en particulier à Grégory Marie, pour leur présence attentive et leur contribution essentielle.

Je remercie sincèrement les membres de mon comité de pilotage (Véronique Cerezo, Éric Berger, Simon Pouget, Benoît Perzo, Xavier Carbonneau et Romain Lafon) pour le temps qu'ils m'ont consacré, la richesse de leurs expertises et la pertinence de leurs conseils. Leurs remarques, leurs questionnements et leurs éclairages ont largement nourri ma réflexion et m'ont permis de prendre du recul tout au long de ce travail. Grâce à eux, j'ai pu faire grandir mes recherches, affiner mes analyses et donner davantage de profondeur à ce manuscrit.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude aux membres de mon jury de thèse : Cyrille Chazallon, Honoré Yin, Véronique Cerezo, Erwan Le Bris, Simon Pouget et Anne Dony. Je vous remercie d'avoir accepté de lire et d'évaluer ce manuscrit, ainsi que pour le temps, l'attention et l'exigence que vous lui avez consacrés. Vos expertises complémentaires, le recul que vous avez apporté sur ces travaux, ainsi que la richesse de vos réflexions et de nos échanges ont constitué un apport précieux. Vos remarques et vos analyses ont nourri ma réflexion, contribué à enrichir ce travail et participé, par leur exigence et leur profondeur, aux avancées qu'il porte.

J'adresse un remerciement particulier à Marie Charbonnel et Céleste Jonquière, jeunes chercheuses en PIRD à l'INSA, pour leur implication, la qualité de leur travail et l'expérience précieuse d'encadrement qu'elles m'ont permis de vivre à leurs côtés. Je souhaite également remercier Alexandre Beaufrère, qui a initié cette thèse avant moi. Merci pour la transmission de ton travail et pour les bases solides que tu as posées, sur lesquelles j'ai pu m'appuyer pour poursuivre ce projet. Enfin, je n'oublie pas les autres étudiants (Robin Vaillot, Florian Girerd, Mélanie Delenne) qui, à travers leurs stages et leurs contributions, ont participé de près ou de loin à ce sujet et enrichi la réflexion menée dans ce manuscrit.

J'adresse une pensée toute particulière à Jérôme Dherbecourt, Jean-Luc Dabert et Julien Waligora, qui, dès mes premières expériences, m'ont transmis leur passion de la route et de la recherche. Leur enthousiasme et leur engagement ont éveillé en moi l'envie de poursuivre dans cette voie et ont largement contribué à façonner mon parcours.

Enfin, au-delà du cadre professionnel, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à mes proches. Leur présence, leur patience et leur confiance m'ont portée et ont donné la force nécessaire pour mener à bien ces trois années exigeantes. J'espère n'oublier personne dans ces lignes, mais sachez que vous êtes toutes et tous dans mon cœur.

À mes parents, pour votre amour, votre force et votre soutien inconditionnel. Merci d'avoir toujours cru en moi et d'avoir fait de moi l'adulte que je suis aujourd'hui. Merci pour tous ces moments, petits et grands, qui m'ont construite. Je sais que j'ai une chance immense d'avoir des parents comme vous. J'espère de tout cœur vous rendre fiers et je veux que vous sachiez à quel point je vous aime.

À mes frères, mes compagnons de vie, toujours présents à mes côtés. Merci pour tout : vos encouragements, vos attentions et cette complicité unique qui m'accompagne et me fait avancer avec le sourire. Vous êtes mon plus grand soutien et je vous aime profondément.

À mes grands-parents, à Céline, ma belle-sœur, et à mes nièces Olympe et Sibylle, ainsi qu'à toute ma famille, pour votre affection et vos encouragements constants. Je vous porte tous très fort dans mon cœur et j'espère faire honneur à mes aînés par ce travail. Mes nièces, avec leur joie et leur douceur, ainsi que ma belle-sœur, ont été parmi mes soutiens les plus tendres. Et bien sûr, je n'oublie pas le reste de ma famille (auvergnate ou lorraine) dont la présence bienveillante m'a tant apporté et m'a fait du bien tout au long de cette aventure.

À mes ami(e)s d'enfance, de Dijon et d'ailleurs, qu'ils m'accompagnent depuis toujours ou seulement depuis quelques années, vous comptez tous énormément pour moi. Merci pour votre fidélité, pour les moments de joie et de bonheur partagés, et pour la force que vous m'apportez au quotidien. Votre amitié indéfectible est l'un de mes plus beaux soutiens.

«Les étoiles brillent pour que chacun puisse un jour reconnaître la sienne.» Pour moi, cette étoile, c'est toi, Guillaume. Ma plus belle rencontre au fil de ces années n'est pas seulement scientifique, mais profondément personnelle. Cette thèse m'a offert la chance de croiser ton chemin. Merci d'être là, chaque jour, pour ton soutien, ta force et ton amour. Même si les mots me manquent parfois, sache que ta présence illumine ma vie et lui donne tout son sens. Je t'aime de tout mon cœur, aujourd'hui et pour toutes les années à venir.

Table des matières

Préambule **2**

Liste des communications **3**

Résumé **4**

Abstract **5**

Remerciements **6**

Nomenclature **29**

Introduction **34**

1 État de l'art **39**

1.1 Les chaussées routières 39

1.1.1 Définition et couche de roulement 39

1.1.2 L'enrobé bitumineux et ses constituants 40

1.2 L'adhérence 43

1.2.1 L'adhérence transversale 44

1.2.2 L'adhérence longitudinale 44

1.2.3 L'adhérence en conduite 46

1.3 Les mécanismes à l'origine de l'adhérence 46

1.3.1 Les mécanismes à l'origine de l'adhérence sur sol sec 46

1.3.2 Les mécanismes à l'origine de l'adhérence sur sol mouillé 48

1.4 Mesure de l'adhérence 49

1.4.1 Pendule de frottement SRT 49

1.4.2 GripTester 50

1.4.3 SCRIM 51

1.4.4 Machine Wehner et Schulze 52

1.5 Les facteurs influençant l'adhérence 53

1.5.1 Le pneumatique et la conduite 53

1.5.2 L'état du contact - Interface 54

1.5.3 La chaussée 55

1.5.4 Les facteurs environnementaux 56

1.6 La texture 60
1.6.1 La macrotexture 61
1.6.2 La microtexture 62
1.7 Mesure de la texture 63
1.7.1 Essais à la tâche - Méthode volumétrique 63
1.7.2 TM2 64
1.7.3 Scanner laser 9400 HD 65
1.8 L'évolution de l'adhérence des revêtements routiers 66
1.9 Lois d'évolutions de l'adhérence 68
1.10 Contact pneumatique-chaussée 70
1.10.1 Modèle mécanique du contact pneumatique-chaussée 70
1.10.2 Mesure du contact pneumatique-chaussée 76

2 Campagne en laboratoire – Évolution de l'adhérence en fonction de facteurs environnementaux 78
2.1 Méthodologie de la campagne en laboratoire 79
2.1.1 Protocole expérimental 79
2.1.2 Stratégie d'application des sollicitations 80
2.1.3 Détermination des indicateurs de surfaces pertinents 81
2.2 Objets d'étude de la campagne en laboratoire 82
2.2.1 Formulation, format et identification des éprouvettes 82
2.2.2 Préparation des éprouvettes - Décapage 83
2.3 Plan d'expériences 85
2.4 Protocoles des sollicitations 87
2.4.1 Saumure – Immersion bain de saumure S 87
2.4.2 Cycles climatiques – Climat hivernal H et estival E 88
2.4.3 Trafic – Cycles de polissage T 90
2.5 Protocoles de caractérisations 90
2.5.1 Microscope confocal - HIROX KH-7700 91
2.5.2 Scanner laser 9400 HD - AMES Engineering 92
2.5.3 Machine Wehner et Schulze 94
2.5.4 Banc LUG 95
2.6 Résultats et analyses – Campagne en laboratoire 97
2.6.1 Caractérisation - Microscope confocal 97
2.6.2 Caractérisation - Scanner laser 103
2.6.3 Caractérisation - Machine Wehner et Schulze 109
2.6.4 Caractérisation - Banc LUG 112

2.7 Conclusions et perspectives – Évolution de l'adhérence en fonction de facteurs environnementaux 133

3 Campagne terrain – Impact des opérations de déneigement sur l'adhérence de revêtements routiers 134

3.1 Méthodologie de la campagne terrain 135
3.2 Site expérimental de la campagne terrain 137
3.2.1 Présentation du site expérimental 137
3.2.2 Caractérisations du site expérimental 138
3.3 Dispositifs expérimentaux 142
3.4 Protocoles des mesures – Étude à grande échelle 143
3.4.1 Localisation, répétition et ordre des mesures 143
3.4.2 Répétabilité des appareils 144
3.5 Traitement des données – Étude à grande échelle 145
3.5.1 Méthode de correction des données du GripTester 145
3.5.2 Conditions des mesures 146
3.5.3 Écartement de phases de mesures - TM2 147
3.6 Résultats - Campagne terrain – Étude à grande échelle 148
3.6.1 Données du TM2 148
3.6.2 Données du GripTester 155
3.7 Analyse et discussion - Campagne terrain – Étude à grande échelle 158
3.8 Campagne terrain – Étude à l'échelle locale 160
3.8.1 Éprouvettes d'essais - Étude à l'échelle locale 160
3.8.2 Dispositif de caractérisations - Étude à l'échelle locale 161
3.9 Résultats - Campagne terrain – Étude à l'échelle locale 163
3.9.1 Évolution du coefficient de frottement en fonction de l'état de dégradation des éprouvettes 163
3.9.2 Évolution de profondeur moyenne de profil en fonction de l'état de dégradation des éprouvettes 164
3.10 Analyse et discussion - Campagne terrain – Étude à l'échelle locale 165
3.11 Conclusions et perspectives – Impact des opérations de déneigement sur l'adhérence de revêtements routiers 167

4 Lois d'évolution de l'adhérence 169

4.1 Bilan des lois existantes et justification de l'approche retenue 170
4.2 Loi d'évolution de l'adhérence – Campagne en laboratoire 171
4.3 Loi d'évolution de l'adhérence – Campagne terrain 178

4.4 Loi d'évolution de l'adhérence en fonction de facteurs environnementaux 184
4.5 Conclusion – Loi d'évolution de l'adhérence en fonction de facteurs environnementaux 188

5 Modèle mécanique du contact pneumatique-chaussée 190
5.1 Code numérique – ra3d 191
5.1.1 Modèle de pneumatique 192
5.1.2 Conditions de contact 194
5.1.3 Projection dans la base des modes propres 195
5.1.4 Schéma numérique 196
5.1.5 Méthode de pénalité 199
5.1.6 Algorithmes du code ra3d 200
5.1.7 Fichiers de données 201
5.2 Application au contact pneumatique- éprouvette 203
5.2.1 Paramétrage du code ra3d 203
5.2.2 Résultats - Cartographies de pression de contact 206
5.2.3 Analyses - Cartographies de pression de contact 210
5.3 Conclusions et perspectives – Modélisation du contact pneumatique-chaussée 212

Conclusion générale et perspectives 213

Références bibliographiques 217

Annexe A – Étude météorologique 232

Annexe B – Microscope confocal 234

Annexe C – Méthodologie de traitement des surfaces par le logiciel MountainsMap® 236

Annexe D – Illustrations de l'évolution de granulats au microscope confocal 241

Annexe E – Calcul des indicateurs du banc LUG 242

Annexe F – Écarts relatifs des valeurs efficaces entre les deux états de la campagne en laboratoire 246

Annexe G – Densité spectrale de puissance **248**

Annexe H – Écarts relatifs des longueurs de corrélation entre les deux états de la campagne en laboratoire **266**

Annexe I – Position du barycentre des contacts de la campagne en laboratoire **268**

Annexe J – Étude de l'uniformité transversale - Appareil TUS **279**

Annexe K – Code ra3d - Algorithmes **280**

Annexe L – Code ra3d - Cartographies de pression **284**

Table des figures

1 Réseau ATMB [1]. 35

1.1 Coupe d'une chaussée routière. 39
1.2 Exemples de répartition de quatre fractions granulaires d'enrobés bitumineux [4]. 41
1.3 Mise en dérive d'un véhicule [19]. 44
1.4 Principe de l'adhérence longitudinale [19]. 45
1.5 Capacité d'adhérence d'un véhicule [19]. 46
1.6 Illustration des mécanismes : (a) indentation, (b) adhésion. 47
1.7 Zones de contact entre un pneumatique et une chaussée en condition mouillée. 48
1.8 Pendule SRT : (a) vue expérimentale et (b) principe de fonctionnement. 50
1.9 Appareil GripTester. 51
1.10 Appareil SCRIM [31]. 51
1.11 Vues : (a) du poste de polissage (b) de l'ensemble de la machine Wehner et Schulze (c) du poste de mesure. 52
1.12 Représentations : (a) de la tête de polissage (b) de la tête de mesure de la machine Wehner et Schulze [32]. 53
1.13 Influence de la composition granulaire d'une formule de BBTM sur le coefficient de frottement longitudinal CFT évalué à différentes vitesses [48]. 55
1.14 Deux processus d'usure : usure générale et usure différentielle. 58
1.15 Variations saisonnières du coefficient de frottement transversal CFT [79]. 59
1.16 Texture de chaussée et sa décomposition en deux échelles : la macrotexture et la microtexture. 60
1.17 Méthode de calcul de la profondeur moyenne de profil [83]. 61
1.18 Indicateurs de texture R_a, R_q, R_{sk} et R_{ku}. 63
1.19 Réalisation d'un essai à la tâche par la méthode volumétrique par billes de verre [31]. 64
1.20 Vues : (a) de l'appareil TM2 (b) et de son écran de contrôle. 65
1.21 Localisation des points mesurés par le TM2. 65

1.22 Appareil scanner laser AMES 9400 HD. 66
1.23 Évolution de l'adhérence d'une couche de roulement neuve [70]. 67
1.24 Diagramme des variables d'entrée et de sortie du modèle de Carter. 70
1.25 Définition des axes (x, y, z) dans modèle de Carter. 71
1.26 Zones de contact du modèle de Carter. 73
1.27 Évolution de la force linéique tangentielle en fonction du glissement ainsi que l'évolution de la répartition des zones d'adhérence (collée) et de la zone de glissement (glissée). 75
1.28 Rapport entre les forces longitudinales F_x et les forces normales F_z en fonction du taux de glissement lors d'essais de freinage réalisés par Michelin [97]. 75

2.1 Sollicitations non exhaustives appliquées à la surface d'une chaussée. 78
2.2 Phasage de la campagne en laboratoire. 79
2.3 Vues : (a) section de prélèvement de la campagne en laboratoire, (b) objet étudié (carotte) durant la campagne en laboratoire. 83
2.4 Logigramme décisionnel de l'étape de décapage. 84
2.5 Évolution du coefficient de frottement μ_{WS} des 16 éprouvettes en fonction du nombre de cycles de polissage durant la phase de décapage. 84
2.6 Ordre d'application des sollicitations dans le cas de la combinaison quadruple. 86
2.7 (a) Illustration du protocole d'immersion, (b) Photo du dispositif en laboratoire. 87
2.8 Enceinte climatique ARALAB FitoClima 300 utilisée durant la campagne en laboratoire. 88
2.9 (a) Zone de sélection des granulats d'étude, (b) Granulats sélectionnés pour l'étude d'une éprouvette. 91
2.10 Système de fixation des éprouvettes utilisé lors des caractérisations par le scanner laser. 92
2.11 Zones capturées à l'aide du scanner laser lors de la campagne en laboratoire. 93
2.12 Schéma de fonctionnement et vues du banc LUG. 95
2.13 Axes de mesure de l'hexapode du banc LUG. 96
2.14 Observations au microscope confocal de la surface d'un granulat de l'éprouvette 14 : (a) avant, (b) après l'application de sollicitations (H+E+T). 98

2.15 Observations au scanner laser de la surface d'un granulat de l'éprouvette 14 : (a) avant, (b) après l'application de sollicitations (H+E+T). 103
2.16 Profil complet d'une surface scannée au laser de l'éprouvette 11 (gauche) avec zone de zoom (cadre rouge) et détail agrandi de cette zone (droite, encadré en bleu). 111
2.17 Réduction de la rugosité de surface par un film de saumure. 116
2.18 Exemples de densité spectrale de puissance des forces normales et longitudinales, en N^2/Hz, pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. 120
2.19 Représentation de l'évolution de la corrélation entre les forces normales et longitudinales selon le type de contact : (a) roulement pur, (b) roulement avec glissement. 124
2.20 Zone de contact au banc LUG : (a) schéma du montage expérimental montrant le pneumatique réduit monté sur l'hexapode, (b) définition de la zone de contact entre le pneumatique et l'éprouvette, mise en évidence par un film de pression Prescale. 125
2.21 Coordonnées définies sur la zone de contact pneumatique-éprouvette. 126
2.22 Exemples des positions des barycentres des contacts pneumatique-éprouvette, en mm, pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. 127
2.23 Exemples des positions des barycentres des contacts pneumatique-éprouvette, en mm, pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG. 127
2.24 Exemples des positions des barycentres des contacts pneumatique-éprouvette, en mm, pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG. 127
2.25 Zone de contact pneumatique-chaussée définie par Carter. 129
2.26 Position des barycentres des contacts dans le cas d'un contact sans glissement sur une surface lisse (gauche) et une surface avec la présence d'aspérités (droite). 130
2.27 Évolution de la position du barycentre des contacts lors d'un cas théorique de Carter en roulement avec glissement G allant de 0 % à 100 %. 132

3.1 Réseau ATMB en période hivernale © Arnaud Lesueur. 134
3.2 Déroulement de la campagne terrain. 136
3.3 Site expérimental et de sa composition. 137

3.4 Appareil APL : (a) photographie, (b) principe de fonctionnement. 139
3.5 Traitement des données de APL avec les relevés des profils longitudinaux en bande de roulement droite (rouge) et gauche (bleu). 139
3.6 Appareil TUS [128]. 141
3.7 Valeurs de l'ornièrage caractéristique Oc, exprimées en mm, sur toute la longueur du site expérimental calculées au pas de 3 m. 141
3.8 Vues : (a) du chasse-neige utilisé durant la campagne terrain, (b) d'une lame de déneigement bi-raclage. 142
3.9 Position des mesures en axe et en bande de roulement droite du site terrain. 143
3.10 Évolution des indicateurs mesurés en position axe dans la partie nord du site expérimental : (a) PMP, (b) CFL_G. 144
3.11 Site expérimental et planches témoins. 145
3.12 Pollutions observées en surface du BBSG silico-calcaire avant les phases de mesure après 150 et 600 raclages. 148
3.13 Évolution de la profondeur moyenne de profil moyenne, en mm, des trois revêtements en fonction du nombre de raclages. 149
3.14 Valeurs de PMP, en mm, moyennées sur 1 m, en fonction de la distance sur la planche d'essai pour les trois formulations d'enrobés bitumineux. 151
3.15 Distribution des valeurs de hauteur, en mm, entre l'état initial et final de la campagne terrain pour les trois formulations d'enrobés bitumineux. 152
3.16 Texture positive et texture négative [130]. 152
3.17 Distribution des valeurs de hauteur dans la plage 1 - 3 mm, entre l'état initial et l'état final de la campagne terrain pour les trois formulations d'enrobés bitumineux. 154
3.18 Évolution des coefficients de frottement longitudinaux corrigés moyens des trois revêtements en fonction du nombre d'opérations de raclage. 156
3.19 Coefficient de frottement longitudinal corrigé des trois revêtements étudiés en fonction de la position sur le site expérimental durant les phases de mesures initiale et finale. 157
3.20 Processus de dégradation de la macrotexture sous l'effet des lames de déneigement. 158
3.21 Surface du BBM silico-calcaire présentant des stries en surface des granulats, témoignant du raclage par les lames de déneigement. 159

3.22 Localisation des éprouvettes prélevées sur le site terrain. 161
3.23 Indicateurs provenant des appareils de mesures utilisés à l'échelle locale. 161
3.24 Caractérisation de l'état de surface des éprouvettes de la campagne terrain à l'échelle locale par le TM2 en laboratoire. 162
3.25 (a) Essai au pendule SRT d'une éprouvette de la campagne terrain, (b) Représentation des 4 positions de mesure d'une éprouvette. 162
3.26 Valeurs de coefficient de frottement μ_{WS} des éprouvettes de la campagne terrain mesurées à l'aide de l'appareil Wehner et Schulze. 163
3.27 Valeurs de coefficient de frottement moyennes μ_{SRT} des éprouvettes de la campagne terrain mesurées à l'aide du pendule SRT. 164
3.28 Valeurs de profondeur moyenne de profil, en mm, des éprouvettes de la campagne terrain mesurées à l'aide du scanner laser. 164
3.29 Valeurs de profondeur moyenne de profil, en mm, des éprouvettes de la campagne terrain mesurées à l'aide du TM2. 165
3.30 Corrélations entre les indicateurs d'adhérence et de texture évalués par différents appareils à l'échelle locale de la campagne terrain. 166
3.31 Uniformité longitudinale du site expérimental et positions des zones de carottages de l'étude à l'échelle locale. 167

4.1 Principe de l'élaboration de la loi d'évolution de l'adhérence d'une chaussée. 170
4.2 Indicateurs sélectionnés pour la loi d'évolution de l'adhérence en fonction des sollicitations simulées en laboratoire. 172
4.3 Corrélation entre les valeurs $\mu_L(t)$ mesurées expérimentalement et modélisées par la loi d'évolution de la campagne en laboratoire. 177
4.4 Indicateurs sélectionnés pour la loi d'évolution de l'adhérence en fonction des opérations de raclage. 179
4.5 Corrélation entre les valeurs $\mu_T(t)$ mesurées expérimentalement et modélisées par la loi d'évolution de la campagne terrain. 182
4.6 Évolutions des $\mu_T(t)$ en fonction du nombre d'opérations de raclage appliqué aux trois revêtements routiers. 183
4.7 Combinaison des lois issues des campagnes en laboratoire et terrain pour développer la loi unique d'évolution de l'adhérence μ. 184
4.8 Corrélation entre les valeurs $\mu(t)$ mesurées expérimentalement et modélisées par la loi d'évolution de l'adhérence en fonctions de facteurs environnementaux. 187

5.1 Contact pneumatique-chaussée réalisé à l'aide du code numérique ra3d. 191
5.2 Pneumatique considéré en tant que plaque orthotrope. 193
5.3 Contact entre un pneumatique approché par un cylindre et une surface rugueuse. 194
5.4 Représentation simplifiée de la discrétisation temporelle. 197
5.5 Surface interpolée de façon linéaire. 198
5.6 Contact entre la surface esclave et la surface maîtresse. 199
5.7 Calculs du code ra3d. 200
5.8 Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de l'éprouvette 08 sollicitée par le climat estival et le trafic. 206
5.9 Évolution de la texture d'un profil de surface : cas de diminution conjointe de la pression maximale et de la pression moyenne. 208
5.10 Évolution de la texture d'un profil de surface : cas de diminution de la pression maximale et une augmentation de la pression moyenne. 208
5.11 Évolution de la texture d'un profil de surface : cas d'augmentation conjointe de la pression maximale et de la pression moyenne. 209
A.1 Localisation des 9 stations météorologique sur le réseau ATMB. 232
B.1 Fonctionnement du microscope confocal [139]. 234
B.2 Photographies du microscope confocal HIROX KH-770 utilisé durant la campagne en laboratoire (a) Dispositif complet du microscope confocal (b) Tête de mesure équipée de l'objectif MXB-5040RZ. 235
C.1 Différentes étapes de traitement d'une surface à l'aide du logiciel MountainsMap®. 236
C.2 Données brutes d'un granulat reproduit par le microscope confocal : surface en deux dimensions indexée en hauteur et sa représentation. 237
C.3 Données brutes d'une surface reproduite par le scanner laser : surface en deux dimensions indexée en hauteur et sa représentation en niveaux de gris. 237
C.4 Délimitation manuelle de la zone d'étude d'un granulat reproduit par le microscope confocal. 238
C.5 Étape de suppression de points aberrants d'une zone d'étude. 238
C.6 Étape de redressement de la surface d'une zone d'étude. 239
C.7 Étape d'ajustement des axes de la surface d'une zone d'étude. 239

D.1 Observations au microscope confocal HIROX KH-7700 au grossissement 50 de son objectif MXB-5040RZ de la surface de granulats avant (gauche) et après (droite) l'application de sollicitations. 241
G.1 Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 01 à 04 pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. (1/3) 248
G.2 Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 05 à 10 pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. (2/3) 249
G.3 Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 11 à 16 pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. (3/3) 250
G.4 Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 01 à 04 pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG. (1/3) 251
G.5 Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 05 à 10 pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG. (2/3) 252
G.6 Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 11 à 16 pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG. (3/3) 253
G.7 Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 01 à 04 pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG. (1/3) 254
G.8 Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 05 à 10 pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG. (2/3) 255
G.9 Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 11 à 16 pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG. (3/3) 256
G.10 Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 01 à 04 pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. (1/3) 257
G.11 Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 05 à 10 pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. (2/3) 258

G.12 Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 11 à 16 pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. (3/3) 259
G.13 Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 01 à 04 pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG. (1/3) 260
G.14 Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 05 à 10 pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG. (2/3) 261
G.15 Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 11 à 16 pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG. (3/3) 262
G.16 Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 01 à 04 pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG. (1/3) 263
G.17 Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 05 à 10 pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG. (2/3) 264
G.18 Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 11 à 16 pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG. (3/3) 265
I.1 Positions au cours de l'essai réalisé avec 0 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 01 à 04 de la campagne en laboratoire. (1/3) 268
I.2 Positions au cours de l'essai réalisé avec 0 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 05 à 10 de la campagne en laboratoire. (2/3) 269
I.3 Positions au cours de l'essai réalisé avec 0 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 11 à 16 de la campagne en laboratoire. (3/3) 270
I.4 Positions au cours de l'essai réalisé avec 14 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 01 à 04 de la campagne en laboratoire. (1/3) 271
I.5 Positions au cours de l'essai réalisé avec 14 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 05 à 10 de la campagne en laboratoire. (2/3) 272

I.6 Positions au cours de l'essai réalisé avec 14 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 11 à 16 de la campagne en laboratoire. (3/3) 273
I.7 Positions au cours de l'essai réalisé avec 33 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 01 à 04 de la campagne en laboratoire. (1/3) 274
I.8 Positions au cours de l'essai réalisé avec 33 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 05 à 10 de la campagne en laboratoire. (2/3) 275
I.9 Positions au cours de l'essai réalisé avec 33 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 11 à 16 de la campagne en laboratoire. (3/3) 276
I.10 Positions moyennes des barycentres de contact mesurées au banc LUG pour les trois conditions d'essai. 277
J.1 Représentations en 2D indexées des altitudes mesurées sous la règle TUS pour les 13 capteurs sur toute la longueur des trois différents revêtements. 279
L.1 Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de la campagne en laboratoire des éprouvettes 01 et 02. (1/6) 284
L.2 Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de la campagne en laboratoire des éprouvettes 03 à 05. (2/6) 285
L.3 Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de la campagne en laboratoire des éprouvettes 06 à 08. (3/6) 286
L.4 Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de la campagne en laboratoire des éprouvettes 09 à 11. (4/6) 287
L.5 Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de la campagne en laboratoire des éprouvettes 12 à 14. (5/6) 288
L.6 Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de la campagne en laboratoire des éprouvettes 15 à 16. (6/6) 289

Liste des tableaux

1.1 Caractéristiques de différents types d'enrobé bitumineux. 40
1.2 Résumé de trois essais de caractérisation des granulats. 42
1.3 Effets des éléments de conception des pneumatiques sur différents paramètres [21]. 54
1.4 Cadre d'utilisation des lames de déneigement en fonction du type de neige et des caractéristiques routières [68]. 57
1.5 Lois d'évolution de l'adhérence, les variables qui y sont associées ainsi que leurs auteurs. 68

2.1 Valeurs des indicateurs S_a, S_q, S_{sk} et S_{ku} de l'éprouvette constituée de granulats soumise à différents cycles de polissage réalisés avec la machine Wehner et Schulze. 82
2.2 Combinaisons de sollicitations appliquées aux éprouvettes de la campagne en laboratoire. 85
2.3 Séquences d'un cycle de gel-dégel : température, humidité relative et durée. 89
2.4 Séquences d'un cycle de hautes températures : température, humidité relative et durée. 89
2.5 Paramètres des zones de caractérisations du scanner laser AMES Engineering 9400 HD de la campagne en laboratoire. 93
2.6 Exemple de fichier généré par le banc LUG lors d'un essai réalisé pour la campagne en laboratoire. 96
2.7 Caractéristiques des conditions des essais du banc LUG. 96
2.8 Valeurs moyennes de S_a, en μm , mesurées à l'aide du microscope confocal des éprouvettes aux deux états : initial et final. 98
2.9 Valeurs moyennes de S_q, en μm, mesurées à l'aide du microscope confocal des éprouvettes aux deux états : initial et final. 99
2.10 Valeurs moyennes de S_{sk}, sans unité, mesurées à l'aide du microscope confocal des éprouvettes aux deux états : initial et final. 100
2.11 Valeurs moyennes de S_{ku}, sans unité, mesurées à l'aide du microscope confocal des éprouvettes aux deux états : initial et final. 100

2.12 Écarts relatifs moyens, en %, de S_a, S_q, S_{sk} et S_{ku}, mesurées à l'aide du microscope confocal pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final. 101
2.13 Valeurs moyennes de PMP, en mm, mesurées à l'aide du scanner laser des éprouvettes aux deux états : initial et final. 104
2.14 Valeurs moyennes de S_a, en mm, mesurées à l'aide du scanner laser des éprouvettes aux deux états : initial et final. 105
2.15 Valeurs moyennes de S_q, en mm, mesurées à l'aide du scanner laser des éprouvettes aux deux états : initial et final. 106
2.16 Valeurs moyennes de S_{sk}, sans unité, mesurées à l'aide du scanner laser des éprouvettes aux deux états : initial et final. 106
2.17 Valeurs moyennes de S_{ku}, sans unité, mesurées à l'aide du scanner laser des éprouvettes aux deux états : initial et final. 107
2.18 Écarts relatifs moyens, en %, de PMP, S_a, S_q, S_{sk} et S_{ku}, mesurées à l'aide du scanner laser pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final. 108
2.19 Valeurs de coefficients de frottement μ_{WS} des éprouvettes mesurées par la machine Wehner et Schulze aux deux états : initial et final. 110
2.20 Écarts relatifs moyens, en %, de μ_{WS}, mesurées à l'aide de la machine Wehner et Schulze pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final. 111
2.21 Valeurs de coefficients de frottement μ_{LUG}, sans unité, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 0 % de glissement aux deux états : initial et final. 113
2.22 Valeurs de coefficients de frottement μ_{LUG}, sans unité, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 14 % de glissement aux deux états : initial et final. 113
2.23 Valeurs de coefficients de frottement μ_{LUG}, sans unité, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 33 % de glissement aux deux états : initial et final. 114
2.24 Écarts relatifs moyens, en %, de μ_{LUG}, mesurés à l'aide du banc LUG pour les trois essais et pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final. 115
2.25 Valeurs efficaces, en N, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 0 % de glissement aux deux états : initial et final. 117

2.26 Valeurs efficaces, en N, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 14 % de glissement aux deux états : initial et final. 117
2.27 Valeurs efficaces, en N, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 33 % de glissement aux deux états : initial et final. 118
2.28 Longueurs d'autocorrélation des forces normales et longitudinales, en mm, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 0 % de glissement aux deux états : initial et final. 121
2.29 Longueurs d'autocorrélation des forces normales et longitudinales, en mm, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 14 % de glissement aux deux états : initial et final. 122
2.30 Longueurs d'autocorrélation des forces normales et longitudinales, en mm, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 33 % de glissement aux deux états : initial et final. 123
2.31 Écarts relatifs moyens, en %, des positions des barycentres des contacts pneumatique-éprouvette mesurées à l'aide du banc LUG pour les trois essais et pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final. 128

3.1 Caractéristiques intrinsèques des granulats de composition des enrobés bitumineux du site expérimental. 138
3.2 Définition des bandes de longueurs d'ondes. 140
3.3 Coefficients de correction $\beta(t)$ relatifs à chaque phase de mesure et chaque revêtement étudié. 146
3.4 Récapitulatif des conditions expérimentales des différentes phases de mesures de la campagne terrain. 147
3.5 Valeurs moyennes et différence de valeurs de PMP, en mm, des trois revêtements étudiés pour chaque phase de mesures et pour les deux positions de mesure. 149
3.6 Plage de hauteurs, en mm, où se concentrent 50 %, 70 % et 90% des valeurs de hauteur des trois revêtements étudiés dans la campagne terrain lors de l'état initial. 153
3.7 Plage de hauteurs, en mm, où se concentrent 50 %, 70 % et 90% des valeurs de hauteur des trois revêtements étudiés dans la campagne terrain lors de l'état final. 153
3.8 Pourcentage des valeurs de hauteur supérieures à la valeur de PMP initiale, des trois revêtements étudiés de la campagne terrain. 154

3.9 Valeurs moyennes corrigées de coefficient de frottement longitudinal CFL_G des trois revêtements étudiés pour chaque session de mesures et pour les deux positions de mesures. 155
3.10 Évolutions relatives, en %, des paramètres décrivant la macrotexture et la microtexture des revêtements. 160

4.1 Analyse ANOVA des sollicitations ayant un impact sur les indicateurs déterminés par le scanner laser et la machine Wehner et Schulze. 173

5.1 Exemple d'un fichier profilométrique utilisé dans le code ra3d. 201
5.2 Propriétés du pneumatique dans le code ra3d. 205
5.3 Propriétés de la texture de chaussée dans le code ra3d. 206
5.4 Valeurs des pressions maximales et moyennes, en MPa, des éprouvettes aux deux états : initial et final. 207
5.5 Écarts relatifs moyens, en %, des pressions maximales et moyennes pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final. 209
A.1 Relevés climatologiques du réseau ATMB sur la période 2013-2017 entre le 01 novembre et le 28 février. 233
A.2 Relevés climatologiques du réseau ATMB sur la période 2013-2017 entre le 01 juin et le 31 août. 233
B.1 Caractéristiques du microscope confocal Digital Microscope KH-7700 Hirox. 235
E.1 Code MATLAB utilisé pour calculer les valeurs efficaces des forces, ici dans le cas de la force normale F_z. 242
E.2 Code MATLAB utilisé pour calculer et afficher les densités spectrales de puissance ici dans le cas de la force normale F_z. 243
E.3 Code MATLAB utilisé pour calculer les longueurs d'autocorrélation ici dans le cas de la force normale F_z. 244
F.1 Écarts relatifs moyens, en %, des valeurs efficaces des forces, mesurées à l'aide du banc LUG à 0 % de glissement pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final. 246
F.2 Écarts relatifs moyens, en %, des valeurs efficaces des forces, mesurées à l'aide du banc LUG à 14 % de glissement pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final. 247

F.3 Écarts relatifs moyens, en %, des valeurs efficaces des forces, mesurées à l'aide du banc LUG à 33 % de glissement pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final. 247
H.1 Écarts relatifs moyens, en %, des longueurs d'autocorrélation des forces normales F_z et longitudinales F_z des éprouvettes, mesurés par le banc LUG pour l'essai avec 0 % de glissement aux deux états : initial et final. 266
H.2 Écarts relatifs moyens, en %, des longueurs d'autocorrélation des forces normales F_z et longitudinales F_z des éprouvettes, mesurés par le banc LUG pour l'essai avec 14 % de glissement aux deux états : initial et final. 267
H.3 Écarts relatifs moyens, en %, des longueurs d'autocorrélation des forces normales F_z et longitudinales F_z des éprouvettes, mesurés par le banc LUG pour l'essai avec 33 % de glissement aux deux états : initial et final. 267
I.1 Écarts relatifs, en %, des positions des coordonnées des barycentres des contacts pneumatiques/éprouvettes mesurées à l'aide du banc LUG pour les trois essais entre les deux états : initial et final. 278
K.1 Récapitulatif des notations utilisées dans les algorithmes du code ra3d. 280

Nomenclature

Organismes

AFNOR	Association Française de Normalisation
ANRT	Association Nationale de la Recherche et de la Technologie
ATMB	Autoroutes et Tunnel du Mont Blanc
BLPC	Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CFTR	Comité Français pour les Techniques Routières
CIFRE	Convention industrielle de formation par la recherche
ECL	École Centrale Lyon
GEOMAS	Laboratoire de Géomécanique, Matériaux, Structures
IDRRIM	Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité
INSA	Institut National des Sciences Appliquées
ISO	International Standardization Organization
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LTDS	Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes
O.C.D.E	Organisation de coopération et de développement économiques
SETRA	Service d'études techniques des routes et autoroutes

Abréviations

ANOVA	Analysis of variance
BBM	Béton Bitumineux Mince
BBME	Béton Bitumineux à Module Élevé
BBSG	Béton Bitumineux Semi Grenu
BBTM	Béton Bitumineux Très Mince
BDRD	Bande de roulement droite

BDRG	Bande de roulement gauche
CFL	Coefficient de frottement longitudinal
CFL_G	Coefficient de frottement longitudinal mesuré par l'appareil GripTester
CFT	Coefficient de frottement transversal
CPA	Coefficient de polissage accéléré
DSP	Densité spectrale de puissance
E	Climat estival
ETD	Profondeur de profil estimée
GPO	Note aux grandes ondes
H	Climat hivernal
LA	Los Angeles
MDE	Micro-Deval
MPO	Note aux moyennes ondes
NPO	Note aux petites ondes
PIRD	Projet d'Initiation à la Recherche et au Développement
PL	Poids lourds
PMP	Profondeur moyenne de profil
PMT	Profondeur moyenne de texture
PSV	Polished Stone Value
R	Raclage
RMS	Valeur efficace - Moyenne quadratique
S	Épandage de saumure
T	Trafic
VEP	Valeur au pendule SRT
WS	Wehner et Schulze

Notations et symboles

A	Adhérence
a	Demi-largeur du contact ou longueur de la plaque orthotrope
B	Facteur catégoriel représentant le type de chaussée
b	Largeur de la plaque orthotrope
B_x	Rigidité en flexion dans la direction longitudinale
B_y	Rigidité en flexion dans la direction latérale
$2c$	Taille de la zone collée
c	Coefficient d'amortissement visqueux/modal

d	Centre de la zone collée
D	Diamètre moyen de la tâche mesurée
D	Diamètre maximal d'un grain
δ	Dérive (angle)
ϵ	Déformation
ϵ_c	Déformation dans la zone collée
ϵ_g	Déformation dans la zone glissée
E	Module de Young
E^*	Module réduit
$f(x, y, t)$	Champ de forces de contact compressives
$\vec{F}$	Force ponctuelle
$F_k(t)$	Force modale
F_n	Force linéique normale
F_t	Force linéique tangentielle
F_x	Force longitudinale
F_y	Force transversale
F_z	Force normale
g	Gap ou pénétration
G	Taux de glissement
$h(x, y)$	Altitude au point (x, y)
h_0	Altitude du cylindre non déformé
h_1	Altitude du profil de la texture de chaussée
$\mathcal{K}$	Opérateur associé à la raideur d'une plaque orthotrope précontrainte reposant sur une fondation élastique
M_1	Hauteur maximale sur la première moitié du profil élémentaire
M_2	Hauteur maximale sur la seconde moitié du profil élémentaire
M_x	Moment autour de l'axe longitudinal
M_y	Moment autour de l'axe transversal
M_z	Moment autour de l'axe normal
m	Masse par unité de surface
m_1	Masse sèche initiale de l'éprouvette
m_2	Masse sèche retenue au tamis de 1,6 mm après essai
$p(x)$	Pression de contact
$p(0)$	Pression normale
$p(x, y, t)$	Champ de forces de pression externe
p-value	Probabilité associée au F de Fischer
P_{max}	Pression maximale

P_{moy}	Pression moyenne
P_k	Pression modale extérieure
PMP(0)	Profondeur moyenne de profil initiale après décapage
R	Rayon du pneumatique
R^2	Coefficient de corrélation
R_a	Écart moyen arithmétique du profil évalué
R_c	Hauteur moyenne des éléments du profil évalué
R_q	Écart moyen quadratique du profil évalué
R_{ku}	Facteur d'aplatissement du profil évalué
R_{sk}	Facteur d'asymétrie du profil évalué
S	Raideur par unité de surface
S_a	Écart moyen arithmétique de la surface évaluée
S_q	Écart moyen quadratique de la surface évaluée
S_{ku}	Facteur d'aplatissement de la surface évaluée
S_{sk}	Facteur d'asymétrie de la surface évaluée
T_1	Constante
T_2	Constante
T_x	Tension de précontrainte dans la direction longitudinale
T_y	Tension de précontrainte dans la direction latérale
τ	Contrainte ou pas de temps
τ_c	Contrainte dans la zone collée
τ_g	Contrainte dans la zone glissée
$u(x, y, t)$	Déplacement
u_c	Champ de déplacement dans la zone collée
U_k	Déformée modale
V	Vitesse linéaire du véhicule ou volume de billes de verre
$V_k(t)$	Vitesse modale
$\dot{V}_k(t)$	Accélération modale
$\mathrm{VEP_G}$	Valeur moyenne au pendule SRT de 4 éprouvettes d'un même lot
$\mathrm{VEP_R}$	Valeur moyenne au pendule SRT de 4 éprouvettes d'un lot de référence
X	Force de frottement
Y	Force transversale centripète
Z	Force normale (charge du véhicule) ou écart vertical entre deux lignes moyennes
$Z(x)$	Déviation de la hauteur z en un point x par rapport au plan moyen
Zt_i	Hauteur de l'élément i du profil
$\overline{Z}$	Plan moyen de hauteur ou valeur moyenne des altitudes sur l'ensemble d'un profil (selon le contexte)

α_n	Coefficients d'ajustement
$\beta(t)$	Coefficient de correction relatif à une phase de mesure/raclage t
γ	Coefficient de pénalité
μ	Coefficient de frottement longitudinal
μ_L	Coefficient de frottement évalué en fonction des données de la campagne en laboratoire
μ_T	Coefficient de frottement évalué en fonction des données de la campagne terrain
μ_{LUG}	Coefficient de frottement mesuré au banc LUG
μ_{SRT}	Coefficient de frottement mesuré au pendule SRT
μ_{WS}	Coefficient de frottement mesuré à la machine Wehner et Schulze
$\mu_{\mathrm{WS}}(0)$	Coefficient de frottement mesuré après décapage à la machine Wehner et Schulze
ν	Coefficient de Poisson
ω	Vitesse angulaire
ω_{ij}	Pulsation propre
ψ_k	Mode propre k
$\overline{\mathrm{CFL_G}(0)}$	CFL moyen de la planche témoin à l'état initial
$\overline{\mathrm{CFL_G}(t)}$	CFL moyen de la planche témoin à l'état étudié
$\mathrm{CFL_G}(x,t)$	Coefficient de frottement longitudinal corrigé localement
$\mathrm{CFL_G^b}(x,t)$	Coefficient de frottement longitudinal brut local de la planche raclée étudiée

Introduction

L'adhérence des chaussées constitue un élément fondamental de la sécurité routière et de la durabilité des infrastructures. Ce paramètre a une importance primordiale notamment dans la prévention des accidents et dans la gestion des réseaux routiers. Son évolution dans le temps, influencée par un ensemble de facteurs, représente un sujet d'étude pour les ingénieurs, les chercheurs et les gestionnaires d'infrastructures. Historiquement, les préoccupations liées à l'adhérence remontent à l'essor de la mobilité moderne au début du XXe siècle. À cette époque, l'apparition des premières routes asphaltées a soulevé des questions quant à leur comportement sous différentes conditions climatiques. Par exemple, l'inauguration en 1913 de la Lincoln Highway, considérée comme l'une des premières routes transcontinentales aux États-Unis, a mis en lumière les défis posés par les variations climatiques extrêmes, de la neige aux vagues de chaleur. Les ingénieurs se sont rapidement aperçus que l'adhérence dépendait non seulement des matériaux utilisés, mais aussi de leur interaction avec l'environnement, comme l'humidité, la température ou encore la présence de contaminants tels que l'eau ou les résidus organiques. Aujourd'hui, les études sur l'adhérence prennent une ampleur encore plus significative dans un contexte marqué par le changement climatique. Les variations de température et l'intensité accrue des épisodes pluvieux ou secs modifient profondément la dynamique des matériaux des revêtements et leur performance à long terme. Par ailleurs, la fréquence accrue d'épisodes météorologiques extrêmes, incluant les épisodes neigeux, entraîne une intensification des opérations de viabilité hivernale (épandage de saumure, déneigement) qui accentuent elles aussi les phénomènes de dégradation des surfaces. Ainsi, il devient impératif de comprendre comment ces facteurs affectent l'évolution des propriétés d'adhérence afin d'adapter les choix de conception et d'entretien des couches de roulement.

Contexte industriel de la thèse

La société Autoroutes et Tunnel du Mont Blanc (ATMB) procède régulièrement à des auscultations rigoureuses de son patrimoine routier afin de garantir la sécurité de ses usagers sur l'ensemble de son réseau. Cela entraîne un renouvellement périodique de leurs chaussées, ayant une durée de service comprise entre 12 et 15 ans. Malgré cette attention portée au suivi de son patrimoine, ATMB a constaté une augmentation du nombre d'accidents sur des couches de roulement à un jeune âge, moins de 3 ans après leur renouvellement. Une représentation du réseau ATMB est donnée dans la figure 1.

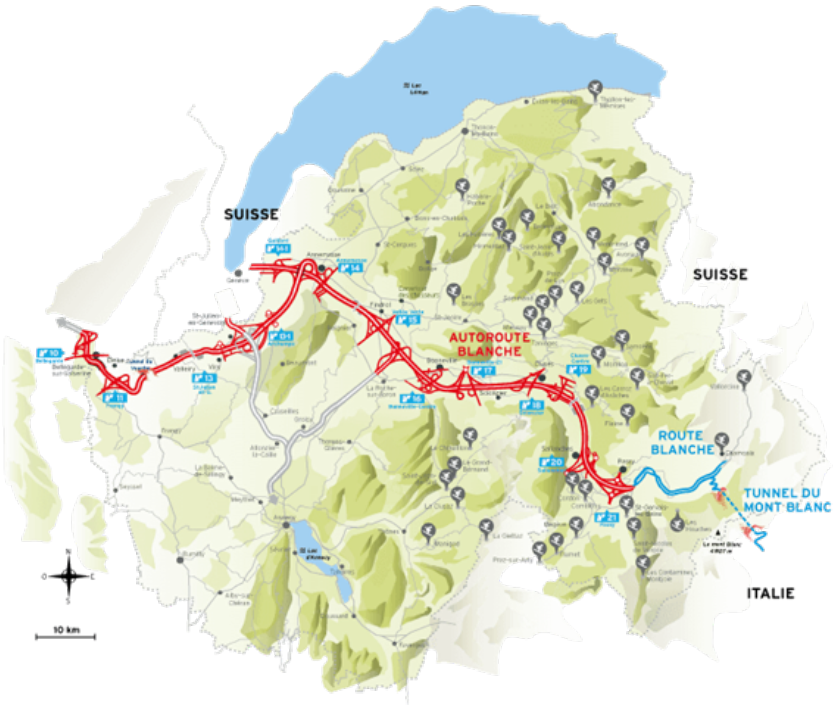


FIGURE 1 – Réseau ATMB [1].

Différentes études ont discriminé les aspects de l'infrastructure dans les causes d'accidents. Elles ont prouvé que ces zones d'accumulations d'accidents étaient corrélées à des baisses brutales et significatives du niveau d'adhérence des revêtements routiers en place sur ces sections. Dans le but d'assurer la sécurité de ses usagers, en toutes circonstances de conduite et sur la totalité de son réseau, l'entreprise ATMB a décidé d'engager une étude, qui prend la forme d'une thèse CIFRE.

Verrous scientifiques et technologiques de la thèse

Ce travail de recherche vise à comprendre les mécanismes et les facteurs environnementaux pouvant engendrer des chutes brutales d'adhérence sur des revêtements au jeune âge, mais également à étudier l'évolution de l'adhérence du couple pneumatique-chaussée au cours du temps, en lien avec les phénomènes d'usure. L'objectif de cette thèse est d'améliorer la compréhension des mécanismes d'usure des couches de roulement, en particulier à l'échelle des granulats, afin d'identifier les leviers d'action permettant de maîtriser ou de limiter ces pertes d'adhérence.

Remarque 1 : Dans la suite de ce rapport, l'expression « facteurs environnementaux » est utilisée pour désigner l'ensemble des sollicitations qui s'exercent sur la surface d'une chaussée lors de sa mise en circulation.

Cette thèse s'articule autour de quatre axes de recherche principaux.

1. **L'identification des facteurs environnementaux**
   Quels sont les facteurs environnementaux qui s'appliquent sur une chaussée durant sa mise en circulation et quels sont ceux qui conduisent à des chutes brutales de son adhérence ?
2. **La quantification de l'impact des facteurs environnementaux**
   Comment ces facteurs environnementaux affectent-ils l'adhérence d'une chaussée ? Sur quelles échelles de texture agissent-ils et avec quelles intensités ? Quelle est la combinaison de sollicitations qui mène à une plus forte chute de l'adhérence ?
3. **Le développement d'une loi de prédiction de l'évolution de l'adhérence**
   Est-il possible de développer une loi de prédiction de l'évolution de l'adhérence de revêtements routiers en fonction de ces facteurs environnementaux ?
4. **L'analyse des mécanismes d'usures et/ou de dégradations**
   Quels sont les mécanismes responsables des pertes d'adhérence dans le contact pneumatique-chaussée ? Comment ces derniers peuvent-ils être explicités ?

Remarque 2 : Ce travail de recherche se concentre exclusivement sur l'usure des granulats au sein des enrobés bitumineux et ne traite pas des phénomènes de dégradation du liant.

Pour répondre à ces axes de recherche, différents types de sollicitations sont étudiés, classés en trois grandes catégories : mécaniques, climatiques et chimiques. **Cinq facteurs environnementaux sont sélectionnés, considérés en première approximation comme les plus agressifs pour l'état de surface d'une chaussée :**

- **le raclage par le passage de lames de déneigement en acier ;**
- **le trafic ;**
- **les variations de température et d'humidité liées au climat hivernal ;**
- **les variations de température et d'humidité liées au climat estival ;**
- **les opérations d'épandage de saumure effectuées lors des opérations de viabilité hivernale.**

Deux campagnes expérimentales sont conduites pour évaluer l'impact de ces facteurs sur l'adhérence. Une campagne en laboratoire, à l'échelle d'éprouvettes, permettant de combiner et d'isoler différents facteurs environnementaux (trafic, cycles climatiques, exposition à la saumure) et une campagne terrain, à l'échelle de planches d'enrobés bitumineux, permettant d'évaluer spécifiquement l'influence du raclage par des lames de déneigement en acier. Ce travail s'inscrit ainsi dans une approche à la fois multi-échelle et multifactorielle, visant à établir des liens entre l'évolution des caractéristiques des granulats en surface et la performance d'adhérence des revêtements bitumineux dans des conditions de circulation réelles.

Organisation du rapport de thèse

Ce rapport de thèse s'articule autour de cinq chapitres.

- **Chapitre 1 – État de l'art**
  Ce chapitre présente les connaissances actuelles sur les chaussées, les enrobés bitumineux et l'adhérence, en insistant sur la texture, ses méthodes de mesure et son évolution, ainsi que sur les lois d'évolution et les approches de modélisation du contact pneumatique-chaussée.
- **Chapitre 2 – Campagne en laboratoire – Évolution de l'adhérence en fonction de facteurs environnementaux**
  Ce chapitre présente la campagne en laboratoire, en décrivant les essais réalisés, la méthodologie et les dispositifs employés, puis en exposant et discutant les résultats obtenus sur l'évolution de la texture et de l'adhérence.

— **Chapitre 3 – Campagne terrain - Impact des opérations de déneigement sur l'adhérence de revêtements routiers**
Ce chapitre présente la campagne terrain, en décrivant également les essais réalisés à deux échelles, la méthodologie et les dispositifs employés, puis en exposant et discutant les résultats obtenus sur l'évolution de la texture et de l'adhérence.

— **Chapitre 4 – Loi générale d'évolution de l'adhérence en fonction des facteurs environnementaux**
Ce chapitre présente les lois d'évolution issues des deux campagnes expérimentales (laboratoire et terrain) et montre comment elles sont combinées pour proposer une loi générale intégrant les principaux facteurs environnementaux. La validité, les limites et les perspectives d'amélioration de cette loi sont discutées.

— **Chapitre 5 – Modèle mécanique du contact pneumatique-chaussée**
Ce chapitre décrit le modèle mécanique ra3d et son application à la simulation du contact pneumatique-chaussée, afin d'analyser les modifications de la distribution des pressions de contact de surface après l'application de facteurs environnementaux.

Le mémoire se clôt par une conclusion générale qui répond à la problématique posée, en synthétisant les principaux apports scientifiques et les verrous levés par ce travail et en proposant des orientations pour des recherches ultérieures.

Chapitre 1

État de l'art

1.1 Les chaussées routières

1.1.1 Définition et couche de roulement

Une chaussée est un assemblage de différentes couches superposées les unes sur les autres et dont les épaisseurs et les matériaux de conception varient, comme schématisées dans la figure 1.1. Les différents constituants de ces couches sont adaptés de manière à créer une structure capable de supporter de nombreuses contraintes, comme celles issues du passage de véhicules, des intempéries ou même de l'évolution du terrain [2].

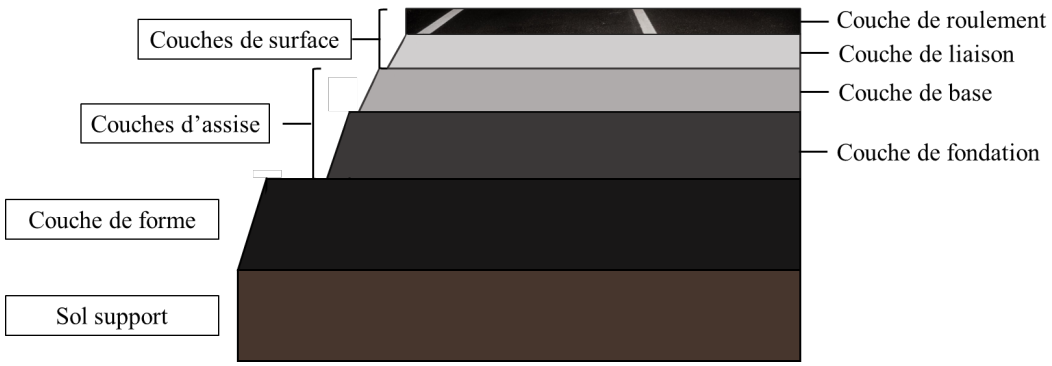


FIGURE 1.1 – Coupe d'une chaussée routière.

La couche supérieure d'une chaussée est constituée d'une couche de liaison et d'une couche de surface. C'est cette dernière que les usagers de la route observent, mais c'est aussi l'unique support de contact avec les pneumatiques. Elle assure de nombreuses fonctions comme la protection des couches inférieures, la résistance à l'environnement ainsi que la sécurité et le confort des usagers.

La couche de roulement doit donc posséder de nombreuses propriétés mécaniques, physiques, acoustiques et hydriques afin de répondre à ces besoins. En France, la majorité des chaussées sont réalisées en enrobés bitumineux, un mélange de granulats et de liant hydrocarboné conçu pour répondre aux exigences actuelles des infrastructures routières [3].

1.1.2 L'enrobé bitumineux et ses constituants

Un enrobé bitumineux [1] est un mélange composé d'un squelette granulaire ainsi que d'une matrice composée d'un liant hydrocarboné étant la plupart du temps du bitume (modifié ou non par des polymères, avec ou sans additifs). La diversité de formulation d'un enrobé bitumineux permet de recouvrir une grande gamme de matériaux permettant de s'adapter aux différentes contraintes d'exploitation d'une chaussée [4].

Classification des enrobés bitumineux

Le choix de l'enrobé bitumineux pour les chaussées neuves est dicté en France par la norme NF P 98-086 [5]. La formulation doit répondre aux exigences concernant la texture, les caractéristiques mécaniques, hydriques et de résistance à l'environnement. Un compromis doit être établi dans la composition d'un enrobé bitumineux avant sa mise en œuvre [3, 6]. Il existe différents types d'enrobés bitumineux, comme ceux qui sont répertoriés dans le tableau 1.1 non exhaustif.

Tableau 1.1 – Caractéristiques de différents types d'enrobé bitumineux.

Acronyme et nom complet	**Classe de trafic**	**Épaisseur**	**Granulométrie**	**Grade du liant**	**Durée de vie**
BBSG Béton Bitumineux Semi-Grenu	Tout trafic	5 à 9 cm	0/10 ou 0/14 continue	35/50 et 50/70	10 à 20 ans
BBM Béton Bitumineux Mince	Jusqu'à 2000 PL/jour	3 à 5 cm	0/10 ou 0/14 discontinue ou continue	20/30 et 35/50	8 à 15 ans
BBTM Béton Bitumineux Très Mince	Tout trafic	2 à 3 cm	0/6 et 0/10 généralement discontinue	35/50 et 50/70	8 à 12 ans
BBME Béton Bitumineux à Module Élevé	Tout trafic	5 à 9 cm	0/10 ou 0/14 continue	20/30 et 35/50	10 à 15 ans

1. Autrement appelé enrobé hydrocarboné, asphalte ou béton bitumineux.

Dans ce tableau, la granularité des formules d'enrobé bitumineux est indiquée par des plages de dimensions des granulats utilisés dans le mélange. Ainsi, la notation 0/10 correspond à un mélange granulaire composé de grains de la taille minimale de 0 mm (poussière ou filler) à la taille maximale de 10 mm (granulats). Dans le cas d'une distribution continue, toutes les fractions granulaires sont présentes dans le mélange. Les bitumes sont également notifiés d'un code, représentatif de leur pénétrabilité, soit une mesure de leur consistance à température ambiante. Le grade 35/50 signifie que la pénétrabilité du bitume est comprise entre 35 et 50 dixièmes de millimètre à la température de mesure de 25°C, sous une charge standard (100 g) pendant 5 secondes, avec une aiguille normalisée. Plus le grade est élevé, plus le bitume est mou à température ambiante.

Les constituants d'un enrobé bitumineux

➢ Les granulats

Les granulats sont les matériaux principaux d'un enrobé bitumineux en composant en moyenne 95 % de la masse de ce dernier. Le squelette granulaire d'un enrobé bitumineux est composé de granulats de classes différentes dans des proportions fixes (cf. figure 1.2). La distribution en taille des grains est dictée par le paramètre D, qui exprime le diamètre maximum des granulats (en mm). Comme mentionné dans le tableau 1.1, la courbe granulométrique d'un enrobé bitumineux peut être continue ou discontinue selon le type de formulation souhaité [4, 7].

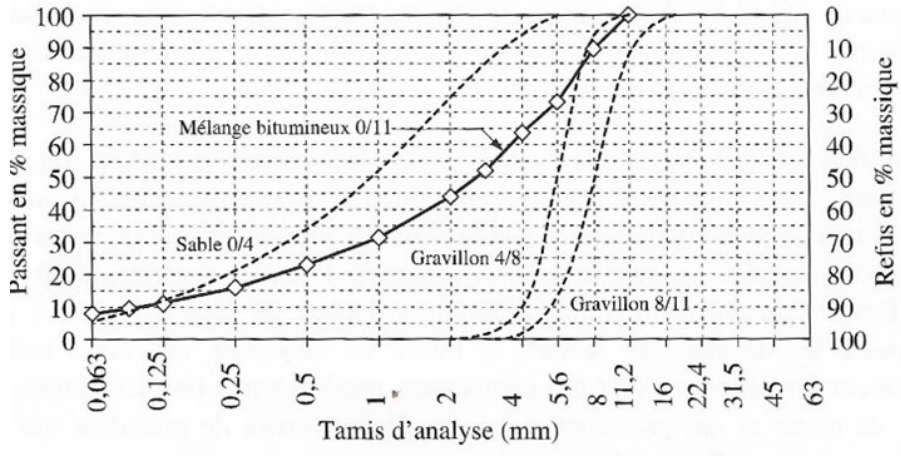


FIGURE 1.2 – Exemples de répartition de quatre fractions granulaires d'enrobés bitumineux [4].

Les caractéristiques des granulats dépendent de deux facteurs : la nature de la roche de constitution et les conditions d'exploitation de cette dernière.

La nature des granulats est à l'origine des propriétés de résistance aux chocs et à l'usure ainsi qu'aux caractéristiques physico-chimiques du squelette d'un enrobé bitumineux. Aussi, l'élaboration des granulats en carrière est responsable de la géométrie de ces derniers (angularité, dimension) mais également de leur qualité (propreté) [8]. Il existe de nombreux essais permettant de caractériser les granulats, comme indiqué dans la norme NF EN 13242+A1 [9]. Ces derniers peuvent être classés de façon non exhaustive selon les catégories suivantes : caractérisations géométriques, caractérisations physiques, caractérisations chimiques et caractérisation de durabilité. Dans le tableau 1.2, trois essais mécaniques permettant de spécifier l'usage de granulats dans des formulations de couches de roulement sont détaillés.

Tableau 1.2 – Résumé de trois essais de caractérisation des granulats.

Essai et norme	**Principe**	**Formule**
Micro-Deval (MDE) NF EN 1097-1 [10]	Résistance à l'usure par abrasion. Granulats en contact avec des billes d'acier et mis en rotation en présence d'eau dans un tambour.	$\mathrm{MDE} = 100 \times [(m_1 - m_2)/m_1]$ m_1 : masse sèche initiale de l'éprouvette (en g). m_2 : masse sèche retenue au tamis de 1,6 mm après essai (en g).
Los Angeles (LA) NF EN 1097-2 [11]	Résistance à l'usure par fragmentation. Granulats en contact avec des boulets d'acier et mis en rotation dans un tambour.	$\mathrm{LA} = 100 \times [(m_1 - m_2)/m_1]$ m_1 : masse sèche initiale de l'éprouvette (en g). m_2 : masse sèche retenue au tamis de 1,6 mm après essai (en g).
Polissage accéléré (PSV) NF EN 1097-8 [12]	Résistance au polissage. Granulats polis par des cycles accélérés simulant le trafic, puis mesuré à l'aide d'un pendule SRT.	$\mathrm{PSV} = \mathrm{VEP_G} + 56 - \mathrm{VEP_R}$ $\mathrm{VEP_G}$: valeur pendule SRT de 4 éprouvettes étudiées (même lot). $\mathrm{VEP_R}$: valeur pendule SRT de 4 éprouvettes de référence.

➢ Le liant

La majorité des liants constituants les enrobés bitumineux sont composés de bitume. Le bitume est un liant hydrocarboné (composé majoritairement de carbone et d'hydrogène) existant à l'état naturel qui est actuellement obtenu par la coupe la plus lourde de certains pétroles bruts. Le bitume dans les enrobés bitumineux ne représente qu'en moyenne 5 % de la composition finale de ces derniers [13, 14]. Le bitume est un matériau avec un haut pouvoir adhésif chimique et mécanique, mais également avec une ductilité et une ténacité élevée. Cela contribue à la cohésion, à la durabilité et au comportement visco-élastique de l'enrobé bitumineux. Modifié ou non par l'ajout de polymères ou d'additifs, le liant bitumineux permet aux couches de surfaces de s'adapter mécaniquement aux phénomènes extérieurs. Il existe divers essais permettant de caractériser les nombreuses propriétés de ce matériau, comme :

— l'essai de pénétrabilité à l'aiguille qui permet de déterminer la consistance d'un bitume [15] ;

— l'essai de point de ramollissement bille anneau qui qualifie la température à laquelle un bitume atteint un certain degré de ramollissement [16] ;

— l'essai du point de fragilité FRAASS qui donne une indication sur les propriétés à froid d'un bitume [5].

➢ **Liaison granulat/bitume**

La pérennité d'un enrobé bitumineux dépend de ses composants, mais également de la solidité de leur liaison [4]. L'adhésion entre ces composants peut être limitée par des pollutions, comme de la poussière résiduelle sur les granulats, mais aussi par un troisième corps ayant une grande affinité avec l'un ou l'autre des constituants. La présence d'eau dans la formule peut mener à la diminution de l'affinité entre les granulats et le liant bitumineux. Il est donc nécessaire d'être attentif lors de la mise en œuvre d'une couche de roulement, à la propreté des constituants, ainsi qu'à leur bon séchage.

1.2 L'adhérence

L'adhérence d'un revêtement routier correspond à sa capacité à mobiliser des forces de frottement entre le pneumatique et la chaussée sous l'effet des sollicitations engendrées par la conduite (accélérations, freinages, virages...) [17]. C'est ce paramètre qui permet la conservation d'une trajectoire par un conducteur, la réduction des distances de freinage et d'arrêt d'urgence ainsi que la facilitation des manœuvres d'évitement ou de récupération de trajectoire. Dans le Guide l'adhérence des chaussées rédigé par le Cerema [18], il est mis en avant que l'adhérence des chaussées est un facteur important du niveau de service des axes routiers. Elle contribue à la sécurité des usagers notamment en présence d'un troisième élément entre la chaussée et le pneumatique (eau, sable, pollutions). Pour obtenir un bon niveau d'adhérence, il est donc essentiel d'assurer un contact entre les pneumatiques et la chaussée de la plus grande dimension possible dans toutes les conditions de circulation.

L'adhérence peut être caractérisée par deux composantes en fonction des sollicitations de conduite exercées. Il s'agit de l'adhérence transversale qui est évaluée à l'aide d'un coefficient de frottement transversal (CFT) noté τ ainsi que l'adhérence longitudinale qui est mesurée par un coefficient de frottement longitudinal (CFL), noté μ.

1.2.1 L'adhérence transversale

L'adhérence transversale entre un pneumatique et une chaussée intervient durant les phases de changements de directions. Lorsqu'un conducteur négocie un virage, le véhicule est soumis à une force centrifuge qui tend à le chasser vers l'extérieur. Afin de maintenir la trajectoire du véhicule, il est nécessaire de fournir une force centripète égale à la valeur de la force centrifuge. Aussi, lors de la conduite en virage, le conducteur impose un angle de braquage aux roues avant du véhicule. Cet angle de conduite est à l'origine d'un décalage entre le plan de rotation des roues et la trajectoire du centre de la roue, comme illustré dans la figure 1.3.

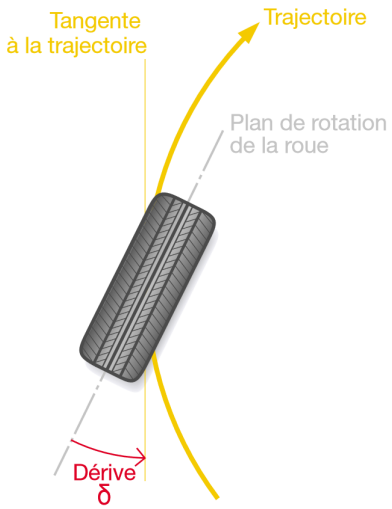


FIGURE 1.3 – Mise en dérive d'un véhicule [19].

Ce décalage, nommé dérive δ, est à l'origine du frottement entre les pneumatiques et la surface de la chaussée générant une force transversale centripète Y. La force centripète Y qui découle de ce phénomène est directement liée à la charge du véhicule Z (force verticale), à l'état du contact pneumatique-chaussée ainsi que des caractéristiques de la chaussée et de pneumatique de manière indépendante [19]. Le coefficient d'adhérence transversale τ peut dont être calculé à l'aide de la formule,

$$\tau = \frac{Y}{Z}. \tag{1.1}$$

1.2.2 L'adhérence longitudinale

L'adhérence longitudinale entre un pneumatique et une chaussée intervient durant les phases d'accélération et de freinage en ligne droite. Lors de ces phases

de conduite, la vitesse linéaire du véhicule est différente de la vitesse des pneumatiques. Cette différence induit un taux de glissement G qui est défini selon l'équation,

$$G = \frac{\omega R - V}{V} \tag{1.2}$$

où ω est la vitesse angulaire de la roue, R est le rayon de la roue et V est la vitesse linéaire du véhicule. Cette équation permet de différencier différents cas de conduite tels que :

— $G < 0$: le freinage du véhicule ;

— $G > 0$: l'accélération du véhicule ;

— $G = 0$: la roue libre ;

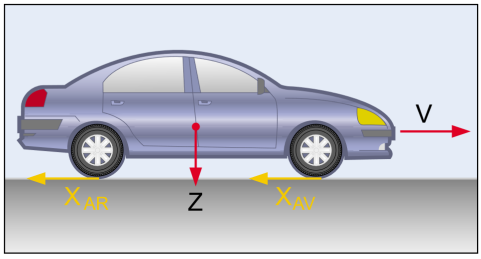
— $G = +\infty$: le patinage ;

— $G = -1$: la roue bloquée.

Le contact entre les pneumatiques et la route, par différents mécanismes induit une force de frottement X qui tend à s'opposer au glissement (cf. figure 1.4a). Cette force dépend également de la charge du véhicule Z. Le coefficient de frottement longitudinal, noté μ, est défini par l'équation,

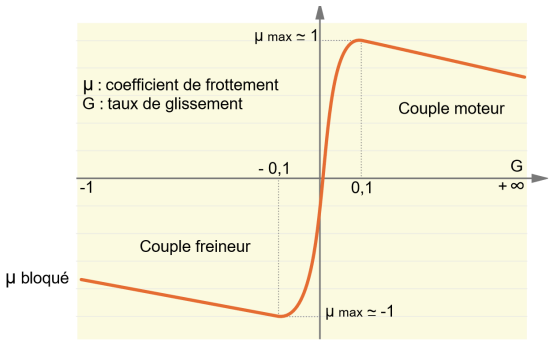
$$\mu = \frac{X}{Z}. \tag{1.3}$$

Ce coefficient de frottement dépend fortement du taux de glissement G, engendré par les sollicitations de la conduite (cf. figure 1.4b).



V : vitesse du véhicule
X = X_{AR} + X_{AV} : force de frottement globale sol / véhicule (résultant du frottement des quatre pneus)
Z : charge appliquée par le véhicule sur le sol.

(a) Forces induites lors de la conduite en ligne droite.



(b) Évolution du coefficient de frottement μ en fonction du glissement G.

FIGURE 1.4 – Principe de l'adhérence longitudinale [19].

1.2.3 L'adhérence en conduite

Lors de la conduite d'un véhicule, l'adhérence est le résultat de la combinaison de l'adhérence transversale et de l'adhérence longitudinale. Les deux types d'adhérence se partagent le potentiel d'adhérence offert par le contact entre les pneumatiques et la chaussée. Ce potentiel d'adhérence A est défini par,

$$A = \sqrt{\tau^2 + \mu^2}. \tag{1.4}$$

La limite de capacité d'adhérence d'un véhicule est donc délimitée par un quart de cercle (cf. figure 1.5).

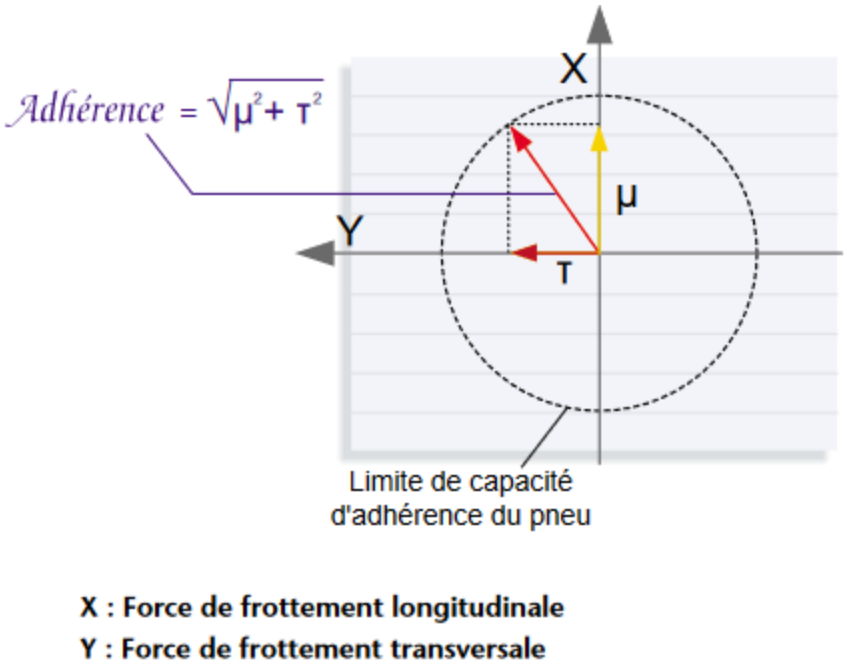


FIGURE 1.5 – Capacité d'adhérence d'un véhicule [19].

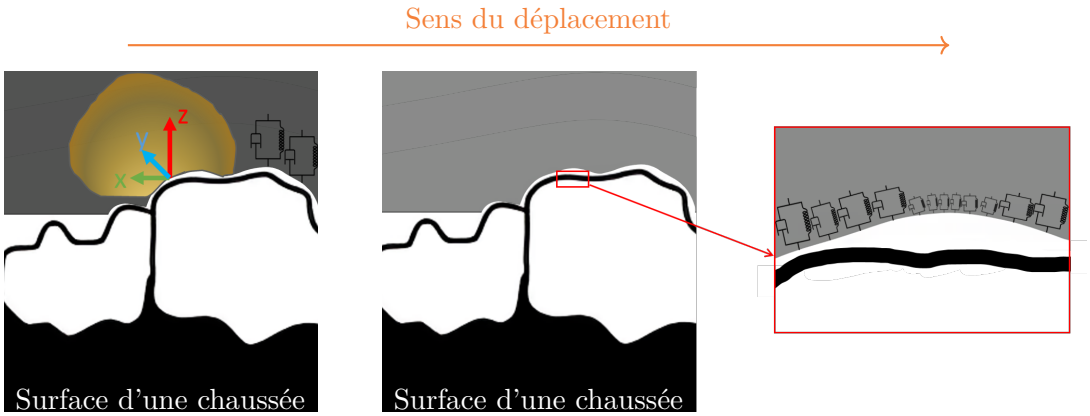
1.3 Les mécanismes à l'origine de l'adhérence

1.3.1 Les mécanismes à l'origine de l'adhérence sur sol sec

L'adhérence est un phénomène régi par deux mécanismes nommés indentation ou hystérésis et adhésion. Ces mécanismes interviennent entre un pneumatique et la surface de la chaussée et dépendent de nombreux paramètres tels que le pneumatique, l'état du sol, l'état du contact pneumatique-chaussée, etc. [18, 20-22].

Le mécanisme d'indentation provient du phénomène d'excitation fréquentielle du matériau de composition du pneumatique. En effet, le pneumatique est composé de caoutchouc qui est un matériau visco-élastique. Il a donc la capacité de se déformer sur les aspérités de la couche de roulement sous l'action de la conduite [13]. Lorsque le pneumatique glisse sur le sol, il se déforme : il se produit un phénomène d'écoulement. Ensuite, le caractère élastique de la gomme permet à la gomme de reprendre sa forme initiale, mais pas de manière immédiate : un effet d'hystérèse apparaît. Cette dissymétrie génère des forces de réaction qui s'opposent au glissement. Ce phénomène peut être modélisé à l'aide d'un système ressort-amortisseur du premier ordre, comme illustré dans la figure 1.6a.

Le mécanisme d'adhésion provient du phénomène de liaison moléculaire qui intervient entre le matériau de composition du pneumatique et la route. L'échelle de ce phénomène est de l'ordre du centième de micron. L'adhésion est expliquée par la formation puis la rupture cyclique des liaisons de Van Der Waals entre le pneumatique et la route. Ces cycles génèrent un travail visco-élastique dépendant de la vitesse de glissement, mais également de la température du contact. Ce processus peut également être modélisé par un système ressort-amortisseur du premier ordre, à une échelle plus locale comme montré dans la figure 1.6b. La chaîne moléculaire étirée résiste au glissement par la génération d'une force de frottement. Le phénomène d'adhésion dépend grandement de l'état de surface du revêtement [18, 20-22].



(a) Phénomène d'indentation (b) Phénomène d'adhésion

FIGURE 1.6 – Illustration des mécanismes : (a) indentation, (b) adhésion.

1.3.2 Les mécanismes à l'origine de l'adhérence sur sol mouillé

Lorsqu'une route est mouillée, un film d'eau est présent en sa surface. Les pneumatiques ainsi que le revêtement sont capables d'évacuer l'eau de la zone de contact dans une certaine limite. Les mécanismes évalués pour un contact pneumatique-chaussée ne sont plus valables : l'adhésion du pneumatique contre la chaussée n'est plus opérationnelle. En présence d'eau (pour des épaisseurs de film inférieures à 10 μm), la zone de contact entre un pneumatique et la chaussée lors de la conduite peut se décomposer en trois zones, illustrées dans la figure 1.7 et définies par Moore [20].

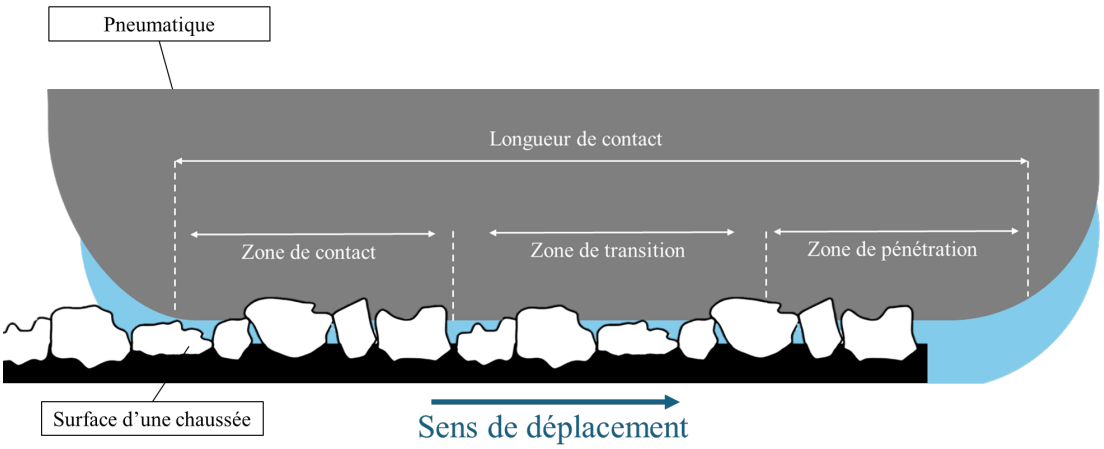


FIGURE 1.7 – Zones de contact entre un pneumatique et une chaussée en condition mouillée.

— **La zone de pénétration.**
La partie avant du pneumatique flotte sur un film d'eau dont l'épaisseur diminue à mesure que le véhicule avance. La présence d'eau dans le contact pneumatique-chaussée entraîne la roue vers le haut en raison d'une augmentation de la pression locale [2]. Le frottement est quasiment nul dans cette zone.

— **La zone de transition**.
La seconde zone est définie lorsque le pneumatique pénètre le film d'eau et le chasse par l'intermédiaire de ses sculptures lors de la conduite. Cette zone permet de réduire le film d'eau et de le rendre discontinu. Dans cette zone, le frottement entre le pneumatique et la chaussée est très faible.

2. Pression hydrodynamique.

— **La zone de contact.**
La dernière zone se situe à l'arrière du pneumatique et constitue la zone de contact réelle (zone de traction). L'ensemble des capacités de résistance au dérapage et à la traction s'établit dans cette portion. Le frottement est donc presque entièrement créé à l'arrière du pneumatique sur une zone réduite.

Cette décomposition du contact permet d'expliquer la baisse d'adhérence potentielle en condition humide ainsi que le phénomène d'*aquaplaning*[3]. La dégradation du contact en condition humide peut être réduite en utilisant des pneumatiques avec une forme et des sculptures adaptées ou bien en concevant des chaussées aptes à limiter l'épaisseur du film d'eau (pente, structure, rugosité).

1.4 Mesure de l'adhérence

L'adhérence des chaussées peut être évaluée, en laboratoire ou *in situ*, à l'aide d'appareils mesurant le frottement ou la texture [18, 23-25]. Les dispositifs présentés dans cette section ne constituent qu'un aperçu des moyens disponibles à ce jour.

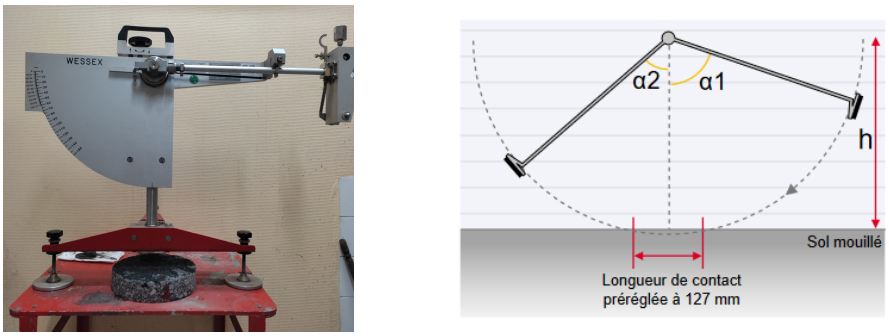
1.4.1 Pendule de frottement SRT

Le pendule SRT (cf. figure 1.8a) permet de mesurer, sur site ou en laboratoire, l'adhérence d'une surface mouillée de revêtements. Cette mesure d'adhérence est régie par la norme NF EN 13036-4 [26]. Le pendule est équipé à son extrémité d'un support élastique portant un patin en caoutchouc qui entre en contact avec une surface préalablement mouillée. La hauteur initiale du pendule est réglée de manière à garantir une course de frottement calibrée. L'énergie potentielle initiale du système est définie par l'angle de départ α_1, tandis que l'énergie résiduelle, après un contact avec le revêtement, est déduite de l'angle de remontée α_2 (cf. figure 1.8b). L'écart entre ces deux angles traduit l'énergie dissipée par le frottement, directement liée à l'adhérence entre le patin et le sol mouillé. Plus l'adhérence du revêtement est importante, plus la remontée du bras du pendule est limitée. Les résultats sont exprimés au travers de la valeur au pendule (VEP), coefficient adimensionnel compris entre 0 et 100. Une valeur de 0 correspond à une dissipation totale de l'énergie initiale (frottement maximal), tandis qu'une valeur de

3. L'aquaplanage est une perte d'adhérence due à la formation d'un film d'eau entre le pneumatique et la route.

100 traduit l'absence de frottement, c'est-à-dire aucune perte d'énergie du pendule.

Remarque 3 : Dans ce rapport, la notation μ_{SRT} est employée pour désigner la valeur de frottement mesurée au pendule SRT.



(a) Pendule SRT lors d'une utilisation en laboratoire.

(b) Principe du pendule SRT [19].

FIGURE 1.8 – Pendule SRT : (a) vue expérimentale et (b) principe de fonctionnement.

1.4.2 GripTester

Le GripTester (cf. figure 1.9) réalise une mesure en continu sur une chaussée mouillée d'un coefficient de frottement longitudinal noté CFL_G. Cet indicateur est sans dimension et compris généralement entre 0 et 1,2 (exprimé avec deux décimales). Cette mesure est régie par la norme NF P98 220-2 [27]. L'appareil se compose d'une remorque dotée de deux roues porteuses et d'une petite roue d'essai lisse freinée mécaniquement afin d'obtenir un taux de glissement de 14 %. De plus, une buse d'arrosage est montée directement devant la roue d'essai et permet de répandre une quantité contrôlée d'eau sur la chaussée (4,2 L/min). Le GripTester peut être poussé à la main ou tracté par un véhicule à des vitesses comprises entre 5 km/h et 100 km/h. La charge statique appliquée sur la roue d'essai est de 250 $\pm$ 30 N pour la version tractée ou de 260 $\pm$ 30 N pour la version poussée. Durant le passage de l'appareil, l'axe de la roue de mesure se déforme sous l'action de l'avancée horizontale et de l'effort vertical agissant sur le pneumatique d'essai. Ce dernier est équipé d'un système de jauges de contraintes permettant la mesure de la réaction du sol sur le pneumatique (ou force de frottement X) et de la force verticale Z (cf. équation 1.3). Il en résulte le calcul d'un coefficient de frottement longitudinal en continu [27, 28].



FIGURE 1.9 – Appareil GripTester.

1.4.3 SCRIM

Le SCRIM (cf. figure 1.10) réalise une mesure en continu d'un coefficient de frottement transversal noté CFT sur une chaussée mouillée. Cet indicateur est sans dimension et compris généralement entre 0 et 1,2 (exprimé avec deux décimales). La mesure est régie par la norme NF P98 220-4 [29]. Un pneumatique lisse en caoutchouc est monté au centre d'un appareil dans l'alignement de la trace de roulement la plus proche du bord de la chaussée avec un angle de 20° par rapport au sens du déplacement du véhicule. Un débit contrôlé d'eau est appliqué sur la chaussée, immédiatement en amont de la roue d'essai. La hauteur d'eau théorique à maintenir est de 0,5 mm à la vitesse d'essai. Le débit est ajusté afin de garantir cette valeur quelle que soit la vitesse. L'effort généré par la résistance au glissement du pneumatique sous l'effet de la conduite est lié à l'adhérence de la chaussée mouillée, ce qui induit la mesure en continu d'un coefficient de frottement transversal [30].



FIGURE 1.10 – Appareil SCRIM [31].

1.4.4 Machine Wehner et Schulze

La machine Wehner et Schulze (cf. figure 1.11b) est un appareil composé de deux postes :

— un poste permettant de reproduire l'usure générée par le trafic par le polissage de l'éprouvette (cf. figure 1.11a) ;

— un poste permettant de mesurer le coefficient de frottement entre un patin en élastomère et l'éprouvette (cf. figure 1.11b).



(a) (b) (c)

FIGURE 1.11 – Vues : (a) du poste de polissage (b) de l'ensemble de la machine Wehner et Schulze (c) du poste de mesure.

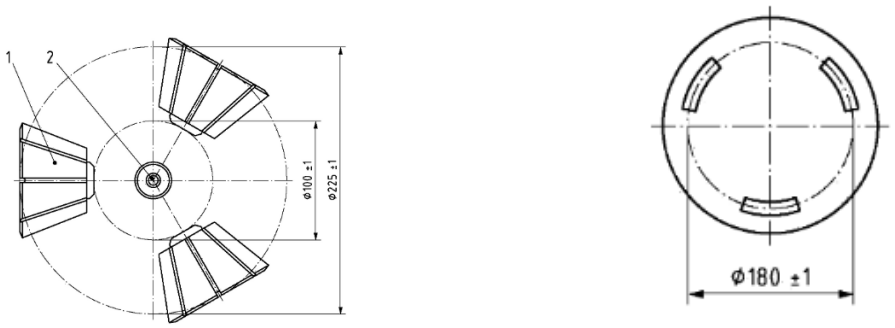
Les éprouvettes sont des disques d'enrobés bitumineux circulaires de 22,5 cm de diamètre, qui sont prélevées par carottage sur site ou par fabrication en laboratoire. Les essais sont réalisés en suivant la norme NF EN 12697-49 [32].

Le poste de polissage (cf. figure 1.12a) est constitué de trois galets coniques en caoutchouc en contact avec l'éprouvette selon une génératrice. Ces galets sont en rotation autour de leurs axes horizontaux et concourants au centre de l'éprouvette. La surface de contact sur l'éprouvette forme une couronne. La tête de polissage rotative est abaissée sur la surface de l'éprouvette à une vitesse de 500 ± 5 tr/min. Durant la rotation, un mélange d'eau et d'abrasif[4] à la concentration de 60 g/L est apportée.

La tête de mesure de frottement (figure 1.12b) est un disque en rotation autour d'un axe normal à la surface de l'éprouvette. Sur ce disque, sont disposés radialement à 120°C trois patins de gomme. La trace du contact sur l'éprouvette est

4. Farine de quartz de granulométrie 0,063 mm.

un cercle de diamètre 180 mm. Pour la mesure du frottement, la tête de mesure est lancée avec une vitesse linéaire au patin de 100 km/h. Puis elle est mise en contact, sans couple moteur, tandis qu'un débit d'eau de 20 L/min est appliqué en continu sur la surface de l'éprouvette. La vitesse de la tête de mesure décroît jusqu'à s'arrêter. La mesure du coefficient de frottement est réalisée lorsque la vitesse aux patins atteint 60 km/h par un dynamomètre pour la force normale et un couplemètre pour la force tangentielle.



(a) (b)

FIGURE 1.12 – Représentations : (a) de la tête de polissage (b) de la tête de mesure de la machine Wehner et Schulze [32].

1.5 Les facteurs influençant l'adhérence

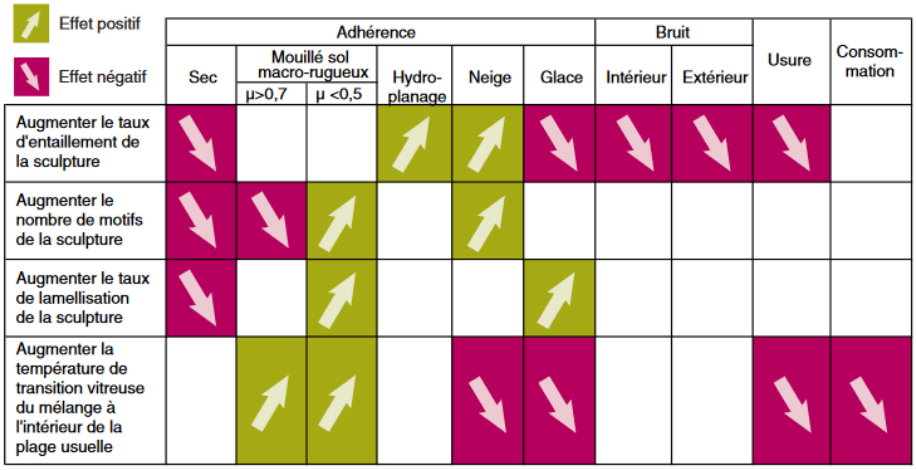
L'adhérence peut être influencée par de nombreux paramètres provenant des corps entrant en contact lors de la conduite, mais également de l'état du contact ou bien des conditions liées au véhicule, son pilotage ainsi que des facteurs environnementaux que subissent les chaussées durant leur mise en service.

1.5.1 Le pneumatique et la conduite

L'adhérence dépend des caractéristiques du pneumatique telles que ses dimensions, la profondeur de ses sculptures, l'état et la composition de sa gomme, sa pression, etc. [33, 34]. Une conception optimisée du pneumatique permet de garantir les mécanismes responsables de l'adhérence. L'équipement pneumatique doit également s'adapter au type de véhicule, à l'environnement de conduite ainsi qu'aux contraintes de sécurité. Le tableau 1.3, donné dans la référence [21], permet de schématiser l'ensemble des effets des éléments de conception des pneumatiques sur leurs propriétés d'usage. Comme évoqué précédemment, les sollicitations liées à la conduite influencent directement l'adhérence. La vitesse du véhicule, son taux de

glissement ou encore la charge appliquée figurent parmi les paramètres déterminants.

TABLEAU 1.3 – Effets des éléments de conception des pneumatiques sur différents paramètres [21].



Remarque 4 : Dans le cadre de ce travail, le choix a été fait de ne pas approfondir davantage l'influence du pneumatique sur l'adhérence. Le lecteur souhaitant approfondir ce sujet peut se reporter aux références suivantes [13, 19, 21, 33, 35-38].

1.5.2 L'état du contact - Interface

L'état de surface des revêtements est un facteur influençant l'adhérence. En effet, le contact entre un véhicule et le sol est réduit avec la présence de contaminants provenant du climat (pluie, neige ou glace) mais également par la présence de polluants tels que l'huile, des débris ou des produits chimiques [39-41]. Cette contamination des surfaces de différents types interfère dans les processus du frottement. De nombreuses études ont conduit à l'évaluation de l'adhérence de couches de roulement en présence de contaminants. Lambourn et Viner [42] ont évalué l'adhérence d'enrobés bitumineux recouverts de contaminants tels que de l'eau, de l'huile de moteur, de l'argile et du sable. Les auteurs ont constaté une chute de l'adhérence des surfaces contaminées par rapport à un état mouillé. La chute la plus importante est constatée en présence d'huile en surface. Ce constat a été validé par d'autres études expérimentales [43-45]. De plus, ces recherches ont démontré des liens entre les baisses de coefficient de frottement et l'augmentation de la concentration des contaminants en surface.

1.5.3 La chaussée

La formulation, la composition et la mise en œuvre d'un revêtement routier influencent directement son niveau d'adhérence [18, 46]. Le type de formulation conditionne la surface de contact effective entre le pneumatique et la chaussée, que ce soit en conditions sèches ou dégradées [39, 40]. Le contact entre un pneumatique et une chaussée n'est pas continu, ni homogène. En réalité, il est constitué d'une multitude de micro-contacts fragmentés, formés au sommet des aspérités de la surface. Cette fragmentation résulte à la fois de la rugosité de l'enrobé et de la déformation locale du pneumatique. Dans la référence [19], il est admis que la surface d'un sol neuf est de 7 à 15 m² et développe des pressions locales de plus de 40 bars. Le taux de portance sur un sol peu rugueux est de l'ordre de 60 % pour un pneumatique gonflé à 2 bars. Cela est dû aux propriétés élastomères des pneumatiques qui leur permettent d'épouser les irrégularités de la chaussée.
Le liant joue également un rôle déterminant dans l'adhérence. Une teneur plus élevée en liant dans un enrobé bitumineux conduit généralement à une diminution des performances [36]. La granulométrie et la pétrographie des granulats interviennent aussi de manière significative [47]. Brossaud et Le Turdu [48] montrent enfin que, quel que soit la vitesse, le coefficient de frottement longitudinal augmente lorsque le calibre de l'enrobé diminue, en raison d'un plus grand nombre de points de contact entre le pneumatique et la chaussée (cf. figure 1.13).

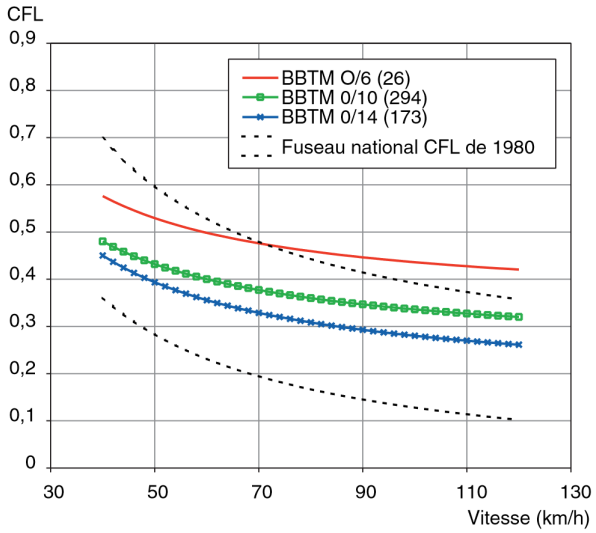


FIGURE 1.13 – Influence de la composition granulaire d'une formule de BBTM sur le coefficient de frottement longitudinal CFT évalué à différentes vitesses [48].

1.5.4 Les facteurs environnementaux

Lors de la mise en circulation d'une chaussée, cette dernière est soumise à différentes sollicitations qui peuvent avoir un impact plus ou moins important et à plus ou moins long terme sur son adhérence. Une description non exhaustive des facteurs environnementaux pouvant s'appliquer durant la mise en service d'une chaussée et exerçant une influence sur son adhérence est effectuée dans les paragraphes ci-dessous.

Viabilité hivernale

La viabilité des routes désigne l'aptitude d'une route à être utilisée dans des conditions de sécurité et de confort à tout moment. Durant la période hivernale, il peut se produire des événements météorologiques conduisant à la dégradation de la viabilité des chaussées. Ces intempéries sont responsables de difficultés de conduite (augmentation du temps de trajet, impossibilité de circuler, diminution de la sécurité, baisse du niveau d'adhérence). Des opérations de viabilité hivernale sont donc effectuées afin de réduire l'impact direct de ces intempéries. Ces opérations prennent différentes formes, de l'utilisation de fondants routiers au passage de chasse-neige [49, 50].

➢ **Les fondants routiers**

Les fondants routiers abaissent le point de congélation de l'eau et favorisent la fonte de la neige ou du verglas à des températures inférieures à 0 °C [51-53]. Disponibles sous forme solide ou liquide, ils sont appliqués purs, dissous ou mélangés, et améliorent instantanément l'adhérence. De nombreuses études ont évalué leurs effets à moyen et long terme [54]. Brand *et al.* [55], par exemple, n'ont observé aucun impact direct des fondants routiers sur les granulats, leur adhésivité avec le bitume ou les propriétés mécaniques d'enrobés, constat confirmé par d'autres travaux [54, 56, 57]. En revanche, l'usage de fondants induit plusieurs phénomènes pouvant affecter l'adhérence [58-64] :

— l'apparition d'un gradient thermique générant des contraintes internes et des fissurations de surface,

— la fonte de la neige/glace entraînant une forte saturation en eau,

— le développement de pressions osmotiques,

— la formation d'une couche d'hydrates responsable de la perte d'adhérence.

➢ Les engins de déneigement

Les engins de déneigement évacuent la neige accumulée en la rejetant sur les bords de chaussée, améliorant ainsi directement l'adhérence en supprimant la couche de neige ou de glace entre pneumatiques et la chaussée [65]. Les opérations sont exécutées à l'aide différents outils, dépendants du type de neige à tracter ainsi qu'aux caractéristiques du porteur [66]. Elles sont menées à une vitesse de l'ordre de 50 km/h et dans un cadre permettant de garantir la sécurité des usagers de la route [67]. L'usage de chasse-neiges équipés de lames est encadré par des prescriptions (cf. tableau 1.4) établies selon le type de neige et les caractéristiques de la route.

TABLEAU 1.4 – Cadre d'utilisation des lames de déneigement en fonction du type de neige et des caractéristiques routières [68].

Lame d'usure	*Type de neige*				*Caractéristique et profil de la route*	
	Sèche	Humide	Mouillée	Gelée en surface ou glacée ou tassée	Autoroute et voie rapide	Route secondaire
Acier	NON	NON	NON	OUI	OUI	OUI
Polyuréthane (avec talon)	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	NON
Caoutchouc	OUI	OUI	OUI	NON	NON	OUI
mixte	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	NON
céramique	NON	OUI	OUI	NON	OUI	OUI

Si l'agressivité des lames sur les revêtements n'est pas quantifiée, des dommages par friction et abrasion sont mentionnés [54]. Ces impacts surfaciques peuvent être affectés par les variations de profils longitudinaux et transversaux des chaussées. La qualité du raclage dépend aussi de la nature du revêtement. Plus la surface du revêtement est lisse, plus le raclage s'avère efficace [67]. Par ailleurs, Lacoffe [69] souligne que le passage répété des déneigeuses contribue à la dégradation des marquages routiers, mesurée par la baisse de durabilité et de rétro-réflexion. Ainsi, l'impact à long terme des lames de déneigement sur l'état de surface et l'adhérence est avéré, bien qu'aucune étude ne l'ait encore quantifié.

Trafic

Le trafic induit deux formes d'usure des surfaces : la fragmentation et l'arrachement de granulats, ainsi que leur polissage par frottement [46, 70-73]. La résistance d'une couche de surface à ces sollicitations dépend directement des propriétés des granulats, évaluées en laboratoire par divers essais (cf. tableau 1.2). Lédée *et al.* [46] ont montré que les enrobés formulés avec des granulats à forte résistance au polissage conservent une adhérence élevée après plusieurs années de trafic et que cette durabilité est principalement liée à la résistance au polissage de la fraction grossière. Lorsque les enrobés sont constitués de roches polyminérales, un phénomène d'usure différentielle apparaît [46, 71, 74-76]. Dupont et Tourenq [73] distinguent alors une usure générale, fonction de la dureté moyenne de la roche et une usure différentielle, liée aux contrastes de dureté et aux proportions minéralogiques. La première tend à arrondir les aspérités, tandis que la seconde accentue leur relief (figure 1.14).

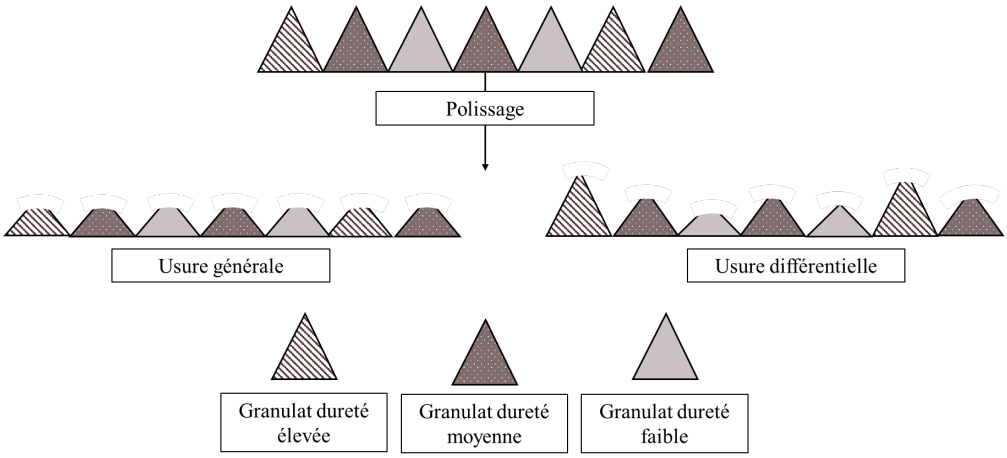


FIGURE 1.14 – Deux processus d'usure : usure générale et usure différentielle.

Le trafic est également responsable de plusieurs phases d'évolution de l'adhérence de revêtements routiers qui sont présentés dans la section 1.8.

Climat

Les sollicitations climatiques regroupent l'ensemble des phénomènes météorologiques (ensoleillement, température et ses variations, pression atmosphérique, vent, humidité relative, type, fréquence et intensité des précipitations). Elles influencent à la fois l'adhérence de manière ponctuelle et cyclique et conditionnent également la propreté des chaussées.

Les variations saisonnières modifient conjointement le comportement des pneumatiques et celui des revêtements [19, 77]. Plusieurs études soulignent en particulier l'importance de la température : une élévation de quelques degrés suffit à entraîner une baisse du coefficient de frottement [78]. Brillet et Gothié [79] ont confirmé ce constat à partir de huit années de mesures systématiques avec l'appareil SCRIM. Ils ont mis en évidence une diminution moyenne du CFT de 0,3 % par degré Celsius, mais surtout des variations saisonnières d'une ampleur bien plus large, révélant que la température ne saurait, à elle seule, expliquer l'ensemble du phénomène. Ainsi, le niveau du CFT corrigé peut fluctuer sur une plage d'environ 9 points : l'amplitude des corrections annuelles varie entre 1 et plus de 9 points. Cela est illustré dans la figure 1.15. Pour prendre en compte ces fluctuations, les auteurs proposent d'appliquer des corrections sinusoïdales : soit une correction « générale », valable pour une région donnée et basée sur plusieurs années de mesures, soit une correction « annuelle », ajustée aux particularités climatiques de chaque année. Ces approches visent à ramener les mesures vers un CFT caractéristique, représentatif de l'état le plus défavorable susceptible d'être rencontré au cours de l'année.

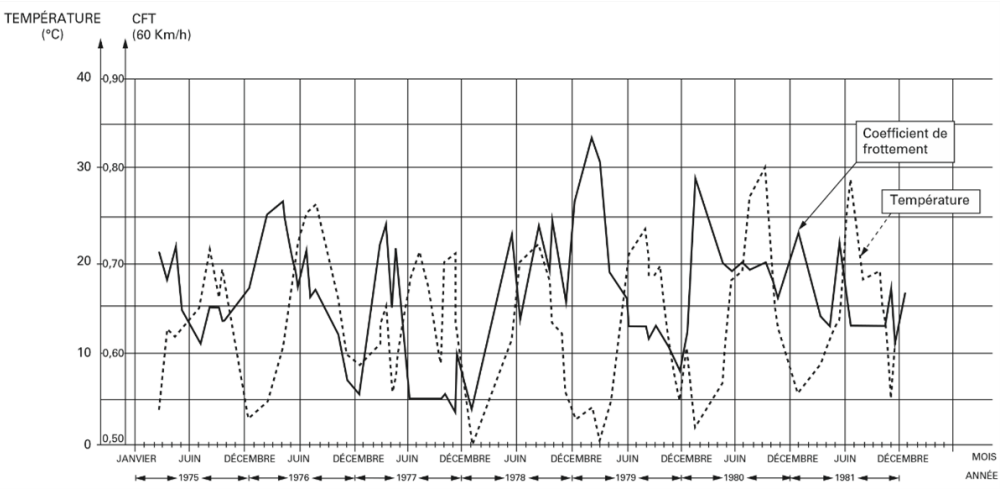


FIGURE 1.15 – Variations saisonnières du coefficient de frottement transversal CFT [79].

La propreté constitue un autre facteur déterminant dans l'adhérence routière. En été, la raréfaction des précipitations limite le lessivage et favorise l'accumulation de particules en surface, ce qui entraîne une diminution de la macrotexture (cf. section 1.6.1) et de la microtexture (cf. section 1.6.2). Hill et Henry [80] ont montré que la durée écoulée depuis la dernière pluie significative et la température du sol sont deux variables majeures des variations d'adhérence à court terme.

Cette relation se traduit, sur le plan accidentologique, par une baisse du nombre d'accidents immédiatement après un épisode pluvieux [81]. De façon générale, l'adhérence mesurée est plus élevée en hiver qu'en été.

Enfin, température et dépôts polluants agissent dans le même sens et sur des échelles de temps distinctes : la première induit des fluctuations à l'échelle mensuelle, tandis que les seconds produisent des effets à l'échelle journalière [77]. Cette combinaison explique les variations d'adhérence observées à court comme à long terme.

1.6 La texture

La surface des couches de roulement est rugueuse. Cette texture, dépendante des granulats et de la mise en œuvre des revêtements, joue un rôle primordial dans le contact entre le pneumatique et la chaussée. Le rôle de la texture est de fournir une aire de contact suffisante pour permettre les phénomènes d'indentation et d'adhésion [18, 22, 82]. Elle peut être décomposée en différentes échelles comme schématisées sur la figure 1.16.

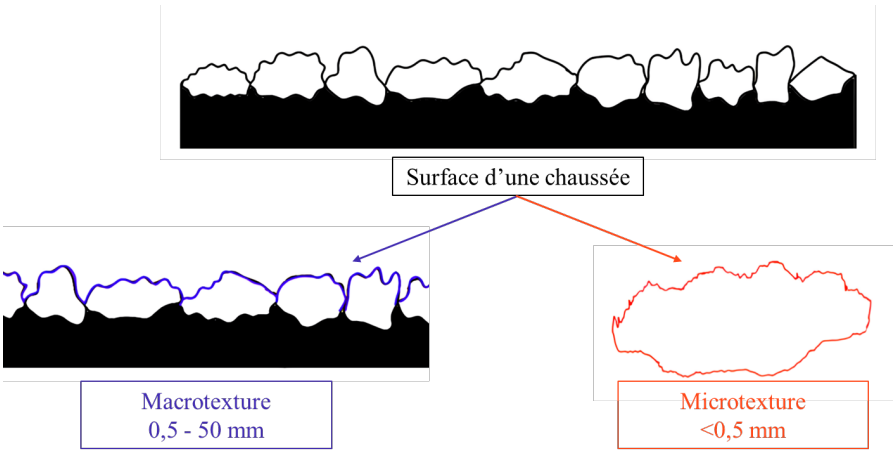


FIGURE 1.16 – Texture de chaussée et sa décomposition en deux échelles : la macrotexture et la microtexture.

Remarque 5 : Dans l'ensemble de ce mémoire, les termes de macrotexture et de microtexture font référence aux dimensions présentées dans les paragraphes suivants.

1.6.1 La macrotexture

La macrotexture correspond à des irrégularités de surface dont les dimensions sont comprises entre 0,1 mm et 20 mm verticalement et entre 0,5 mm et 50 mm horizontalement. Elle est liée à la mise en œuvre et à la composition granulométrique (notamment la dimension maximale des granulats) d'un enrobé bitumineux. Cette échelle de texture permet d'évacuer l'eau en surface de chaussées et de garantir le phénomène d'hystérésis (cf. section 1.3). La macrotexture permet donc de garantir un contact maximal entre un pneumatique et la chaussée lors de conditions de conduite humides [22, 83]. Cette échelle peut être évaluée directement par différentes méthodes et indicateurs tels que la profondeur moyenne de profil (PMP) [19, 26, 84-86]. Ces indicateurs permettent de décrire la macrotexture de chaussée à l'aide de méthodes volumétriques ou profilométriques.

La profondeur moyenne de profil, illustrée dans la figure 1.17, est un indicateur, exprimé en millimètres, et défini par la norme NF EN ISO 13473-1 [83]. Le calcul de la PMP est réalisé en divisant chaque longueur élémentaire de profil en deux segments égaux. Dans chacune des deux moitiés, la valeur maximale par rapport au niveau de référence est déterminée, puis leur moyenne est calculée. La profondeur moyenne de profil est ensuite obtenue par la différence entre cette moyenne des maxima et le niveau moyen du profil sur la longueur considérée. Cela peut être exprimé de la manière suivante :

$$\mathrm{PMP} = \frac{M_1 + M_2}{2} - \overline{Z} \tag{1.5}$$

où M_1 et M_2 représentent les hauteurs maximales relevées sur chacune des deux moitiés du profil élémentaire et $\overline{Z}$ correspond à la valeur moyenne des altitudes sur l'ensemble du profil considéré.

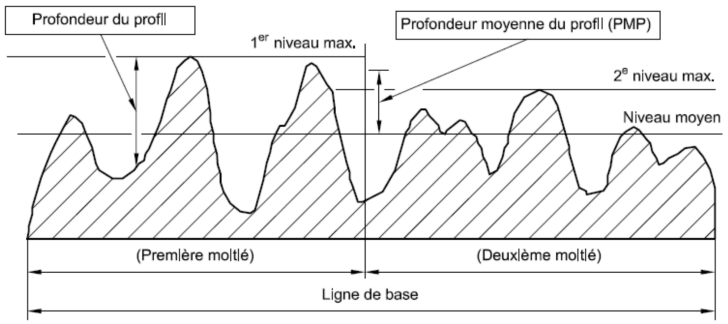


FIGURE 1.17 – Méthode de calcul de la profondeur moyenne de profil [83].

Remarque 6 : Cet indicateur est largement utilisé dans le cadre de ce travail de thèse, car il constitue une référence reconnue dans le domaine routier. Par ailleurs, il présente des similitudes méthodologiques avec le paramètre R_c de la norme ISO 4287 [85], qui est introduit ultérieurement et correspond à la hauteur moyenne d'un profil (cf. équation (1.6)).

1.6.2 La microtexture

La microtexture correspond à des irrégularités de surface dont les dimensions sont comprises entre 0,001 mm et 0,5 mm verticalement et inférieures à 0,5 mm horizontalement. Elle est liée aux aspérités à la surface des granulats et aux sables entrant dans la composition du revêtement. La microtexture d'un revêtement apparaît totalement après le décapage (cf. section 1.8) du film de liant résiduel présent en surface des enrobés bitumineux après leur mise en œuvre. Le rôle de la microtexture est de pénétrer la gomme du pneumatique en assurant le phénomène d'indentation. Le niveau d'adhérence d'un revêtement dépend de la microtexture, sauf dans des conditions de conduite à vitesse élevées et en présence d'eau où la macrotexture joue un rôle prépondérant. La microtexture d'une couche de surface peut être évaluée de façon directe ou indirecte par la mesure d'indicateurs géométriques relatifs à des profils, des reliefs ou des surfaces ou par la mesure de frottements.

La caractérisation de rugosité d'une surface de couche de roulement peut être effectuée à l'aide des indicateurs définis dans la norme ISO 4287 [85]. Parmi les indicateurs les plus courants, il existe : la hauteur moyenne du profil R_c, l'écart moyen arithmétique du profil évalué R_a, l'écart moyen quadratique du profil évalué R_q, le facteur d'asymétrie du profil évalué R_{sk}, ainsi que le facteur d'aplatissement du profil évalué R_{ku}. Les définitions de ces indicateurs sont indiquées dans les équations suivantes,

$$R_{\mathrm{c}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} Zt_i \tag{1.6}$$

$$R_{\mathrm{a}} = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)|\, dx \tag{1.7}$$

$$R_{\mathrm{q}} = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z(x)^2\, dx} \tag{1.8}$$

$$R_{\mathrm{sk}} = \frac{1}{R_{\mathrm{q}}^3} \int_0^l Z(x)^3\, dx \tag{1.9}$$

$$R_{\mathrm{ku}} = \frac{1}{R_{\mathrm{q}}^4} \int_0^l Z(x)^4\, dx \tag{1.10}$$

où m est le nombre total des éléments de profil considérés, Zt_i la hauteur de l'élément i du profil, définie comme la somme de la hauteur d'un pic et de la profondeur de la vallée adjacente, $Z(x)$ exprime la déviation de la hauteur z du profil en un point x de la longueur l, par rapport à la valeur moyenne $\overline{Z}$ définissant le plan moyen, soit $Z(x) = z(x) - \overline{Z}$ avec $\overline{Z} = \frac{1}{l}\int_0^l z(x)\,dx$.

Un représentation de ces indicateurs est donnée dans la figure 1.18.

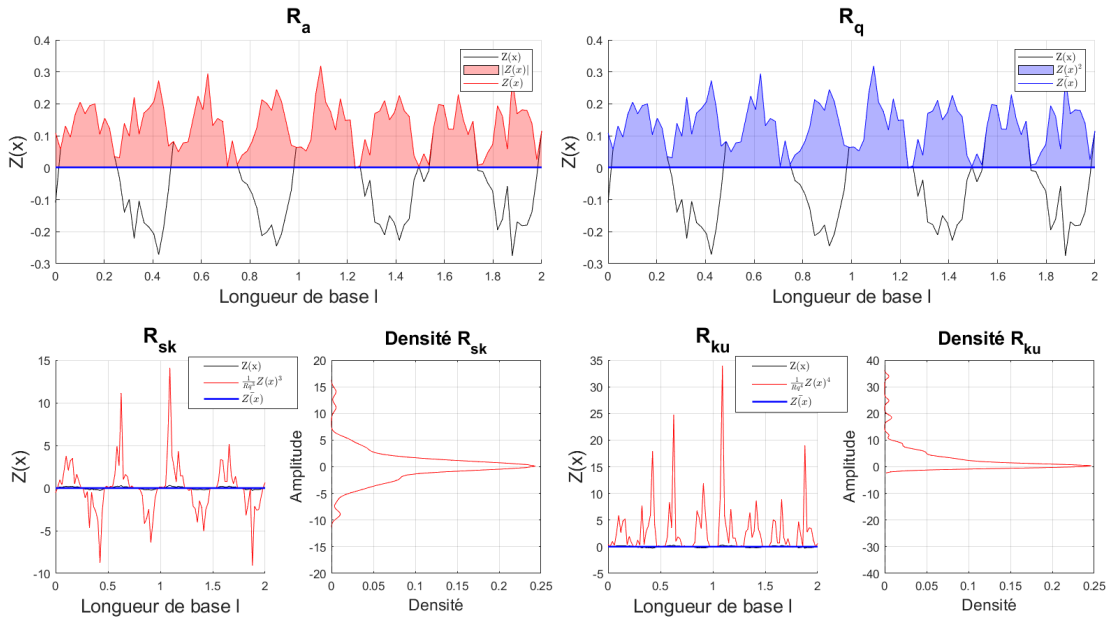


FIGURE 1.18 – Indicateurs de texture R_a, R_q, R_{sk} et R_{ku}.

Remarque 7 : Ces indicateurs, mesurés pour un profil, peuvent être étendus pour la description de surfaces. Les notations deviennent alors S_a, S_q, S_{sk}, S_{ku}.

1.7 Mesure de la texture

La texture d'une chaussée peut être appréciée à l'aide de nombreux appareils, à partir de différents indicateurs, en laboratoire ou *in situ* [18, 23-25]. Les appareils présentés ici ne constituent qu'un panel non exhaustif des moyens disponibles à ce jour.

1.7.1 Essais à la tâche - Méthode volumétrique

L'essai à la tâche est régit par la norme NF EN 13036-1 [84]. Il consiste à répandre et à araser un volume de billes de verres calibrées à la surface d'une chaussée de manière à obtenir une tache de forme approximativement circulaire.

En divisant le volume de billes par la surface couverte par ces dernières, la profondeur moyenne de texture PMT, en mm, du revêtement est calculée selon la formule,

$$\mathrm{PMT} = 4V/\pi D^2 \tag{1.11}$$

où V est le volume de billes de verre égal à 25 cm^2 et D est le diamètre moyen de la tâche mesuré, en mm. La PMT peut être exprimée en fonction de la profondeur moyenne de profil selon la relation, $\mathrm{PMT} = 1,1 \times \mathrm{PMP}$ [25]. La figure 1.19 permet de représenter les différentes étapes d'un essai à la tâche.

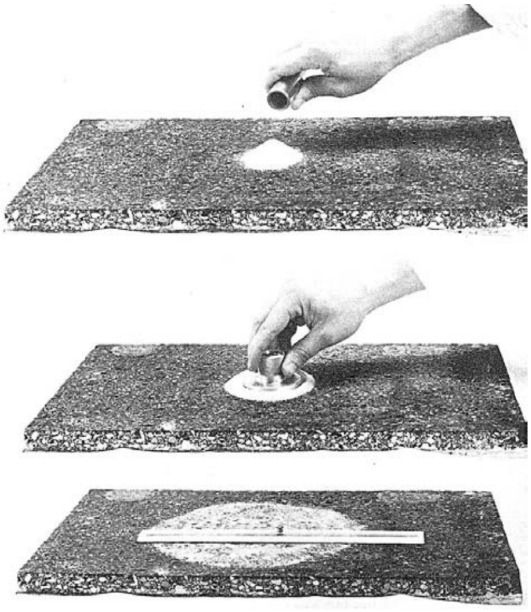


FIGURE 1.19 – Réalisation d'un essai à la tâche par la méthode volumétrique par billes de verre [31].

1.7.2 TM2

Le TM2 (figure 1.20) est un appareil de mesure profilométrique de macrotexture en continu. Il est mis en service par la société WDM et suit la norme NF EN ISO 13473-1 [83]. La mesure est effectuée via un émetteur à rayon laser et un potentiomètre optique. Le rayon émis frappe la surface du sol et se réfléchit sur le potentiomètre optique. En fonction de la position du point illuminé sur ce potentiomètre, la hauteur du point de réflexion au sol est déduite. Il est poussé par un opérateur à une vitesse maximale de 5 km/h. L'appareil renvoie des valeurs de profondeur moyenne de profil, exprimées en mm, conformément à la norme ISO 13743-1 [83].



(a) (b)

FIGURE 1.20 – Vues : (a) de l'appareil TM2 (b) et de son écran de contrôle.

L'appareil TM2 permet d'effectuer des mesures profilométrique sur une section de 100 mm de largeur et de façon continue au pas de 1 mm, comme illustré dans la figure 1.21.

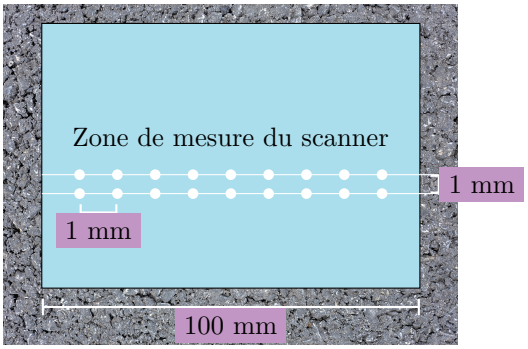


FIGURE 1.21 – Localisation des points mesurés par le TM2.

1.7.3 Scanner laser 9400 HD

Le scanner laser de texture 9400 HD (figure 1.22) est un appareil produit par la société Ames Engineering capable de mesurer la macrotexture ainsi que la microtexture d'une surface. La prise de mesure de texture s'effectue à l'aide d'un balayage du laser. La résolution verticale de l'appareil est de 5 μm et la résolution horizontale maximale est de 24,69 μm sur l'axe y et de 6,35 μm sur l'axe x.



FIGURE 1.22 – Appareil scanner laser AMES 9400 HD.

Les dimensions maximales de la zone de mesure sont définies par un rectangle de 104,0 mm de longueur et 72,01 mm de largeur. Pour un scan de résolution maximale, la durée de scan est estimée à environ 4 heures. Le fichier crée par la mesure du scanner laser contient l'ensemble des valeurs d'amplitude (hauteur Z) pour chaque couple de coordonnées dans un espace 2D. Cet appareil permet de calculer différents indicateurs tels que la profondeur moyenne de profil, la profondeur de profil estimée, la moyenne quadratique ou encore des indicateurs d'amplitude de texture (S_a, S_q, S_{sk}, S_{ku})

1.8 L'évolution de l'adhérence des revêtements routiers

L'adhérence des revêtements routiers évolue dans le temps sous l'action de facteurs ponctuels ou durables, réversibles ou non. Trois phases principales de l'évolution de l'adhérence peuvent être distinguées : une augmentation initiale liée au décapage du film de liant, une diminution progressive due aux facteurs environnementaux, puis une stabilisation autour d'une valeur d'équilibre. Ces étapes sont illustrées dans la figure 1.23. Par ailleurs, l'adhérence fluctue tout au long de la durée de service en raison des variations saisonnières (cf. section 1.5.4).

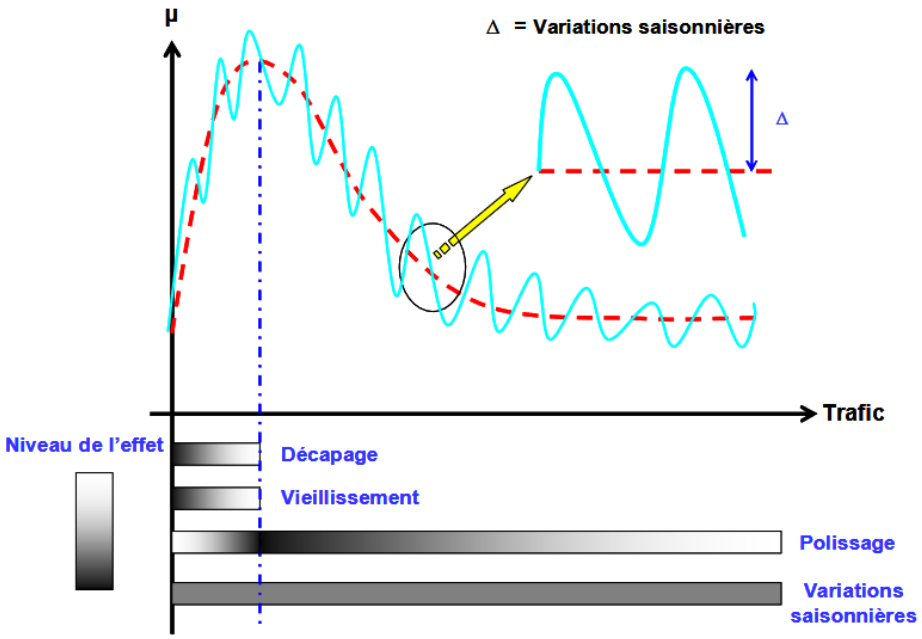


FIGURE 1.23 – Évolution de l'adhérence d'une couche de roulement neuve [70].

Au cours des premiers mois ou années de mise en circulation, l'adhérence d'une couche de roulement augmente progressivement. Lors de la mise en œuvre, l'enrobage à chaud dépose un film de liant qui recouvre les granulats, lisse leurs aspérités et supprime la microtexture, entraînant une faible adhérence initiale [48, 70]. Les premiers passages de véhicules, ainsi que les conditions climatiques usent ce film et révèlent la microtexture, jusqu'à atteindre un niveau d'adhérence maximal. La durée de retrait de ce film dépend du trafic, du climat et de la composition du revêtement. Une fois la chaussée décapée, son environnement use sa surface par le biais de différentes sollicitations présentées précédemment dans la section 1.5.4. L'adhérence est également conditionnée par le vieillissement du bitume. Celui-ci se manifeste d'abord à court terme, lors de la mise en œuvre, où le liant chauffé [5] s'oxyde rapidement [87]. À long terme, des transformations chimiques (évaporation des huiles, oxydation, rayonnement) modifient ses propriétés [70, 87, 88], entraînant fissuration, orniérage ou arrachements et donc une baisse de l'adhérence. Après cette phase de diminution, l'adhérence tend à se stabiliser autour d'une valeur d'équilibre propre à la formulation et aux conditions d'exploitation, résultant d'un équilibre entre l'usure des granulats et l'état de surface.

5. 160–170 °C pour une formulation classique à chaud.

1.9 Lois d'évolutions de l'adhérence

La littérature propose plusieurs lois décrivant l'évolution de l'adhérence des revêtements en fonction de différents facteurs. Elles sont établies à partir de bases de données issues de mesures *in situ* sur des sections routières ou d'essais expérimentaux en laboratoire, généralement fondés sur des indicateurs de frottement. Ces lois sont synthétisées dans le tableau 1.5.

TABLEAU 1.5 – Lois d'évolution de l'adhérence, les variables qui y sont associées ainsi que leurs auteurs.

Auteur(s)	**Loi d'évolution**	**Variables**
Dijinger et Barros [89]	$\mu_{\min} = C_0(1 - e^{C_1 \mathrm{PV}}) + C_2 \mathrm{PV}$	$\mu_{\min}$: valeur minimale d'adhérence (-) PV : valeur minimale de frottement pour l'essai PSV sur une durée d'au moins 10 heures (-) C_0, C_1, C_2 : coefficients d'ajustements (-)
Roe et Hartshorne [90]	$\mathrm{MSSC} = A \cdot \mathrm{PSV} - B \ln(\mathrm{CVD}) + K$	MSSC : coefficient SCRIM moyen d'été (-) PSV : Polishing Stone Value du granulat (-) CVD : trafic journalier moyen (véh/voie/jour) A, B, K : coefficients d'ajustements (-)
Pérez-Acebo *et al.* [91]	$\mathrm{MSSC} = 114,946 - 2,065 \ln(\mathrm{AADT}) + A_{\mathrm{LANES}} + B_{\mathrm{SURF}} + C_{\mathrm{LANES}} \ln(\mathrm{AADT}) + D_{\text{S-P-L}} \ln(\mathrm{AADT})$	MSSC : coefficient SCRIM moyen d'été (-) AADT : trafic journalier annuel moyen (véh/jour) A_{LANES} : coefficient lié au type de route (-) B_{SURF} : coefficient lié à la formulation de la couche de surface (-) C_{LANES} : coefficient reflétant la distribution du trafic sur la voie de droite (-) $D_{\text{S-P-L}}$: coefficient prenant en compte la formulation, le PSV et le type de chaussée (-)
Athiappan *et al.* [92]	$\mathrm{SR} = 27,0147TD + 0,0764V + 0,261TC - 5,5924 + 0,061VB + 44.993R^2$ $\mathrm{TD} = 0,077TC - 0,001AV - 0,005VB - 0,102A + 0,76R^2$	SR : skid resistance, adhérence (-) V : vitesse de circulation (km/h) VB : variation de la teneur en bitume (%) R^2 : coefficient de corrélation (-) TD : profondeur de texture (en mm) TC : condition de circulation (-) AV : valeur d'abrasion (%) A : âge de la route (année)
Tang [70]	$\mu = (1 - d)\mu_B + d\mu_G$	μ : coefficient de frottement (-) d : fonction de décapage (-) μ_B : frottement lié au vieillissement du bitume (-) μ_G : frottement lié à l'usure des granulats (-)
Zhao [40]	$\mu = (1 - D)\mu_B + D\mu_G + \Delta\mu$ $\mu = \mu_B + Aln(N) + \Delta\mu$	μ : coefficient de frottement (-) D : fonction de décapage (-) μ_B : coefficient de frottement du liant (-) μ_G : coefficient de frottement du granulat (-) $\Delta\mu$: variation liée au vieillissement ou à l'effet saisonnier (-) N : nombre de cycles de polissage (-) A : coefficient de régression (-)

Diringer et Barros [89] ont établi un lien entre la résistance au polissage des granulats, mesurée en laboratoire à l'aide du pendule SRT et l'adhérence des chaussées bitumineuses. Ils ont proposé un modèle exponentiel décrivant l'évolution de l'adhérence en fonction du polissage cumulatif et définissant une valeur asymptotique PV correspondant à la valeur minimale de frottement obtenue lors d'un essai PSV prolongé jusqu'à 10 heures. Ce paramètre, corrélé aux observations de terrain, a ensuite été relié à l'adhérence minimale à long terme sur la base d'essais instrumentés et de données météorologiques, permettant aux auteurs de proposer une limite provisoire de préqualification des granulats ($25 \leq \text{PV} \leq 32$).

Dans la continuité, Roe et Hartshorne [90] ont élargi l'analyse en exploitant une base de données nationale reliant les valeurs de PSV aux mesures d'adhérence estivale obtenues avec le SCRIM (MSSC). Leur modèle montre que l'adhérence croît avec le PSV, mais décroît avec l'augmentation du trafic et met en évidence l'importance de facteurs propres au site et au revêtement. Sur cette base, ils ont proposé une révision des spécifications britanniques, intégrant conjointement PSV et trafic et introduisant des exigences renforcées pour les zones fortement sollicitées (freinages, approches de bretelles).

Pérez-Acebo *et al.* [91] ont ensuite appliqué cette logique à l'échelle d'un réseau, en proposant un modèle prédictif de l'adhérence minimale fondé sur des mesures estivales de SCRIM en Espagne. Leur « modèle long » , intégrant le matériau de surface, le trafic journalier moyen, le nombre de voies et le PSV des granulats, atteint un coefficient de corrélation $R^2 = 0,56$ et améliore la capacité à anticiper l'adhérence minimale à long terme en représentant explicitement la résistance au polissage des granulats.

Dans une démarche proche, Athiappan *et al.* [92] ont développé en Inde des modèles de régression reliant à la fois l'adhérence et la profondeur de texture aux caractéristiques du trafic, de l'âge de la chaussée et des matériaux (PSV, abrasion, teneur en bitume). Validés sur un jeu de données terrain, ces modèles affichent une bonne robustesse ($R^2 = 0,915$ pour SR et $R^2 = 0,812$ pour TD), confirmant le rôle central de la macrotexture dans la durabilité de l'adhérence. Elles mettent en également en évidence le rôle plus limité de la teneur en bitume.

Tang [70] a proposé une loi empirique d'évolution de l'adhérence à partir d'essais menés avec la machine Wehner et Schulze. Son modèle décrit la décroissance du frottement en fonction du polissage cumulatif, en distinguant deux contributions : l'usure progressive du film de liant résiduel et le polissage de la microtexture des granulats.

Dans la continuité, Zhao [40] a élargi cette approche en intégrant d'autres mécanismes influençant l'adhérence, notamment le vieillissement du liant et les variations saisonnières. Ses travaux reposent sur une combinaison d'essais de laboratoire (vieillissement accéléré par Weatherometer, polissage avec la machine Wehner et Schulze) et de suivis *in situ*. Deux modèles ont ainsi été développés : l'un incrémental, capable de prendre en compte simultanément polissage, vieillissement et effets climatiques et l'autre simplifié, de type logarithmique, appliqué spécifiquement à la contribution des granulats.

Dans l'ensemble de ces travaux, les auteurs convergent sur la nécessité de poursuivre les recherches afin d'adapter les lois d'évolution de l'adhérence aux sollicitations réelles des chaussées et d'en améliorer la robustesse statistique. Ces modèles, bien que perfectibles, constituent déjà des outils d'aide à la décision pour les gestionnaires, en permettant d'identifier les sections à risque d'adhérence insuffisante et d'orienter les priorités d'entretien en fonction de l'évolution attendue des performances de surface.

1.10 Contact pneumatique-chaussée

1.10.1 Modèle mécanique du contact pneumatique-chaussée

La modélisation du contact pneumatique-chaussée constitue un enjeu majeur pour comprendre et anticiper l'évolution de l'adhérence. Elle repose sur une approche multidisciplinaire combinant la mécanique des matériaux, la physique des surfaces et les interactions dynamiques pneumatique-chaussée.

L'adhérence peut être approchée par le roulement longitudinal d'un cylindre élastique sur un massif semi-infini. Carter [93] a proposé en 1926 un modèle décrivant le contact roue-rail, transposé ensuite au contact pneumatique-chaussée [94, 95]. Le principe est illustré dans la figure 1.24.

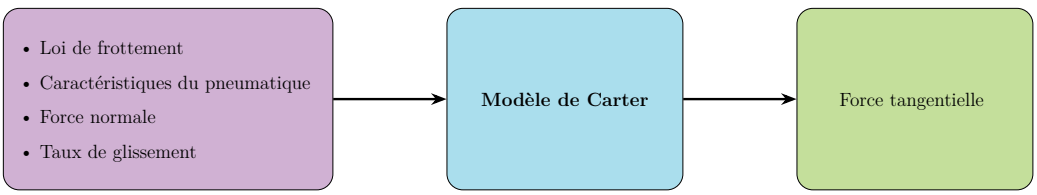


FIGURE 1.24 – Diagramme des variables d'entrée et de sortie du modèle de Carter.

Le pneumatique est assimilé à un cylindre de rayon R en contact avec une surface plane représentant la couche de roulement. Le modèle, défini par la loi de frottement, les caractéristiques mécaniques du pneumatique (module de Young E, coefficient de Poisson ν, rayon R), la charge normale appliquée et le taux de glissement, fournit en sortie la force tangentielle totale.

Le modèle de Carter repose sur les conditions et approximations suivantes.

1. **Les efforts normaux qui s'appliquent sur le pneumatique répondent à la théorie de Hertz.**
   En suivant la théorie de Hertz, la pression de contact $p(x)$ entre un pneumatique et une chaussée peut s'écrire de la façon suivante,

$$p(x) = p_0\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} = \sqrt{\frac{F_n E^*}{\pi R}}\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \tag{1.12}$$

   où $p_0 = \sqrt{F_n E^*/\pi R}$ est la pression normale, F_n est la force linéique normale, $E^* = E/(1-\nu^2)$ est le module réduit, $a = \sqrt{4F_n R/\pi E^*}$ est la demi-largeur du contact et R est le rayon du pneumatique.

2. **Il y a un découplage du problème normal et tangentiel. Il n'y a pas de déplacement normal dû aux efforts tangentiels et inversement.**
   Dans le cadre d'un massif semi-infini élastique, linéaire, homogène, isotrope caractérisé par un module de Young et un coefficient de Poisson, soumis à une force $\vec{F}$ ponctuelle en un point situé à la surface $(0, 0, 0)$, le déplacement $(u_x,\ u_y,\ u_z)$ en tout point $(x,\ y,\ 0)$ de la surface est donné par le tenseur de Green-Laudau sous l'hypothèse des petites déformations [96] (figure 1.25).

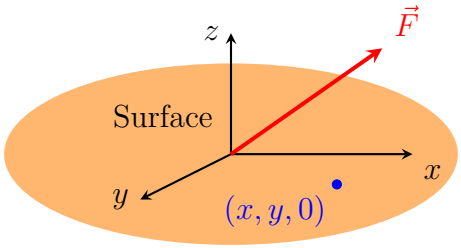


FIGURE 1.25 – Définition des axes (x, y, z) dans modèle de Carter.

Les équations suivantes indiquent le déplacement de tout autre point,

$$u_x = \frac{1+\nu}{2\pi E} \cdot \frac{1}{r}\left(-\frac{(1-2\nu)x}{r}F_z + 2(1-\nu)F_x + \frac{2\nu x}{r^2}(xF_x + yF_y)\right) \quad (1.13)$$

$$u_y = \frac{1+\nu}{2\pi E} \cdot \frac{1}{r}\left(-\frac{(1-2\nu)y}{r}F_z + 2(1-\nu)F_y + \frac{2\nu y}{r^2}(xF_x + yF_y)\right) \quad (1.14)$$

$$u_z = \frac{1+\nu}{2\pi E} \cdot \frac{1}{r}\left(2(1-\nu)F_z + (1-2\nu)\frac{1}{r}(xF_x + yF_y)\right) \quad (1.15)$$

où $\vec{F} = F_x\vec{x} + F_y\vec{y} + F_z\vec{z}$ et $r = \sqrt{x^2+y^2}$.

Dans le cas des élastomères, la surface est considérée comme incompressible. Cela se traduit par une valeur de coefficient de Poisson égale à $0,5$, mais également par deux cas particuliers. Le premier cas considère que la force $\vec{F}$ est dans le plan soit, $F_x \neq F_y \neq 0$ et $F_z = 0$. Alors le tenseur de déplacement est égal à

$$u_x = \frac{3}{4\pi E}\frac{F_x}{r} \quad \text{et} \quad u_y = \frac{3}{4\pi E r^3}xyF_x \quad \text{et} \quad u_z = 0.$$

Le deuxième cas considère que la force $\vec{F}$ est une force normale au plan soit, $F_x = F_y = 0$ et $F_z \neq 0$. Le tenseur de déplacement s'écrit alors,

$$u_x = u_y = 0 \quad \text{et} \quad u_z = \frac{3}{4\pi E}\frac{F_z}{r}.$$

Ces cas particuliers de solides incompressibles permettent d'observer que les efforts normaux n'induisent pas de déplacement dans le sens transverse (x, y) et que les efforts transverses n'induisent pas de déplacement dans le sens normal (z). Il y a donc un découplage du problème normal et tangentiel.

3. **Il y a la présence de deux zones différentes dans le contact pneumatique-chaussée (figure 1.26) : une zone collée située au bord d'attaque et une zone glissée située au bord de fuite.**

4. **La déformation dans la zone collée est constante, car le déplacement dans cette zone est uniforme. Cette propriété est résulte fait que le déplacement de la chaussée est infiniment rigide.**

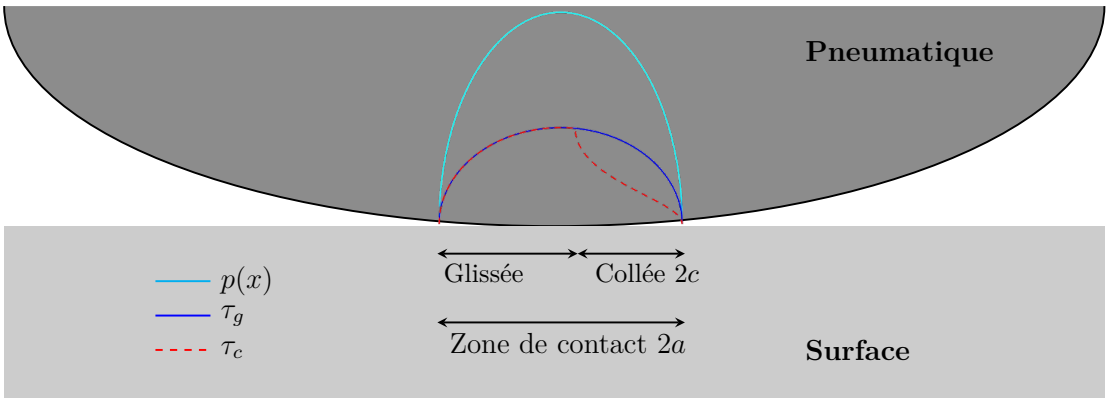


FIGURE 1.26 – Zones de contact du modèle de Carter.

5. **Dans la zone glissée, la contrainte tangentielle est directement proportionnelle à la pression p.**
Carter pose les équations (1.16, 1.17) pour les deux zones de contact différentes.

$$\tau_c(x) = T_1\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} - T_2\sqrt{1-\frac{(x-d)^2}{c^2}} \quad \textit{dans la zone collée} \tag{1.16}$$

$$\tau_g(x) = T_1\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \quad \textit{dans la zone glissée.} \tag{1.17}$$

Dans ces équations, T_1 et T_2 sont deux constantes qu'il faut ajuster afin que la déformation dans la zone collée soit constante. La taille de la zone collée est notée $2c$ et le centre de cette zone est égal à $d = a - c$ avec a qui exprime à la demi-largeur de contact préalablement définie. Le champ de déplacement dans la zone collée est donné par l'équation,

$$u_c(x) = -T_1\frac{x^2}{aE^*} + T_2\frac{(x-d)^2}{cE^*} - T_1C + T_2C. \tag{1.18}$$

En dérivant ce champ de déplacement, la déformation dans la zone collée est déduite :

$$\epsilon_c(x) = \frac{\partial u(x)}{\partial x} = -T_1\frac{2x}{aE^*} + T_2\frac{2(x-d)}{cE^*}. \tag{1.19}$$

La condition nécessaire à la déformation constante dans la zone collée se traduit par la relation entre le terme T_1 et T_2 suivante : $T_2 = T_1(c/a)$. Dans la zone glissée, le frottement suit une loi de Coulomb définie par :

$$\tau_g(x) = \mu p(x). \tag{1.20}$$

ce qui mène au fait que $T_1 = \mu p_0$. La déformation dans la zone de contact glissée peut alors s'écrire,

$$\epsilon_g(x) = \epsilon_0 = \frac{-2\mu d p_0}{aE^*}. \tag{1.21}$$

La force linéique totale tangentielle F_t correspond à l'intégrale des contraintes totales $\tau(x) = \tau_c(x) + \tau_g(x)$ s'appliquant sur toute la longueur du contact soit la zone $[-a; a]$. Elle est égale à :

$$\begin{aligned} F_t &= \int_{-a}^{a} \tau(x) = \int_{-a}^{a-2c} \tau_g(x) + \int_{a-2c}^{a} \tau_c(x) \\ &= \int_{-a}^{a-2c} T_1 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} dx - \int_{a-2c}^{a} T_2 \sqrt{1 - \frac{(x-d)^2}{c^2}} dx \\ &= \frac{\pi}{2} a\mu p_0 - \frac{c^2}{a} \frac{\pi}{2}\ \mu p_0. \end{aligned} \tag{1.22}$$

Sachant que la force normale linéique est définie à partir de l'intégration de la pression de contact de Hertz sur l'ensemble de la zone de contact, elle peut s'écrire $F_n = \pi/2 a p_0$. La force tangentielle peut donc s'exprimer en fonction de la force normale,

$$F_t = F_n \mu \left(1 - \frac{c^2}{a^2}\right). \tag{1.23}$$

Ces équations permettent d'exprimer la force tangentielle (cf. équation 1.24) en fonction du taux de glissement G et de la force normale appliquée dans un contact pneumatique-chaussée,

$$F_t = \mu F_n \left(1 - \left(1 + \frac{GR}{\mu a}\right)^2\right). \tag{1.24}$$

La figure 1.27 permet de représenter l'évolution de la force tangentielle F_t, normalisée par la force normale linéique F_n en fonction du taux de glissement G pour un coefficient de frottement μ égal à 1. Cette courbe permet de remarquer que plus le taux de glissement augmente et tend vers un contact en glissement pur, plus la force tangentielle augmente vers une valeur maximale μF_n. La dimension de la zone de contact glissée augmente jusqu'à atteindre la totalité de la zone de contact pour une valeur de taux de glissement égale à $G = (\mu a)/R$.

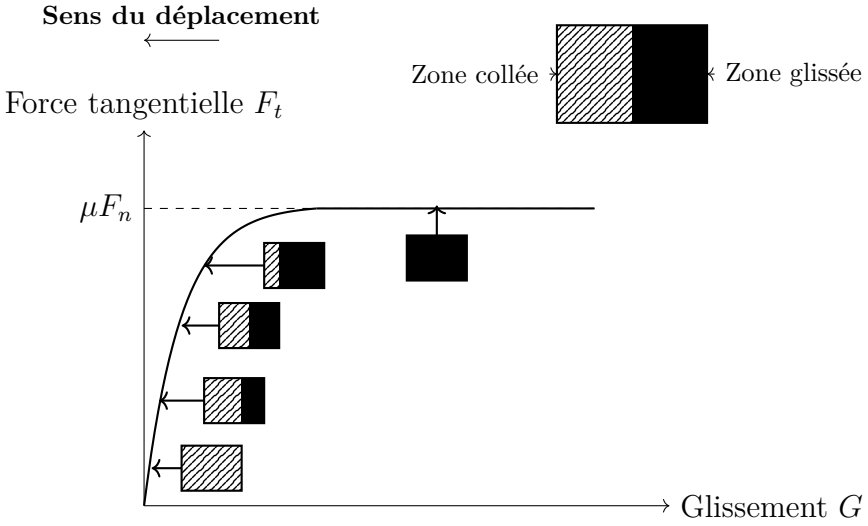


FIGURE 1.27 – Évolution de la force linéique tangentielle en fonction du glissement ainsi que l'évolution de la répartition des zones d'adhérence (collée) et de la zone de glissement (glissée).

Delanne et Gothié [97] citent des essais réalisés par l'entreprise Michelin qui permettent de déterminer les valeurs de forces tangentielles associées à un taux de glissement au cours de cycles de freinage. Lors de ces recherches, une courbe (cf. figure 1.28) est tracée à partir d'un modèle ajusté pour une séquence d'essai et une charge « roue » donnée.

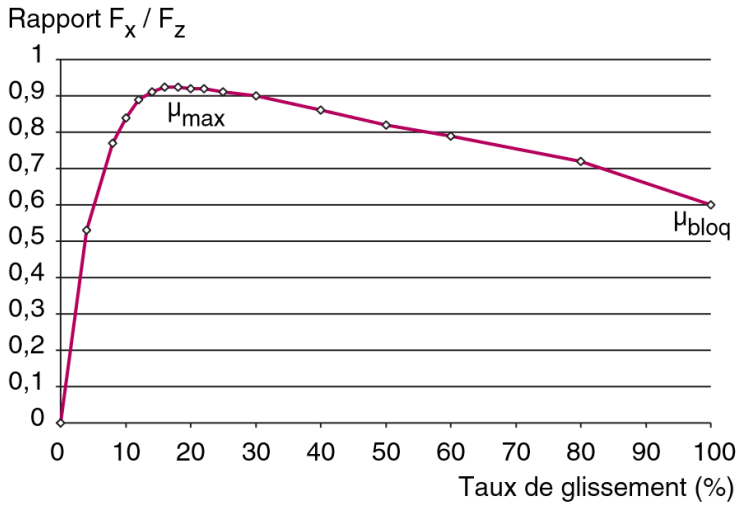


FIGURE 1.28 – Rapport entre les forces longitudinales F_x et les forces normales F_z en fonction du taux de glissement lors d'essais de freinage réalisés par Michelin [97].

Sur cette courbe, plusieurs phénomènes peuvent être observés :

1. Une évolution linéaire du rapport F_x/F_z en fonction du taux de glissement lorsque ce dernier est compris entre 0 % et environ 10 %. Ce phénomène correspond à un contact pneumatique-chaussée situé en grande partie dans une zone collée, sans glissement.
2. Une valeur maximale du rapport F_x/F_z notée $\mu_{\max}$ pour laquelle 85 % à 90 % de la zone de contact est en glissement.
3. Une valeur seuil du rapport F_x/F_z notée μ_{bloq}, obtenue pour un taux de glissement de 100 % pour laquelle la roue est bloquée. L'ensemble du contact se situe en glissement.

Dans la pratique, la plupart des essais de roulement/glissement mettent en évidence un maximum local du frottement $\mu_{\max}$, phénomène que le modèle simplifié de Carter ne restitue pas. Cela s'explique par le fait qu'à faible glissement, le contact est régi par des pseudo-glissements et des glissements modérés, assurant l'adhérence sans échauffement significatif. Avec l'augmentation du glissement, la température du pneumatique s'élève progressivement, jusqu'à devenir critique en cas de blocage de la roue. À des températures élevées, les pertes hystérétiques de la gomme diminuent, ce qui réduit le coefficient de frottement, un effet renforcé par la vitesse de glissement et la rugosité du sol [19]. Un enrichissement du modèle simplifié de Carter peut permettre de faire le lien une loi de frottement locale et des résultats expérimentaux en condition de roulement/glissement [98].

1.10.2 Mesure du contact pneumatique-chaussée

La mesure du contact pneumatique-chaussée peut être réalisée à partir de différents capteurs de mesures dans diverses conditions (force normale, vitesse de roulement, caractéristiques de la surface de contact, etc.).

Le premier dispositif est présenté dans un article de Eckels en 1929 [99]. Il s'agit d'un appareil constitué de ressorts et de comparateurs à cadran pouvant mesurer l'amplitude d'un déplacement et permettant donc de mesurer les pressions de contact moyennées sur toute la largeur du pneumatique. Il a fallu attendre quarante ans pour que des essais statiques sur des pneumatiques montés dans un banc d'essai soient réalisés [100-102]. Marshek *et al.* [103] en 1986 ont utilisé des films sensibles à la pression afin de permettre de mesurer la distribution de pression sous des pneumatiques de camion soumis à une charge statique. Cette étude a permis de montrer que les sculptures de la bande de roulement du pneumatique, sa pres-

sion de gonflage et la charge à l'essieu influencent fortement la surface de contact et la distribution des pressions dans l'empreinte du pneumatique. Les sculptures réduisent la surface de contact et créent des hétérogénéités de pression de contact. À l'inverse, l'usure tend à augmenter la surface de contact et à homogénéiser la distribution des pressions. De plus, la pression de gonflage du pneumatique détermine l'emplacement des zones de haute pression dans la surface de contact. Des pressions de gonflage faibles entraînent de grandes zones de contact et des pressions élevées près de l'épaulement du pneumatique. Alors que des pressions de gonflage élevées entraînent une réduction significative de la surface de contact et un déplacement des hautes pressions vers la zone centrale de la surface de contact. Dans un rapport de recherche, Douglas [104] dresse une liste non-exhaustive de ces dispositifs expérimentaux.

Actuellement, les techniques de mesure des pressions locales de contact entre un pneumatique et une chaussée les plus utilisées sont les suivantes [105].

— Le système VRSPTA (Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array), développé par De Beer [106] est un dispositif de type stress-in-motion (SIM) permettant de mesurer les contraintes tridimensionnelles à l'interface pneumatique-chaussée sous une roue en mouvement lent. Il repose sur une plaque instrumentée affleurante intégrée dans la chaussée. Lors du passage de la roue, les efforts verticaux, transversaux et longitudinaux sont mesurés en temps réel sur cette ligne instrumentée. Puis ces efforts sont convertis en une cartographie spatiale des contraintes de contact à partir de la vitesse de passage et d'un post-traitement.

— Le système Tekscan [107] repose sur un capteur mince et souple de type piézorésistif. Le capteur est constitué de lignes et colonnes conductrices qui se croisent. À chaque intersection se trouve un point de mesure sensible à la pression. Quand une charge est appliquée, la résistance électrique locale du matériau sensible varie. L'électronique du système balaie successivement les points du réseau et convertit ces variations de résistance en valeurs de pression.

— Le capteur photométrique Fuji Prescale [108] est un film de mesure de pression dont le principe repose sur l'apparition de zones colorées au niveau de l'interface pneumatique-chaussée sous l'effet du chargement. Cette coloration résulte de l'éclatement de microcapsules et son intensité est directement liée au niveau de pression exercé localement.

Chapitre 2

Campagne en laboratoire – Évolution de l'adhérence en fonction de facteurs environnementaux

Les chaussées, une fois mises en service, subissent diverses sollicitations (mécaniques, climatiques ou chimiques) issues de leur environnement [109]. Celles-ci résultent directement des actions exercées sur la surface (cf. figure 2.1), qu'il s'agisse par exemple des contraintes mécaniques induites par le passage des véhicules, des variations météorologiques, du vieillissement du liant bitumineux, du dépôt de polluants ou encore des opérations de viabilité hivernale (cf. Chapitre 1).

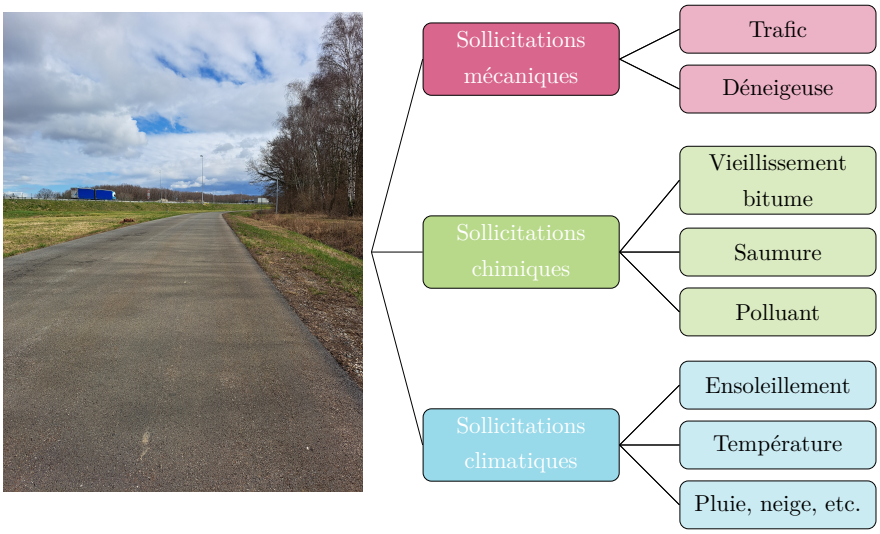


FIGURE 2.1 – Sollicitations non exhaustives appliquées à la surface d'une chaussée.

Ces dernières modifient progressivement l'état de surface des revêtements, ce qui se traduit directement par une évolution de leurs propriétés d'adhérence. Comme précisé dans la Remarque 1, ces sollicitations sont désignées sous le terme générique de « facteurs environnementaux ». **Ce chapitre présente la campagne réalisée en laboratoire afin d'identifier les sollicitations ayant un impact sur l'adhérence de revêtements routiers.**

2.1 Méthodologie de la campagne en laboratoire

2.1.1 Protocole expérimental

La méthodologie suivie lors de la campagne en laboratoire consiste à appliquer des facteurs environnementaux, de façon combinée ou non, et d'évaluer leurs effets sur des éprouvettes d'enrobé bitumineux à partir de l'état de leurs granulats en surface. La campagne mobilise plusieurs équipements complémentaires, répartis dans différents laboratoires. Lors des essais, quatre facteurs environnementaux, sont étudiés. Il s'agit du trafic, des cycles de gel-dégel et des opérations d'épandage de saumure se déroulant durant la période hivernale ainsi que des cycles de hautes températures se déroulant durant la période estivale. Ces facteurs sont représentatifs des sollicitations subies par une couche de roulement sur le réseau ATMB durant trois années de mise en service. Cette durée correspond à la période de mise en circulation pour laquelle des chutes de niveaux d'adhérence ont été constatées (cf. Introduction). La campagne en laboratoire se déroule en quatre phases distinctes, schématisées dans la figure 2.2.

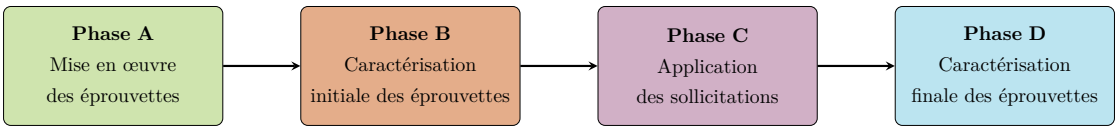


FIGURE 2.2 – Phasage de la campagne en laboratoire.

→ **Phase A**
Les éprouvettes sont préparées. Cette phase inclut leur mise en œuvre ainsi qu'une étape de décapage.

→ **Phase B**
L'état de surface initial des éprouvettes est caractérisé à l'aide de quatre appareils permettant d'accéder à différents indicateurs représentatifs de leur

état de surface (microscope confocal et scanner laser) et de leur capacité de frottement (banc LUG et machine Wehner et Schulze).

→ **Phase C**
Différentes combinaisons de facteurs environnementaux sont appliquées à la surface des éprouvettes.

→ **Phase D**
Enfin, une caractérisation finale de la surface des éprouvettes est effectuée.

Ce protocole expérimental permet de dresser des comparaisons relatives entre les états de surfaces initiaux et finaux des éprouvettes.

2.1.2 Stratégie d'application des sollicitations

Dans cette campagne en laboratoire, les sollicitations sont appliquées de manière cumulative, c'est-à-dire que l'ensemble des sollicitations représentatives de trois années de mise en circulation sur le réseau ATMB est appliqué en une seule séquence. Dans la réalité, les facteurs environnementaux qui s'exercent sur une chaussée se combinent et s'alternent au fil du temps. Des études préliminaires menées en amont de cette campagne, sous la forme de plusieurs Projets d'Initiation à la Recherche et au Développement (PIRD) réalisés par des étudiants de l'INSA Lyon, montrent que l'application alternée des sollicitations n'engendre pas d'évolutions de surface plus marquées que lors de leur application cumulative [110-114]. Ces études prennent la forme de trois protocoles expérimentaux distincts.

1. **Application de cycles de polissage avec la machine Wehner et Schulze**
   Deux éprouvettes d'enrobé bitumineux sont soumises à des cycles de polissage réalisés avec la machine Wehner et Schulze : l'une subie 50000 cycles en une seule fois, tandis que l'autre est sollicitée en 5 séquences de 10000 cycles. L'évaluation du coefficient de frottement à 50000 cycles montre une différence de 0,02 entre les deux éprouvettes, ce qui est une valeur négligeable au regard du fait que les éprouvettes sont différentes.
2. **Cycles d'immersion en bain de saumure**
   Quatre éprouvettes de granulats sont soumises à des cycles d'immersion en bain de saumure : deux subissent une immersion continue de 28 jours et les deux autres 4 séquences d'immersion de 7 jours. L'évaluation du coefficient de frottement au pendule SRT met en évidence une diminution de deux

points, indépendamment de la modalité des cycles d'immersion en bain de saumure appliqués aux éprouvettes.

3. **Cycles de gel-dégel**
   Quatre éprouvettes de granulats sont soumises à des cycles de gel-dégel dans une enceinte climatique : deux ont subi 5 jours de cycles continus, tandis que les deux autres ont été sollicitées en trois séquences équivalentes. L'évaluation du coefficient de frottement au pendule SRT a montré une diminution identique de dix points, quelle que soit la modalité appliquée.

L'effet de cycles de hautes températures appliqués selon différentes séquences n'est pas évalué dans le cadre de ces PIRD. Néanmoins, par analogie avec les résultats obtenus sur les cycles de gel-dégel, il peut être supposé que leur application cumulative et séquencée conduit à des évolutions similaires de l'état de surface.

Remarque 8 : Reproduire le séquençage réel des sollicitations en laboratoire nécessiterait des durées d'essais incompatibles avec les contraintes temporelles de cette thèse.

2.1.3 Détermination des indicateurs de surfaces pertinents

Lors de la caractérisation de l'état de surface des éprouvettes d'enrobé bitumineux à l'aide du microscope confocal et du scanner laser, plusieurs indicateurs peuvent être calculés. Certains d'entre eux sont présentés dans la section 1.6. Afin de garantir des indicateurs pertinents pour l'analyse de la microtexture des éprouvettes, une étude préliminaire est réalisée au Cerema [115]. Elle consiste à utiliser une éprouvette composée uniquement de granulats de différentes natures pétrologiques.

Remarque 9 : Cette éprouvette permet une étude simplifiée des évolutions des indicateurs de surface en éliminant l'effet lié à la présence du liant.

L'éprouvette constituée de granulats est caractérisée à l'aide d'un scanner laser (cf. section 1.7.3), avant et après l'application de cycles de polissage (0, 6000, 15000, 90000 et 180000) réalisés par une machine Wehner et Schulze (cf. section 1.4.4). Ces caractérisations donnent lieu au calcul de plusieurs indicateurs portant sur l'évolution de l'état de surface de granulats et de surfaces. Les analyses mettent en évidence la pertinence de quatre indicateurs de texture (S_a, S_q, S_{sk} et S_{ku})

calculés à partir des profils primaires[1] des surfaces. Le tableau 2.1 présente les valeurs obtenues pour ces indicateurs au cours des différents états de polissage.

TABLEAU 2.1 – Valeurs des indicateurs S_a, S_q, S_{sk} et S_{ku} de l'éprouvette constituée de granulats soumise à différents cycles de polissage réalisés avec la machine Wehner et Schulze.

Nombre de cycles de polissage	S_a **(mm)**	S_q **(mm)**	S_{sk} **(-)**	S_{ku} **(-)**
0	0,730	1,056	-2,108	6,837
6000	0,727 ↓	1,053 ↓	-2,126 ↓	6,925 ↑
15000	0,721 ↓	1,045 ↓	-2,146 ↓	7,016 ↑
90000	0,706 ↓	1,025 ↓	-2,202 ↓	7,143 ↑
180000	0,702 ↓	1,021 ↓	-2,201 ↑	7,148 ↑

Dans cette étude,

— S_a, S_q et S_{sk} diminuent à mesure que le nombre de cycles de polissage augmente ;

— S_{ku} augmente à mesure que le nombre de cycles de polissage augmente.

Pour l'ensemble des caractérisations des éprouvettes de la campagne en laboratoire avec le microscope confocal et le scanner laser, les indicateurs calculés seront donc uniquement ces derniers.

2.2 Objets d'étude de la campagne en laboratoire

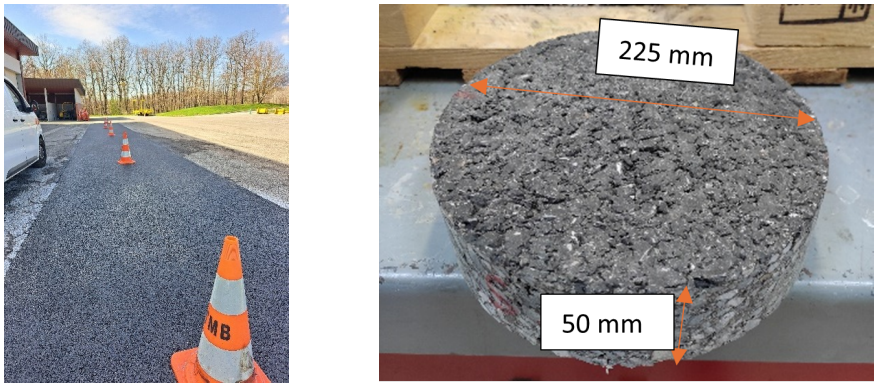
2.2.1 Formulation, format et identification des éprouvettes

La campagne en laboratoire s'applique à des éprouvettes, provenant d'une couche de roulement neuve de type BBM mise en œuvre spécialement pour cette étude (cf. figure 2.3). Les gravillons de taille 6/10 et le sable 0/2 utilisés dans cette formulation sont de nature amphibolite-microgranite. Le filler est de nature calcaire. Un bitume non modifié, de classe 35/50, joue le rôle du liant dans cette formule. Une proportion de 10 % d'agrégats d'enrobés compose également l'enrobé bitumineux. Suivant les recommandations du guide Recyclage des agrégats

1. Ces indicateurs peuvent être calculés à partir des profils de rugosité ou d'ondulation, obtenus à partir du profil primaire. Le profil de rugosité résulte de l'élimination des composantes à grande longueur d'onde, tandis que le profil d'ondulation est obtenu en supprimant les composantes à courte longueur d'onde.

d'enrobés dans les mélanges bitumineux à chaud [116], aucun détail n'est apporté concernant la composition et la provenance de ces agrégats d'enrobés, compte tenu de leur faible proportion.

Remarque 10 : La formulation étudiée durant cette campagne correspond à une formule utilisée sur le réseau ATMB sur laquelle des chutes précoces d'adhérence ont été mesurées.



(a) (b)

FIGURE 2.3 – Vues : (a) section de prélèvement de la campagne en laboratoire, (b) objet étudié (carotte) durant la campagne en laboratoire.

Les objets d'études sont des carottes cylindriques provenant de cette couche de roulement, de diamètre 225 mm et de 50 mm d'épaisseur. La photographie d'une éprouvette est donnée dans la figure 2.3. **Seize éprouvettes sont utilisées lors de la campagne en laboratoire, chacune étant désignée par un numéro dans la suite de ce rapport.**

2.2.2 Préparation des éprouvettes - Décapage

Le décapage constitue la première phase de la campagne en laboratoire. Il vise à retirer le film de liant résiduel présent en surface des éprouvettes (cf. section 1.8), afin de pouvoir ensuite appliquer les facteurs environnementaux directement sur la surface des granulats. Cette opération est réalisée à l'aide de la machine Wehner et Schulze, selon le protocole illustré en figure 2.4, qui repose sur l'application de cycles de polissage.

Dans un premier temps, l'éprouvette subit 14000 cycles de polissage, puis son coefficient de frottement est mesuré. Une étude préliminaire menée sur trois éprouvettes d'une même formulation a montré qu'après 14000 cycles, le coefficient de

frottement continue d'augmenter, mais tend à se stabiliser. Ce seuil a donc été retenu comme une référence pour caractériser la phase de décapage, avant le déclenchement d'une éventuelle phase de dégradation. Des séries supplémentaires de 2000 cycles sont ensuite appliquées, suivies de nouvelles mesures, jusqu'à ce que la dernière valeur soit inférieure d'au moins 0,05 au maximum atteint. Les évolutions des coefficients de frottement des éprouvettes sont données dans la figure 2.5.

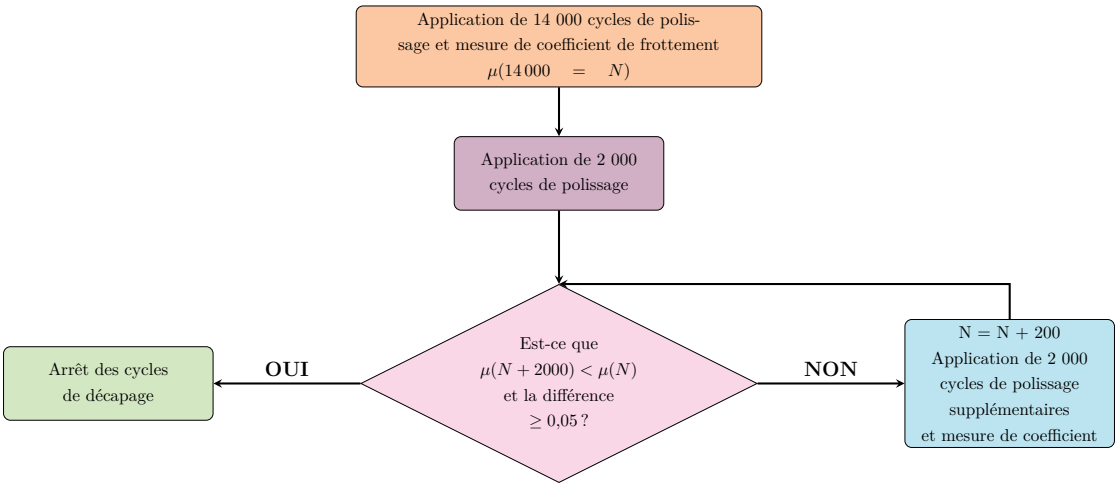


FIGURE 2.4 – Logigramme décisionnel de l'étape de décapage.

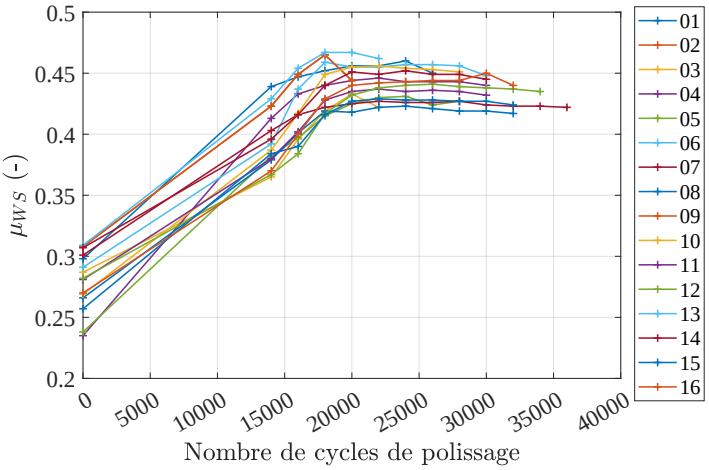


FIGURE 2.5 – Évolution du coefficient de frottement μ_{WS} des 16 éprouvettes en fonction du nombre de cycles de polissage durant la phase de décapage.

En moyenne, la valeur maximale du coefficient de frottement est atteinte après 18300 cycles de polissage, avec un coefficient moyen de 0,444. Le comportement des éprouvettes lors du décapage apparaît similaire, les valeurs de coefficient s'ins-

crivent dans un fuseau d'amplitude 0,05 [2]. Le lot d'éprouvettes peut ainsi être considéré comme homogène.

Remarque 11 : La valeur finale de frottement μ_{WS} sert de référence pour le reste de la campagne en laboratoire, l'état initial des éprouvettes étant défini comme leur état décapé.

2.3 Plan d'expériences

Afin d'évaluer l'effet de différents types de sollicitations sur la surface d'éprouvettes, il est nécessaire de quantifier dans un premier temps leur impact de manière simple et par la suite leur impact de façon combiné. Pour cela, les 16 éprouvettes subissent une combinaison simple ou multiple de sollicitations, comme illustrées dans le tableau 2.2. **Certaines combinaisons sont réalisées une, deux ou trois fois. La sollicitation du trafic est appliquée à l'ensemble des éprouvettes de la campagne en laboratoire.**

TABLEAU 2.2 – Combinaisons de sollicitations appliquées aux éprouvettes de la campagne en laboratoire.

Numéro d'éprouvette	Sollicitation(s) appliquée(s)			
	Saumure	Climat hivernal	Climat estival	Trafic
01	-	-	-	✓
02	-	-	-	✓
03	-	-	-	✓
04	✓	-	-	✓
05	-	✓	-	✓
06	-	✓	-	✓
07	-	-	✓	✓
08	-	-	✓	✓
09	✓	✓	-	✓
10	✓	✓	-	✓
11	✓	-	✓	✓
12	✓	-	✓	✓
13	-	✓	✓	✓
14	-	✓	✓	✓
15	✓	✓	✓	✓
16	✓	✓	✓	✓

2. La répétabilité de la mesure du coefficient par la machine Wehner et Schulze est de 0,024 après 90000 cycles de polissage sur une formule de type BBSG, selon la norme NF EN 12697-49 [32].

L'application des sollicitations suit un ordre strict qui est représenté dans la figure 2.6, dans le cadre d'une combinaison quadruple.

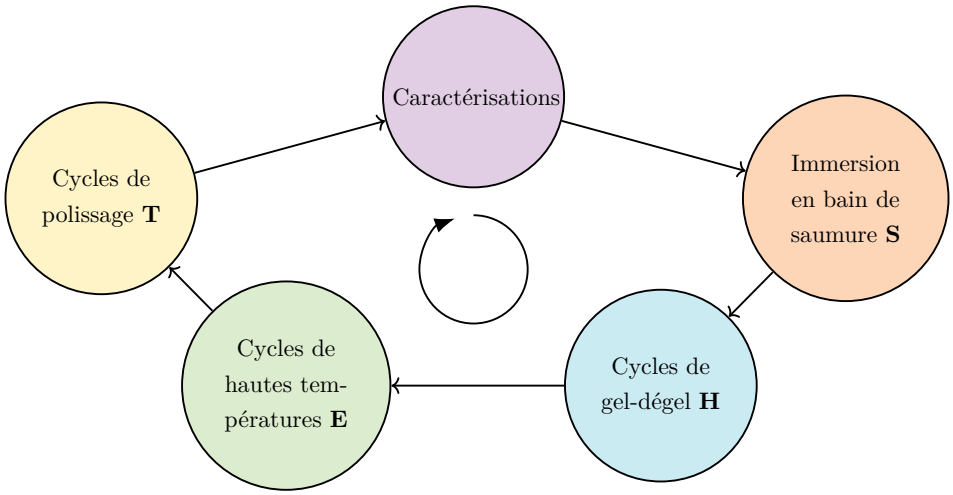


FIGURE 2.6 – Ordre d'application des sollicitations dans le cas de la combinaison quadruple.

Remarque 12 : L'ordre d'application des sollicitations est défini à la fois selon une logique de représentativité des conditions réelles et selon des contraintes expérimentales et logistiques. La sollicitation chimique de la saumure est appliquée en premier, en raison de sa plus grande difficulté d'élimination en surface des éprouvettes. Elle est suivie de cycles de gel-dégel, ce qui permet de reproduire la succession naturelle des sollicitations observées en période hivernale. Les sollicitations de hautes températures sont ensuite appliquées pour représenter les conditions estivales. Enfin, le trafic est positionné en dernière étape, car il est imposé à l'aide de la machine Wehner et Schulze, qui constitue à la fois un dispositif de sollicitation et un outil de caractérisation. Ce choix permet de limiter les opérations de manutention et de simplifier l'organisation expérimentale.

Dans la suite de ce mémoire, les notations suivantes sont utilisées afin de correspondre aux différents facteurs environnementaux appliqués aux éprouvettes.

— La notation **S** correspond à la **reproduction d'épandage de saumure**.

— La notation **H** correspond à la **reproduction du climat hivernal**.

— La notation **E** correspond à la **reproduction du climat estival**.

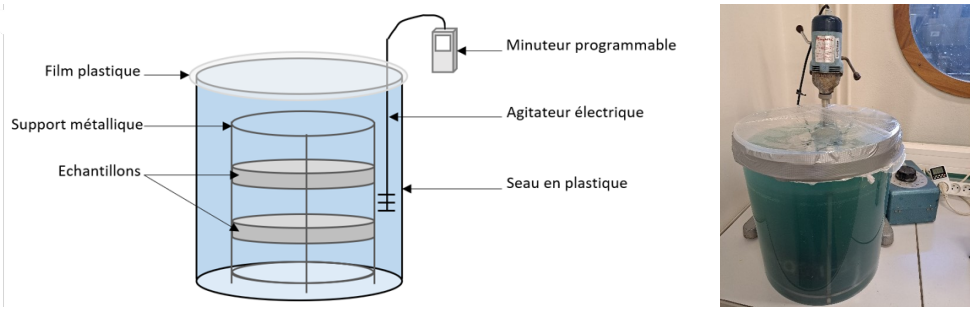
— La notation **T** correspond à la **reproduction du trafic**.

2.4 Protocoles des sollicitations

2.4.1 Saumure – Immersion bain de saumure S

La sollicitation liée à l'application de saumure dans le cadre d'opérations de viabilité hivernale est simulée en laboratoire par l'immersion d'éprouvettes dans un bain de saumure. Pour ce faire, un bain de saumure, composé de sel NaCl pur à 98 % provenant des stocks d'ATMB, est préparé dans un récipient avec une concentration massique de 22 %. Un brassage est effectué par un agitateur électrique fonctionnant de manière alternée sans interruption. L'agitation effectuée assure l'homogénéité de la solution durant l'intégralité du cycle d'immersion. Un film plastique recouvre également le récipient afin d'éviter toute évaporation d'eau durant le processus d'immersion (cf. figure 2.7).

Remarque 13 : La concentration en sel de la saumure est représentative de celle utilisée lors des opérations hivernales sur le réseau ATMB et elle demeure homogène dans le récipient tout au long d'un cycle d'immersion.



(a) (b)

FIGURE 2.7 – (a) Illustration du protocole d'immersion, (b) Photo du dispositif en laboratoire.

Les éprouvettes immergées au nombre maximal de 2 sont plongées dans cette saumure durant une période de 60 jours pour la simulation de trois années de mise en circulation. Ces durées correspondent approximativement au nombre moyen d'épandage de saumure sur le réseau ATMB durant la période hivernale.

Remarque 14 : En réalité, il y a plus de jours d'application de saumure sur le réseau ATMB. Cependant, il est considéré que sur le terrain, la concentration en NaCl de la saumure n'est pas fixe et décroît dès son application sur la chaussée. Le

passage de véhicules ainsi que l'humidité relative et les précipitations liées au climat hivernal réduisent considérablement la concentration de la saumure en NaCl. Estimant que la concentration de la saumure reste fixe en laboratoire et souhaitant des délais d'immersion réduits, une réduction du nombre de jours d'immersion est donc établie.

2.4.2 Cycles climatiques – Climat hivernal H et estival E

Les sollicitations liées à l'application de cycles climatiques sont simulées en laboratoire par une enceinte climatique, réglable en température et en humidité. Le modèle d'enceinte climatique utilisé pour cette campagne en laboratoire est ARALAB FitoClima 300 (cf. figure 2.8). L'enceinte climatique permet de créer des cycles de températures et d'humidité à l'aide de séquences programmables. Les paramètres des séquences des cycles de gel-dégel et de hautes températures sont basés sur des données du réseau ATMB provenant de Météo-France.

L'ensemble des données météorologiques utiles à la conception des protocoles de sollicitations climatiques sont explicitées dans l'Annexe A.



(a) (b)

FIGURE 2.8 – Enceinte climatique ARALAB FitoClima 300 utilisée durant la campagne en laboratoire.

- **Cycles de gel-dégel - Climat hivernal H**

Un cycle de gel-dégel est conduit avec différentes séquences, décrites dans le tableau 2.3. Lors de la séquence de gel, la température de consigne passe de +20 °C à -20 °C et inversement pour la séquence de dégel. Le taux d'humidité relative dans l'enceinte est de 80 % HR pour des températures supérieures à +10 °C. Ce paramètre ne pouvant pas être contrôlé par l'enceinte climatique pour des températures inférieures à cette consigne.

Tableau 2.3 – Séquences d'un cycle de gel-dégel : température, humidité relative et durée.

Séquence	Température (°C)	Humidité relative (%HR)	Durée (h)
1	+20	80	3h30
2	Rampe de +20 à -20	Pas de consigne	0h30
3	-20	Pas de consigne	3h30
4	Rampe de -20 à +20	Pas de consigne	0h30

Dans le cadre de cette campagne en laboratoire, une optimisation du temps d'essai est réalisée. Les températures de consignes sont choisies afin d'être plus extrêmes que celles constatées dans la réalité. L'application de températures plus extrêmes permet de fixer à 8 heures la durée d'un cycle de gel-dégel simulé dans l'enceinte climatique, au lieu des 24 heures généralement comptabilisées pour un cycle réel. Les cycles sont effectués en continu et sans aucun arrêt. **Sachant qu'un cycle de gel-dégel est simulé en laboratoire en 8 heures, trois années de sollicitations climatiques hivernales sont reproduites en 50 jours.**

- **Cycles de hautes températures - Climat estivale E**

Un cycle de hautes températures est conduit des séquences décrites dans le tableau 2.4. Lors de la séquence de hautes températures, la consigne est fixée à 50 °C, puis cette dernière redescend à +10 °C. Le taux d'humidité relative dans l'enceinte est de 70 %HR durant toute la durée des sollicitations. Les cycles sont effectués en continu et sans aucun arrêt.

Tableau 2.4 – Séquences d'un cycle de hautes températures : température, humidité relative et durée.

Séquence	Température (°C)	Humidité relative (%HR)	Durée (h)
1	+10	70	3h30
2	Rampe de +10 à +50	70	0h30
3	+50	70	3h30
4	Rampe de +50 à +10	70	0h30

De la même manière que pour les cycles de gel-dégel, les températures de consignes des cycles de hautes températures sont choisies afin d'être plus extrêmes que celles constatées dans la réalité. **Sachant qu'un cycle de hautes températures est simulé en laboratoire en 8 heures, trois années de sollicitations climatiques estivales sont reproduites en 33 jours.**

2.4.3 Trafic – Cycles de polissage T

La sollicitation liée au trafic est simulée en laboratoire par la machine Wehner et Schulze, décrite dans la section 1.4.4. La relation (2.1), provenant du travail de Tang [70], est utilisé afin de fixer un nombre de cycles de polissage représentatif du trafic du réseau ATMB sur une période de trois ans.

$$N = 0,024 \times T_{\mathrm{PL/jour}} \tag{2.1}$$

où $T_{\mathrm{PL/jour}}$ qui correspond au trafic moyen journalier de poids lourds sur une section routière. En considérant que le trafic journalier moyen sur le réseau ATMB est égal à environ 1500 PL/jour, alors la simulation de trois années de trafic peut être approchée par l'application d'environ 39500 cycles de polissage.

Remarque 15 : La relation de Tang est uniquement valable pour un revêtement de type BBTM. Néanmoins, dans le cadre de cette campagne en laboratoire, elle est appliquée aux éprouvettes de type BBM.

2.5 Protocoles de caractérisations

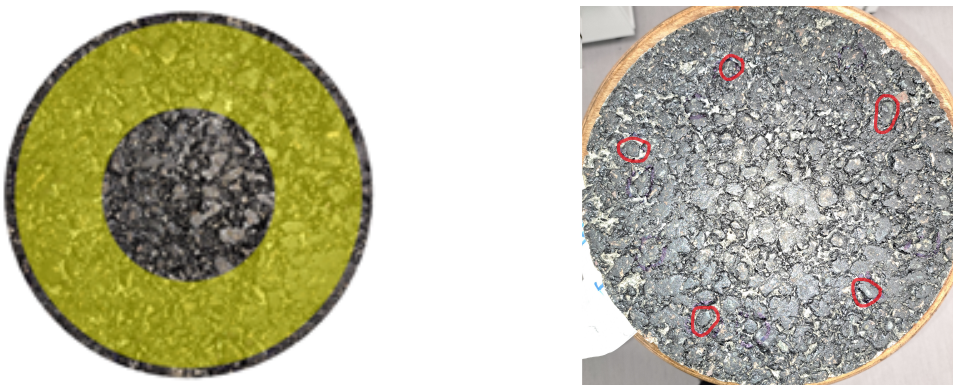
L'évaluation de l'adhérence en laboratoire présente une difficulté particulière liée à l'échelle d'analyse. En effet, l'adhérence est influencée par des mécanismes qui interviennent à plusieurs niveaux : la microtexture des granulats, qui régit l'adhésion et la macrotexture de la surface, qui conditionne le contact global avec le pneumatique. Pour restituer cette complexité, il est nécessaire de mobiliser plusieurs appareils de caractérisation. Chacun d'entre eux apporte des informations spécifiques sur une échelle donnée ou dans un contexte expérimental particulier et leur usage combiné garantit que l'ensemble des phénomènes contribuant à l'adhérence est pris en compte. Le microscope confocal permet d'accéder à une résolution très fine, adaptée à l'étude de la microtexture des granulats. Le scanner laser, quant à lui, offre une couverture spatiale plus large qui englobe à la fois la microtexture et la macrotexture. Du point de vue du frottement, deux dispositifs complémentaires sont utilisés : la machine Wehner et Schulze, qui permet d'évaluer l'adhérence dans des conditions normalisées et le banc LUG, qui explore des conditions expérimentales différentes et fournit des indicateurs complémentaires.

Remarque 16 : Il convient de souligner que ces appareils ne sont pas employés

ici dans une logique de comparaison. Leur utilisation conjointe permet de couvrir l'ensemble des échelles de texture d'intérêt et d'accéder à un large éventail d'indicateurs de surface et d'adhérence, de manière à appréhender de façon exhaustive l'évolution de l'adhérence en laboratoire.

2.5.1 Microscope confocal - HIROX KH-7700

La référence, le principe de fonctionnement et les principales caractéristiques du microscope confocal sont présentés dans l'Annexe B. Pour la caractérisation à l'aide du microscope confocal, 5 granulats sont sélectionnés par éprouvette. Ces granulats sont situés dans la couronne extérieure des éprouvettes, en évitant le bord, comme schématisé dans la figure 2.9.



(a) (b)

FIGURE 2.9 – (a) Zone de sélection des granulats d'étude, (b) Granulats sélectionnés pour l'étude d'une éprouvette.

Cette exigence de localisation permet de garantir que les granulats seront soumis aux cycles de polissage appliqués par la machine Wehner et Schulze et qu'ils seront présents à la fin des étapes de sollicitations. En effet, certains granulats situés en bordure d'éprouvette peuvent être détachés sous l'effet des sollicitations ou simplement lors des opérations de manutention (transport, déplacement, etc.).

Remarque 17 : En complément, les granulats retenus pour cette étude sont ceux situés aux points les plus hauts de la surface des éprouvettes. Ce choix méthodologique repose sur le fait que les aspérités les plus saillantes sont les premières et les plus fortement soumises aux sollicitations, notamment aux actions mécaniques de polissage générées par la machine Wehner et Schulze.

L'acquisition des surfaces des granulats est effectuée au grossissement 50 de l'objectif. Le mode juxtaposition 3D [3] et la technique de *stitching* [4] sont utilisés afin de reconstituer la surface entière à partir de plusieurs prises de vues.

Le traitement des données du microscope confocal est effectué à l'aide du logiciel MountainsMap®. Ce logiciel permet de traiter les surfaces des granulats à l'aide de plusieurs outils et de déterminer par la suite différents indicateurs de surface. Les opérations de traitement sont explicitées sont détaillées dans l'Annexe C.

Remarque 18 : Dans cette campagne en laboratoire, des comparaisons sont effectuées pour un même granulat à différents états (avant et après l'application de sollicitations). Les possibles différences de zones d'étude (liées aux opérations de traitements) peuvent mener à des biais dans les comparaisons. Cette étape constitue un point d'attention lors de l'analyse des résultats de la campagne en laboratoire.

2.5.2 Scanner laser 9400 HD - AMES Engineering

Le principe de fonctionnement du scanner laser est décrit dans la section 1.7.3. Pour comparer des zones d'étude identiques entre les deux états de la campagne en laboratoire, un système de fixation est conçu afin de maintenir l'éprouvette dans une même position latérale, longitudinale et angulaire (cf. figure 2.10). Il se compose d'une boîte munie d'un plot métallique destiné à recevoir les éprouvettes encochées, surmontée du scanner laser fixé sur une partie supérieure mobile, capable de tourner par rapport au reste du système et permettant ainsi de scanner l'éprouvette selon quatre orientations identiques.



FIGURE 2.10 – Système de fixation des éprouvettes utilisé lors des caractérisations par le scanner laser.

3. Le mode juxtaposition 3D du microscope numérique capture une pile d'images à différentes hauteurs et les fusionne pour produire une image entièrement nette en tout point.

4. Le mode *stitching* assemble automatiquement plusieurs zones adjacentes, ici des acquisitions 3D, par recouvrement et par recalage, afin de produire une surface 3D unique et continue.

Pour chaque éprouvette, quatre zones de dimensions 30 mm par 30 mm sont scannées. Elles se situent sur les quatre pôles des éprouvettes (figure 2.11).

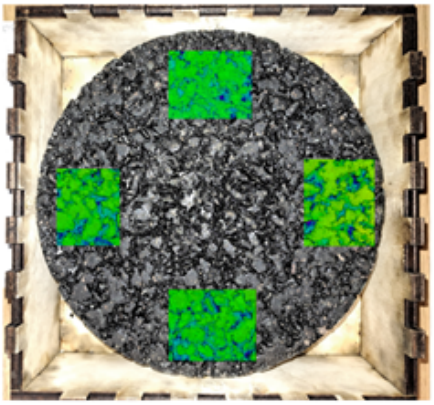


FIGURE 2.11 – Zones capturées à l'aide du scanner laser lors de la campagne en laboratoire.

Remarque 19 : Quatre zones ont été acquises à l'aide du scanner laser lors de la campagne expérimentale en laboratoire, au niveau des quatre pôles de l'éprouvette, afin de disposer de surfaces d'étude plus étendues et ainsi d'améliorer la représentativité des analyses réalisées.

Les caractéristiques des mesures sont indiquées dans le tableau 2.5. Elles proviennent d'études préliminaires visant à trouver le meilleur compromis entre la résolution des acquisitions et la durée de mesure.

TABLEAU 2.5 – Paramètres des zones de caractérisations du scanner laser AMES Engineering 9400 HD de la campagne en laboratoire.

Nombre de zones scannées par éprouvette	**Résolution longitudinale x**	**Résolution latérale y**	**Taille de la zone scannée**	**Durée de la mesure**
4	6,35 μm	49,69 μm	30 x 30 mm	25 min

Afin de comparer des zones d'études similaires entre deux états, les zones sont recalées manuellement les unes par rapport aux autres. Cette étape est effectuée à l'aide du logiciel MountainsMap®, de la même manière que pour les données du microscope confocal (cf. Annexe C). Les indicateurs calculés pour les surfaces caractérisées à l'aide du scanner laser sont :

— les indicateurs de textures (S_a, S_q, S_{sk}, S_{ku}) via le logiciel MountainsMap®,

— l'indicateur de profondeur moyenne de profil calculé selon la norme NF EN 13473-1 [83].

Remarque 20 : Les surfaces scannées présentent une longueur d'environ 30 mm, inférieure au seuil minimal de 100 mm fixé par la norme pour l'évaluation de la PMP [83]. Cette limitation constitue un point de vigilance dans l'analyse des données de profondeur moyenne de profil.

2.5.3 Machine Wehner et Schulze

Le principe de fonctionnement de la machine Wehner et Schulze est explicité dans la section 1.4.4. Lors de chaque mesure de coefficient de frottement, les vérifications et contrôles [5] prescrits dans la norme NF EN 12697-49 sont respectés [32]. La caractérisation est effectuée directement après un cycle de lavage de 180 s visant à retirer les résidus générés par les différentes sollicitations. Pour l'état final des éprouvettes, la mesure intervient après une session de polissage appliquée en une seule fois (39500 cycles). La température du poste de mesure est fixée à 10 °C ± 1°C, afin de garantir un état comparable de la gomme des patins en caoutchouc entre les différentes mesures. Enfin, aucune mesure n'a été répétée, suivant les recommandations de Hamlat *et al.* [117], qui montrent une dégradation du coefficient de frottement lorsque plusieurs mesures consécutives sont effectuées sur une même éprouvette.

Remarque 21 : Conformément à la norme, toutes les mesures de frottement réalisées à l'aide de la machine Wehner et Schulze sont effectuées sur des surfaces mouillées, afin de reproduire les conditions les plus pénalisantes en matière d'adhérence.

Remarque 22 : Le cycle de lavage appliqué avant chaque mesure a pour objectif d'assurer une reproductibilité des essais en éliminant les pollutions (particules détachées, cristaux de sel,etc.) susceptibles d'avoir une influence sur la mesure du coefficient de frottement.

5. Notamment la vérification de l'état des patins en caoutchouc, le contrôle de la vitesse de rotation et la calibration de la charge appliquée.

2.5.4 Banc LUG

Le banc LUG est un tribomètre conçu et développé au LTDS [6], qui réalise des mesures multi-physiques (frottement, vibration, bruit) et multi-échelles (temps, espace). Il permet de mettre en contact une éprouvette d'enrobé bitumineux avec un pneumatique de modélisme avec une charge normale fixe (comprise entre 0 et 30 N avec une précision de 0,01 N) et à différentes vitesses de rotation (comprise entre 0 et 1000 tours/min avec une précision supérieure à 1 %). Les vitesses de rotation ω_1 pour l'éprouvette et ω_2 pour le pneumatique sont imposées par des moteurs *brushless* synchrones régulés à l'aide d'encodeurs. Le banc LUG est représenté dans la figure 2.12.

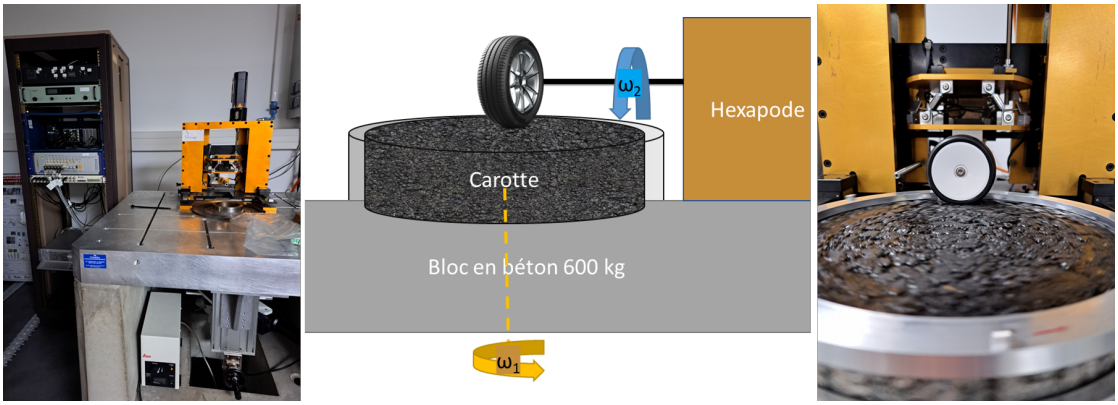


FIGURE 2.12 – Schéma de fonctionnement et vues du banc LUG.

Les mesures d'efforts sont réalisées avec un hexapode : un système équipé de six capteurs à jauges de contraintes. Lors d'un essai, l'hexapode fournit en temps réel l'ensemble des efforts (F_x, F_y, F_z) et moments (M_x, M_y, M_z) associés au contact du pneumatique et de l'enrobé, avec une fréquence d'acquisition de 1000 Hz. Ces mesures permettent à la fois d'obtenir une valeur moyenne des forces exercées durant le contact et d'accéder aux fluctuations temporelles qui les caractérisent. L'ensemble est monté sur un bloc en béton de 600 kg permettant au tribomètre de ne pas avoir de composante vibratoire intrusive aux mesures. La figure 2.13 illustre l'orientation des axes de mesure de l'hexapode.

6. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes.

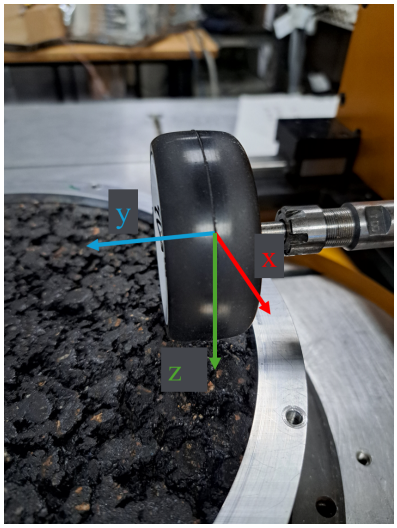


FIGURE 2.13 – Axes de mesure de l'hexapode du banc LUG.

Les essais réalisés à l'aide du banc LUG génèrent des fichiers, prenant la forme de tableaux, indiquant à chaque instant l'ensemble des forces et des moments mesurés par l'hexapode. Un exemple est donné dans le tableau ci-dessous.

F_y (N)	F_x (N)	F_z (N)	M_y (N.mm)	M_x (N.mm)	M_z (N.mm)
0,74969	0,448997	10,3685	23,8981	-1090,95	107,558
0,743357	0,460307	10,3495	24,2859	-1087,29	107,381
0,738138	0,471781	10,3171	24,6793	-1083,73	107,408
0,737368	0,476417	10,2932	24,8290	-1080,99	107,421

TABLEAU 2.6 – Exemple de fichier généré par le banc LUG lors d'un essai réalisé pour la campagne en laboratoire.

Trois essais sont réalisés pour la caractérisation de la surface d'une éprouvette. Les paramètres des essais sont présentés dans le tableau 2.7.

TABLEAU 2.7 – Caractéristiques des conditions des essais du banc LUG.

Liste des essais	**Essai 1**	**Essai 2**	**Essai 3**
Condition de contact	Roulement pur	Roulement/glissement	
Taux de glissement (en %)	0	14	33
Charge normale (en N)	20		

Ces essais sont conduits sur des surfaces sèches. Chaque éprouvette est associée à un pneumatique de modélisme neuf et lisse, garantissant un état identique de la gomme et un contact comparable entre échantillons. Ce choix permet d'éviter les biais liés à l'usure d'une sculpture ou au vieillissement de la gomme, tout en

assurant une répartition homogène des pressions de contact. Les évolutions observées peuvent ainsi être attribuées uniquement à l'état de surface des éprouvettes, renforçant la représentativité des mesures. Aucune correction n'est réalisée à partir des données brutes mesurées par le banc LUG. Cependant, il est vérifié que l'ensemble des données correspond à la mise en contact durant l'étape de roulement (avec ou sans glissement) entre le pneumatique et l'éprouvette, sans inclure les phases de démarrage ni d'arrêt de l'essai.

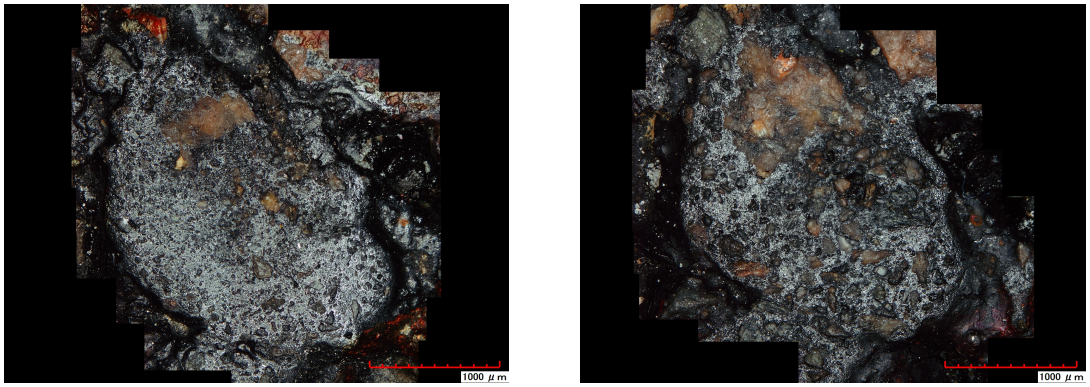
Remarque 23 : Les différents taux de glissement sont obtenus en faisant varier les vitesses de rotation de l'éprouvette ω_1 et du pneumatique ω_2. Ces écarts induisent un taux de glissement lors du contact pneumatique-chaussée .

Remarque 24 : Des essais complémentaires ont été menés avec le banc LUG sur des surfaces mouillées. L'humidification étant réalisée manuellement, il n'était pas possible de contrôler avec précision l'épaisseur ni l'homogénéité du film d'eau au cours du temps. Cette limitation réduisait la précision et la répétabilité des mesures, compromettant ainsi leur reproductibilité. Pour cette raison, cette condition de surface n'a pas été retenue dans le cadre de ce travail. Elle ouvrait néanmoins une perspective d'amélioration expérimentale, par la mise en place d'un dispositif automatisé d'alimentation en eau permettant d'assurer un film contrôlé et stable sur les éprouvettes.

2.6 Résultats et analyses – Campagne en laboratoire

2.6.1 Caractérisation - Microscope confocal

À titre introductif aux résultats globaux, la figure 2.14 illustre l'évolution de l'état de surface d'un granulat d'une éprouvette avant et après l'application de facteurs environnementaux : climat hivernal, climat estival et trafic. Des illustrations complémentaires sont fournies dans l'Annexe D.



(a) (b)

FIGURE 2.14 – Observations au microscope confocal de la surface d'un granulat de l'éprouvette 14 : (a) avant, (b) après l'application de sollicitations (H+E+T).

Les tableaux suivants (2.8, 2.9, 2.10, 2.11) reportent les valeurs moyennes des indicateurs de texture des 5 granulats de chaque éprouvette.

TABLEAU 2.8 – Valeurs moyennes de S_a, en μm , mesurées à l'aide du microscope confocal des éprouvettes aux deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur moyenne S_a (μm)**		**Écart relatif** ΔS_a (%)
		État initial	État final	
T	01	69,37	55,47	↓ −20%
T	02	80,03	81,39	↑ +2%
T	03	71,01	103,38	↑ +46%
S+T	04	84,15	92,28	↑ +10%
H+T	05	75,53	94,33	↑ +25%
H+T	06	124,44	102,14	↓ −18%
E+T	07	66,79	94,13	↑ +41%
E+T	08	97,90	106,49	↑ +9%
S+H+T	09	107,86	131,72	↑ +22%
S+H+T	10	107,28	108,24	↑ +1%
S+E+T	11	123,37	188,19	↑ +53%
S+E+T	12	72,66	92,68	↑ +28%
H+E+T	13	72,58	78,42	↑ +8%
H+E+T	14	70,22	102,67	↑ +46%
S+H+E+T	15	67,37	111,57	↑ +66%
S+H+E+T	16	68,17	124,24	↑ +82%

Les valeurs initiales de S_a présentent une forte proximité, avec un écart-type de 31,77 μm. Cet écart traduit les variations d'état de surface entre les éprouvettes, inhérentes au caractère aléatoire de la géométrie des granulats. Après application des sollicitations, la majorité des éprouvettes présente une augmentation de S_a

(comprise entre +2 % et +82 %) traduisant un accroissement de la rugosité, avec des reliefs plus marqués dus à des arrachements ou à des fracturations locales. À l'inverse, deux éprouvettes (01 et 06) présentent une baisse d'environ -19 %, indiquant un lissage de la surface par polissage ou par usure des arêtes.

TABLEAU 2.9 – Valeurs moyennes de S_q, en μm, mesurées à l'aide du microscope confocal des éprouvettes aux deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur moyenne S_q (μm)**		**Écart relatif** ΔS_q (%)
		État initial	État final	
T	01	89,39	76,74	$\downarrow -14\%$
T	02	115,65	120,49	$\uparrow +4\%$
T	03	95,39	133,30	$\uparrow +40\%$
S+T	04	110,80	129,22	$\uparrow +17\%$
H+T	05	101,30	126,28	$\uparrow +25\%$
H+T	06	167,86	147,48	$\downarrow -12\%$
E+T	07	87,33	125,66	$\uparrow +44\%$
E+T	08	132,85	136,81	$\uparrow +3\%$
S+H+T	09	149,77	166,78	$\uparrow +11\%$
S+H+T	10	152,80	156,93	$\uparrow +3\%$
S+E+T	11	170,38	260,80	$\uparrow +53\%$
S+E+T	12	95,01	121,18	$\uparrow +28\%$
H+E+T	13	97,07	103,49	$\uparrow +7\%$
H+E+T	14	93,65	133,32	$\uparrow +42\%$
S+H+E+T	15	87,77	149,02	$\uparrow +70\%$
S+H+E+T	16	89,50	165,66	$\uparrow +85\%$

Après l'application des sollicitations, la majorité des éprouvettes présente une augmentation de S_q comprise entre +3 % et +85 %, ce qui traduit physiquement une hausse de l'amplitude quadratique des hauteurs : les écarts par rapport au plan moyen s'accentuent, révélant des surfaces plus irrégulières, avec des reliefs accentués et une dispersion plus forte des hauteurs. Deux éprouvettes (01 et 06) montrent une baisse de S_q (-12 % à -14 %), indiquant une surface plus homogène et nivelée, probablement liée à un effet de polissage ou d'usure qui réduit les écarts de hauteur.

TABLEAU 2.10 – Valeurs moyennes de S_{sk}, sans unité, mesurées à l'aide du microscope confocal des éprouvettes aux deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur moyenne S_{sk} (-)**		**Écart relatif ΔS_{sk} (%)**
		État initial	État final	
T	01	−1,00	−1,61	↓ −61%
T	02	−2,35	−2,47	↓ −5%
T	03	−1,26	−1,20	↑ +5%
S+T	04	−1,10	−1,48	↓ −34%
H+T	05	−1,21	−0,62	↑ +49%
H+T	06	−1,53	−2,01	↓ −32%
E+T	07	−0,93	−0,98	↓ −6%
E+T	08	−1,70	−1,01	↑ +40%
S+H+T	09	−2,32	−0,75	↑ +68%
S+H+T	10	−1,60	−2,44	↓ −53%
S+E+T	11	−1,89	−1,79	↑ +5%
S+E+T	12	−0,92	−0,76	↑ +17%
H+E+T	13	−1,56	−0,88	↑ +43%
H+E+T	14	−1,19	−0,61	↑ +49%
S+H+E+T	15	−1,49	−0,96	↑ +36%
S+H+E+T	16	−1,22	−1,07	↑ +12%

TABLEAU 2.11 – Valeurs moyennes de S_{ku}, sans unité, mesurées à l'aide du microscope confocal des éprouvettes aux deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur moyenne S_{ku} (-)**		**Écart relatif ΔS_{ku} (%)**
		État initial	État final	
T	01	5,68	7,60	↑ +34%
T	02	15,08	17,01	↑ +13%
T	03	5,64	5,27	↓ −7%
S+T	04	6,20	9,66	↑ +56%
H+T	05	6,39	6,08	↓ −5%
H+T	06	7,01	16,13	↑ +130%
E+T	07	5,02	8,10	↑ +61%
E+T	08	9,57	5,42	↓ −43%
S+H+T	09	17,92	5,81	↓ −68%
S+H+T	10	9,59	27,94	↑ +191%
S+E+T	11	10,56	15,23	↑ +44%
S+E+T	12	6,07	4,91	↓ −19%
H+E+T	13	15,63	6,20	↓ −60%
H+E+T	14	6,07	4,38	↓ −28%
S+H+E+T	15	16,08	7,10	↓ −56%
S+H+E+T	16	9,87	5,65	↓ −43%

L'ensemble des valeurs de S_{sk} sont négatives. Cela signifie que les surfaces des granulats sont dominées majoritairement par des creux profonds plutôt que par des sommets. La distribution des hauteurs de ces surfaces est asymétrique vers le bas. Contrairement aux évolutions des S_a et S_q, les S_{sk} n'évoluent pas de la même manière selon les éprouvettes analysées. 6 éprouvettes connaissent une diminution de cet indicateur, traduisant un approfondissement des vallées et donc une accentuation de la dominance des creux. 10 éprouvettes subissent une augmentation, reflétant un adoucissement de creux et donc une répartition des hauteurs légèrement plus équilibrée. Les diminutions de S_{sk} sont comprises entre -5 % et -61 % et les augmentations sont comprises entre +5 % et +68 %.

Toutes les valeurs de S_{ku} sont supérieures à 3. Cela signifie que les surfaces des granulats présentent des pics ou des creux très marqués. Il y a une forte concentration des valeurs de hauteur autour de la moyenne, mais avec quelques hauteurs extrêmes très éloignées. L'indicateur évolue de manière contrastée : il augmente pour 9 éprouvettes (+13 % et +130 %), ce qui signifie que la surface devient plus extrême, avec une accentuation des pics ou des creux isolés ; et il diminue pour 7 éprouvettes (-5 % et -68 %), traduisant au contraire un aplatissement relatif des reliefs et une répartition plus homogène des hauteurs.

Le tableau 2.12 présente les résultats issus de l'analyse comparative entre les éprouvettes soumises aux mêmes sollicitations.

TABLEAU 2.12 – Écarts relatifs moyens, en %, de S_a, S_q, S_{sk} et S_{ku}, mesurées à l'aide du microscope confocal pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Écarts relatifs (%)**			
	ΔS_a	ΔS_q	ΔS_{sk}	ΔS_{ku}
T	$\uparrow +9\% \pm 27\%$	$\uparrow +10\% \pm 22\%$	$\downarrow -20\% \pm 29\%$	$\uparrow +13\% \pm 16\%$
T*	$\uparrow +24\% \pm 22\%$	$\uparrow +22\% \pm 18\%$	$0\% \pm 5\%$	$\uparrow +3\% \pm 10\%$
S+T	$\uparrow +10\%$ *(1 éprouv.)*	$\uparrow +17\%$ *(1 éprouv.)*	$\downarrow -34\%$ *(1 éprouv.)*	$\uparrow +56\%$ *(1 éprouv.)*
H+T	$\uparrow +3\% \pm 21\%$	$\uparrow +6\% \pm 18\%$	$\uparrow +9\% \pm 40\%$	$\uparrow +63\% \pm 67\%$
E+T	$\uparrow +25\% \pm 16\%$	$\uparrow +23\% \pm 20\%$	$\uparrow +17\% \pm 23\%$	$\uparrow +9\% \pm 52\%$
S+H+T	$\uparrow +12\% \pm 11\%$	$\uparrow +7\% \pm 4\%$	$\uparrow +7\% \pm 60\%$	$\uparrow +62\% \pm 129\%$
S+E+T	$\uparrow +40\% \pm 12\%$	$\uparrow +40\% \pm 13\%$	$\uparrow +11\% \pm 6\%$	$\uparrow +13\% \pm 32\%$
H+E+T	$\uparrow +27\% \pm 19\%$	$\uparrow +24\% \pm 18\%$	$\uparrow +46\% \pm 3\%$	$\downarrow -44\% \pm 16\%$
S+H+E+T	$\uparrow +74\% \pm 8\%$	$\uparrow +77\% \pm 8\%$	$\uparrow +24\% \pm 12\%$	$\downarrow -49\% \pm 7\%$

Deux lignes distinguent la sollicitation trafic seul : T (éprouvettes 01, 02 et 03) et T*, excluant l'éprouvette 01 dont le comportement singulier (diminution marquée de S_a et S_q) biaise les tendances globales.

Remarque 25 : L'écart-type des évolutions est déterminé à l'aide de la formule de l'écart-type population. Cet indicateur, calculé sur l'ensemble des valeurs disponibles, mesure la dispersion des données autour de la moyenne. La formule utilisée est : $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu)^2}$.

L'analyse des écarts relatifs met en évidence des tendances différenciées selon les combinaisons de sollicitations.

— Les indicateurs d'amplitude S_a et S_q augmentent systématiquement, traduisant un enrichissement de la rugosité de surface, avec des hausses pouvant atteindre respectivement +74 % et +77 % dans le cas de la combinaison quadruple S+H+E+T. Ces augmentations sont d'autant plus marquées que les sollicitations sont combinées. Cependant, elles tendent à être limitées par les cycles de gel-dégel et accentuées par les cycles de hautes températures.

Remarque 26 : Ces effets doivent toutefois être nuancés. Le liant bitumineux peut agir comme un « masque topographique » et, sous l'effet des températures, il peut se déplacer en surface ou modifier la répartition des sommets et des creux. Dans ce cas, les variations de rugosité observées peuvent être en partie faussées par ces déplacements de liant.

— Les évolutions de l'indicateur d'asymétrie S_{sk} apparaissent très variables selon les sollicitations, avec des diminutions allant jusqu'à -34 % (S+T) ou des augmentations atteignant +46 % (H+E+T). Cette variabilité reflète une redistribution contrastée des sommets et des creux. Globalement, S_{sk} suit les tendances de l'étude préliminaire (cf. section 2.1.3), avec une asymétrie positive traduisant l'apparition de pics saillants (fissuration, arrachement), à l'exception des cas T, T* et S+T.

— L'indicateur d'aplatissement S_{ku} se révèle particulièrement sensible aux sollicitations combinées, avec des variations allant de -49 % à +63 %. Ces évolutions traduisent un changement profond dans la distribution statistique des hauteurs. Contrairement à l'étude préliminaire, une augmentation de S_{ku} est ici associée à des profils plus extrêmes et hétérogènes, alors que dans les cas de sollicitations complètes (H+E+T, S+H+E+T), une homogénéisation semble au contraire réduire l'indicateur.

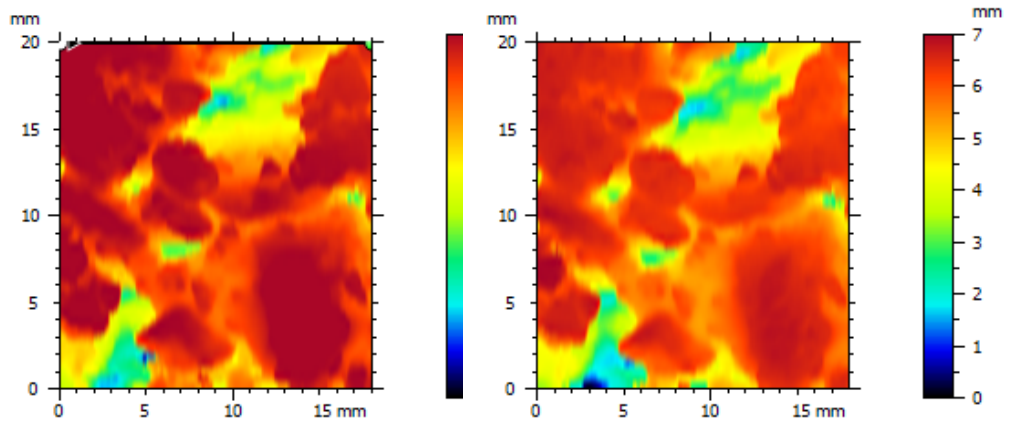
Les écarts-types élevés révèlent une variabilité importante entre les éprouvettes soumises à une même sollicitation. Cette hétérogénéité de comportement peut s'expliquer à la fois par des différences de composition de surface

et par l'intensité relativement modérée des sollicitations appliquées (équivalente à environ trois années de mise en circulation), insuffisante pour homogénéiser les comportements, certaines zones n'ayant sans doute pas encore atteint leur seuil de dégradation significatif.

Les caractérisations réalisées à l'aide du microscope confocal révèlent que les facteurs environnementaux modifient significativement la micro-texture des granulats, avec des tendances globales à l'augmentation des indicateurs d'amplitude (S_a, S_q) et des évolutions contrastées des paramètres de forme (S_{sk}, S_{ku}). Parmi ces facteurs, le climat estival apparaît comme le facteur le plus déterminant : il accentue fortement l'enrichissement de la rugosité et modifie la distribution des hauteurs, traduisant le rôle majeur des cycles de hautes températures dans les mécanismes de dégradation à l'échelle microscopique. Malgré la variabilité entre les éprouvettes et les limites liées au caractère localisé des mesures, cette analyse confirme son intérêt pour une lecture fine des altérations à l'échelle microscopique.

2.6.2 Caractérisation - Scanner laser

En préalable à la présentation des résultats globaux, la figure 2.15 illustre l'évolution des hauteurs de points d'une éprouvette avant et après l'application de différents facteurs environnementaux.



(a) (b)

FIGURE 2.15 – Observations au scanner laser de la surface d'un granulat de l'éprouvette 14 : (a) avant, (b) après l'application de sollicitations (H+E+T).

➢ **Évolution de la profondeur moyenne de profil des éprouvettes**

Le tableau 2.13 présente les valeurs moyennes de profondeur moyenne de profil de chaque éprouvette. Comme rappelé dans la Remarque 20, la faible longueur de surface scannée introduit une imprécision dans le calcul de cet indicateur.

TABLEAU 2.13 – Valeurs moyennes de PMP, en mm, mesurées à l'aide du scanner laser des éprouvettes aux deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Profondeur moyenne de profil PMP (mm)**		**Écart relatif** Δ PMP (%)
		État initial	État final	
T	01	0,792	0,758	$\downarrow -4\%$
T	02	0,804	0,805	$\uparrow +0\%$
T	03	0,914	0,923	$\uparrow +1\%$
S+T	04	0,858	0,841	$\downarrow -2\%$
H+T	05	0,762	0,712	$\downarrow -6\%$
H+T	06	0,862	0,823	$\downarrow -4\%$
E+T	07	0,755	0,776	$\uparrow +3\%$
E+T	08	1,201	1,169	$\downarrow -3\%$
S+H+T	09	0,741	0,704	$\downarrow -5\%$
S+H+T	10	0,766	0,712	$\downarrow -7\%$
S+E+T	11	0,657	0,662	$\uparrow +1\%$
S+E+T	12	0,834	0,812	$\downarrow -3\%$
H+E+T	13	0,736	0,739	$\uparrow +0\%$
H+E+T	14	0,825	0,801	$\downarrow -3\%$
S+H+E+T	15	0,704	0,691	$\downarrow -2\%$
S+H+E+T	16	0,665	0,621	$\downarrow -7\%$

Les valeurs initiales de profondeur moyenne de profil sont globalement proches pour l'ensemble des éprouvettes : les faibles écarts observés traduisant le caractère aléatoire de la répartition des granulats en surface. L'éprouvette 07 se distingue toutefois par une valeur nettement plus éloignée de la moyenne, constituant ainsi un cas particulier. Les comparaisons relatives entre l'état initial et l'état final de la campagne en laboratoire montrent que la majorité des éprouvettes (12 sur 16) connaissent une diminution de leur valeur de profondeur moyenne de profil. Ces baisses sont comprises entre -2 % et -7 %. Cela traduit physiquement un polissage progressif des surfaces, marqué par l'aplanissement des arêtes et la réduction de la profondeur des vallées. Pour cinq éprouvettes (02, 03, 07, 11, 13), une augmentation de la PMP, allant jusqu'à +3 %, ce qui correspond à une accentuation locale du relief de la texture, liée par exemple à des micro-arrachements de liant ou à l'exposition accrue de granulats.

➢ Évolution des indicateurs de texture des éprouvettes

Les tableaux 2.14, 2.15, 2.16 et 2.17 reportent les valeurs moyennes des indicateurs de chacune des quatre zones scannées par éprouvette.

Tableau 2.14 – Valeurs moyennes de S_a, en mm, mesurées à l'aide du scanner laser des éprouvettes aux deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur moyenne S_a (mm)**		**Écart relatif** ΔS_a (%)
		État initial	État final	
T	01	0,719	0,697	$\downarrow -3\%$
T	02	0,685	0,686	$\uparrow +0\%$
T	03	0,787	0,793	$\uparrow +1\%$
S+T	04	0,838	0,820	$\downarrow -2\%$
H+T	05	0,628	0,608	$\downarrow -3\%$
H+T	06	0,775	0,758	$\downarrow -2\%$
E+T	07	0,615	0,635	$\uparrow +3\%$
E+T	08	0,976	0,975	$\downarrow 0\%$
S+H+T	09	0,663	0,624	$\downarrow -6\%$
S+H+T	10	0,694	0,672	$\downarrow -3\%$
S+E+T	11	0,598	0,587	$\downarrow -2\%$
S+E+T	12	0,724	0,704	$\downarrow -3\%$
H+E+T	13	0,664	0,656	$\downarrow -1\%$
H+E+T	14	0,747	0,725	$\downarrow -3\%$
S+H+E+T	15	0,641	0,628	$\downarrow -2\%$
S+H+E+T	16	0,609	0,574	$\downarrow -6\%$

La comparaison entre les deux états met en évidence une diminution de S_a pour la quasi-totalité des échantillons, pouvant atteindre -6 %. Cette baisse traduit une atténuation de la rugosité de surface liée à l'usure des granulats. Seules les éprouvettes 02, 03 et 07 présentent une légère augmentation de S_a, limitée à +3%.

De même, pour la comparaison de S_q entre les deux états révèle une diminution de l'indicateur, pouvant aller jusqu'à -5 %, pour la majorité des éprouvettes. Les trois éprouvettes (02, 03, 07) se distinguent par une augmentation de S_q, comprise entre +1 % et +4 %. La réduction de S_q reflète un affaiblissement de l'amplitude des reliefs, traduisant des surfaces globalement plus homogènes et nivelées.

TABLEAU 2.15 – Valeurs moyennes de S_q, en mm, mesurées à l'aide du scanner laser des éprouvettes aux deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur moyenne S_q (mm)**		**Écart relatif ΔS_q (%)**
		État initial	État final	
T	01	0,952	0,932	↓ −2%
T	02	0,924	0,929	↑ +1%
T	03	1,060	1,072	↑ +1%
S+T	04	1,105	1,101	↓ 0%
H+T	05	0,838	0,814	↓ −3%
H+T	06	1,055	1,037	↓ −2%
E+T	07	0,809	0,840	↑ +4%
E+T	08	1,301	1,295	↓ 0%
S+H+T	09	0,879	0,843	↓ −4%
S+H+T	10	0,983	0,955	↓ −3%
S+E+T	11	0,851	0,840	↓ −1%
S+E+T	12	0,966	0,951	↓ −2%
H+E+T	13	0,945	0,929	↓ −2%
H+E+T	14	1,065	1,015	↓ −5%
S+H+E+T	15	0,880	0,871	↓ −1%
S+H+E+T	16	0,868	0,832	↓ −4%

TABLEAU 2.16 – Valeurs moyennes de S_{sk}, sans unité, mesurées à l'aide du scanner laser des éprouvettes aux deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur moyenne S_{sk} (-)**		**Écart relatif ΔS_{sk} (%)**
		État initial	État final	
T	01	-1,861	-1,943	↓ −4%
T	02	-1,676	-1,720	↓ −3%
T	03	-1,692	-1,719	↓ −2%
S+T	04	-1,717	-1,867	↓ −9%
H+T	05	-1,594	-1,647	↓ −3%
H+T	06	-1,787	-1,834	↓ −3%
E+T	07	-1,524	-1,510	↑ +1%
E+T	08	-1,517	-1,502	↑ +1%
S+H+T	09	-1,736	-1,852	↓ −7%
S+H+T	10	-2,282	-2,269	↑ +1%
S+E+T	11	-2,306	-2,328	↓ −1%
S+E+T	12	-1,593	-1,701	↓ −7%
H+E+T	13	-2,305	-2,234	↑ +3%
H+E+T	14	-2,492	-2,206	↑ +11%
S+H+E+T	15	-1,935	-2,021	↓ −4%
S+H+E+T	16	-2,229	-2,294	↓ −3%

Les valeurs de S_{sk} des surfaces analysées sont négatives. L'indicateur n'évolue pas de la même manière selon les éprouvettes analysées. 5 éprouvettes connaissent une augmentation de cet indicateur (entre +1 % et +11 %) , contre 11 éprouvettes qui subissent une diminution (entre -1 % et -9 %). Une diminution de S_{sk} traduit un approfondissement des vallées et une dominance accrue des creux, tandis qu'une augmentation correspond à un comblement relatif de ces vallées et à une répartition des hauteurs légèrement plus équilibrée.

TABLEAU 2.17 – Valeurs moyennes de S_{ku}, sans unité, mesurées à l'aide du scanner laser des éprouvettes aux deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur moyenne S_{ku} (-)**		**Écart relatif ΔS_{ku} (%)**
		État initial	État final	
T	01	6,883	7,291	↑ +6%
T	02	6,168	6,327	↑ +3%
T	03	6,442	6,526	↑ +1%
S+T	04	6,055	6,705	↑ +11%
H+T	05	5,747	5,845	↑ +2%
H+T	06	6,784	6,911	↑ +2%
E+T	07	6,163	6,084	↓ −1%
E+T	08	5,454	5,358	↓ −2%
S+H+T	09	6,811	7,043	↑ +3%
S+H+T	10	9,897	9,424	↓ −5%
S+E+T	11	10,492	10,359	↓ −1%
S+E+T	12	6,079	6,487	↑ +7%
H+E+T	13	10,238	9,552	↓ −7%
H+E+T	14	15,462	10,817	↓ −30%
S+H+E+T	15	7,423	7,871	↑ +6%
S+H+E+T	16	9,643	9,655	↑ +0%

L'ensemble des valeurs de S_{ku} des surfaces analysées sont supérieures à 3. Cet indicateur de l'aplatissement des surfaces évolue à la hausse pour 10 éprouvettes sur 16 (jusqu'à +11 %) ou à la baisse pour 6 éprouvettes sur 16 (jusqu'à -30 %). Une augmentation de S_{ku} traduit une surface présentant davantage de valeurs extrêmes, alors qu'une diminution correspond à un aplatissement relatif et une distribution des hauteurs plus homogène.

Une analyse par combinaison de sollicitations, réalisée en comparant plusieurs éprouvettes dégradées de manière identique, permet d'obtenir les résultats décrits dans le tableau 2.18. La ligne T* correspond à la sollicitation du trafic seule, en excluant l'éprouvette 01.

TABLEAU 2.18 – Écarts relatifs moyens, en %, de PMP, S_a, S_q, S_{sk} et S_{ku}, mesurées à l'aide du scanner laser pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Écart relatif (%)**				
	Δ PMP	ΔS_a	ΔS_q	ΔS_{sk}	ΔS_{ku}
T	$\downarrow -1\% \pm 2\%$	$\downarrow -1\% \pm 2\%$	$\downarrow 1\% \pm 1\%$	$\uparrow +3\% \pm 1\%$	$\uparrow +4\% \pm 2\%$
T*	$\uparrow +1\% \pm 0\%$	$\uparrow +1\% \pm 0\%$	$\uparrow +1\% \pm 1\%$	$\uparrow +3\% \pm 0\%$	$\uparrow +3\% \pm 0\%$
S+T	$\downarrow -2\%$ *(1 éprouv.)*	$\downarrow -2\%$ *(1 éprouv.)*	$\downarrow 0\%$ *(1 éprouv.)*	$\uparrow +9\%$ *(1 éprouv.)*	$\uparrow +11\%$ *(1 éprouv.)*
H+T	$\downarrow -5\% \pm 1\%$	$\downarrow -2\% \pm 1\%$	$\downarrow -2\% \pm 2\%$	$\uparrow +3\% \pm 0\%$	$\uparrow +2\% \pm 0\%$
E+T	$\uparrow +0\% \pm 1\%$	$\uparrow +1\% \pm 2\%$	$\uparrow +2\% \pm 1\%$	$\downarrow -2\% \pm 0\%$	$\downarrow -1\% \pm 1\%$
S+H+T	$\downarrow -6\% \pm 1\%$	$\downarrow -4\% \pm 1\%$	$\downarrow -4\% \pm 3\%$	$\uparrow +5\% \pm 3\%$	$\uparrow +4\% \pm 3\%$
S+E+T	$\downarrow -1\% \pm 2\%$	$\downarrow -2\% \pm 1\%$	$\downarrow -2\% \pm 0\%$	$\uparrow +4\% \pm 3\%$	$\uparrow +4\% \pm 3\%$
H+E+T	$\downarrow -1\% \pm 2\%$	$\downarrow -2\% \pm 2\%$	$\downarrow -3\% \pm 5\%$	$\downarrow -4\% \pm 1\%$	$\downarrow -9\% \pm 2\%$
S+H+E+T	$\downarrow -4\% \pm 2\%$	$\downarrow -4\% \pm 2\%$	$\downarrow -3\% \pm 0\%$	$\uparrow +4\% \pm 0\%$	$\uparrow +4\% \pm 1\%$

L'analyse des écarts relatifs des indicateurs de texture met en évidence des tendances claires d'évolution de l'état de surface en fonction des combinaisons de sollicitations appliquées.

— Une baisse quasi-systématique de la PMP, traduisant une usure de la macrotexture des surfaces, avec des évolutions plus ou moins importantes et pouvant atteindre -6 % dans le cas de la combinaison S+H+T.

— Une diminution quasi-systématique des indicateurs d'amplitude S_a et S_q, traduisant une atténuation de la rugosité de surface, avec des baisses pouvant atteindre -4 % dans le cas de la combinaison triple S+H+T.

— L'indicateur d'asymétrie S_{sk} présente des évolutions plus contrastées, traduisant les modifications de la répartition des hauteurs de pic et de creux.

— L'indicateur d'aplatissement S_{ku} montre également des évolutions contrastées, avec des hausses ou des chutes importantes (+11 % et -9 %), ce qui reflète un changement profond de la distribution statistique des hauteurs.

Les évolutions des indicateurs de texture évalués dans ce travail montrent que les sollicitations appliquées sur les éprouvettes ne se cumulent pas.

Les interactions entre sollicitations peuvent en effet conduire à des réponses antagonistes ou synergiques. La combinaison S+H+T ressort comme la plus dégradante pour la macrotexture. À l'inverse, les cycles estivaux (hautes températures) induisent des évolutions particulières des indicateurs de texture, parfois inverses aux autres sollicitations, probablement liées à un déplacement du liant bitumineux en surface. Ce phénomène a déjà été mis en évidence lors de l'analyse des résultats du microscope confocal (cf. Remarque 26). L'analyse simultanée des variations de la macrotexture et de la microtexture permet ainsi de relier les effets des facteurs environnementaux sur les surfaces à deux échelles complémentaires. La macrotexture est globalement usée, traduisant une homogénéisation progressive des surfaces, ce que confirment les diminutions de S_a et S_q ainsi que la réduction de la profondeur des creux (hausse de S_{sk}). Toutefois, les variations de S_{ku} nuancent ces tendances en révélant des distributions de hauteurs plus complexes. Les écarts-types associés aux variations des indicateurs restent très faibles (souvent inférieurs à 2 %), traduisant une homogénéité de comportement entre des éprouvettes soumises aux mêmes sollicitations. Cette faible dispersion renforce la robustesse des tendances dégagées malgré le nombre restreint de zones analysées.

Les caractérisations réalisées à l'aide du scanner laser permettent de mettre en évidence des variations significatives de la microtexture et la macrotexture des surfaces sous l'effet des sollicitations représentatives de trois années de mise en circulation sur le réseau ATMB. Néanmoins, cette analyse s'appuie sur un nombre restreint d'éprouvettes, étudiées de façon localisée, ce qui peut introduire des limites dans la représentativité des résultats.

2.6.3 Caractérisation - Machine Wehner et Schulze

Les coefficients de frottement μ_{WS} mesurés par la machine Wehner et Schulze aux états initial et final sont présentés dans le tableau 2.19.

Le coefficient de frottement moyen à l'état initial est égal à 0,438 avec un écart-type de 0,013, après la phase de décapage (cf. section 2.2.2). Les évolutions des coefficients de frottement entre les deux états restent relativement limitées, avec une moyenne de -2 % (écart-type de 4 %). La diminution la plus marquée atteint -6 % pour les éprouvettes 10 et 04, tandis qu'à l'inverse, deux éprouvettes (12 et 14) présentent une hausse de +6 %.

TABLEAU 2.19 – Valeurs de coefficients de frottement μ_{WS} des éprouvettes mesurées par la machine Wehner et Schulze aux deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur moyenne μ_{WS} (-)**		**Écart relatif** $\Delta\mu_{WS}$ (%)
		État initial	État final	
T	01	0,435	0,419	↓ −4%
T	02	0,462	0,437	↓ −5%
T	03	0,445	0,421	↓ −5%
S+T	04	0,446	0,419	↓ −6%
H+T	05	0,450	0,443	↓ −2%
H+T	06	0,444	0,429	↓ −3%
E+T	07	0,427	0,426	↓ 0%
E+T	08	0,448	0,424	↓ −5%
S+H+T	09	0,422	0,416	↓ −1%
S+H+T	10	0,440	0,412	↓ −6%
S+E+T	11	0,422	0,424	↑ 0%
S+E+T	12	0,417	0,441	↑ 6%
H+E+T	13	0,424	0,424	→ 0%
H+E+T	14	0,440	0,467	↑ 6%
S+H+E+T	15	0,451	0,440	↓ −2%
S+H+E+T	16	0,432	0,416	↓ −4%

Remarque 27 : Les évolutions sont en dehors de la plage de répétabilité [7] de l'appareil pour 7 éprouvettes sur 16, ce qui correspond à 44 % des essais. Les variations observées suggèrent que, pour près de la moitié des éprouvettes, elles dépassent l'incertitude de mesure et traduisent un effet réel des sollicitations. Pour l'autre moitié des éprouvettes, les évolutions observées sont inférieures à la répétabilité de l'appareil, ce qui ne permet pas de les considérer comme significatives.

Les écarts relatifs des coefficients de frottement entre les deux états de la campagne en laboratoire sont moyennés pour les éprouvettes sollicitées avec les mêmes facteurs environnementaux (cf. tableau 2.20). Deux combinaisons de sollicitations sont à l'origine d'une augmentation de coefficient de frottement. Il s'agit des combinaisons S+E+T et H+E+T. Cependant, pour ces combinaisons de sollicitations, les différences de comportements des éprouvettes sont les plus importantes (±3 %). Le reste des combinaisons est à l'origine d'une diminution du coefficient de frottement des éprouvettes. Les combinaisons de sollicitations qui semblent les plus dégradantes sont le trafic seul et la saumure associée au trafic. Les éprouvettes soumises uniquement au trafic présentent une diminution de l'ordre de -5 %.

7. Pour rappel, la répétabilité est de la machine Wehner et Schulze est égale à 0,024 après 90000 cycles de polissage sur une formule de type BBSG [32].

Ces évolutions similaires traduisent l'effet abrasif du trafic sur la texture des éprouvettes. Les combinaisons doubles admettent différents niveaux de dégradations de coefficient de frottement : nul à très faible pour E+T (0 % à -5 %), modéré dans le cas de H+T (-2 % à -3 %) et plus marqué pour S+T (-6 %). Les combinaisons triples révèlent également une diversité d'évolutions des μ_{WS} avec, dans certains cas, des augmentations après sollicitation (jusqu'à +6 % pour S+E+T et H+E+T).

TABLEAU 2.20 – Écarts relatifs moyens, en %, de μ_{WS}, mesurées à l'aide de la machine Wehner et Schulze pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Écarts relatifs $\Delta\mu_{WS}$ (%)**	
	Moyenne	**Écart-type**
T	$\downarrow -5\%$	$\pm 1\%$
S+T	$\downarrow -6\%$	*(1 éprouv.)*
H+T	$\downarrow -2\%$	$\pm 1\%$
E+T	$\downarrow -3\%$	$\pm 3\%$
S+H+T	$\downarrow -4\%$	$\pm 2\%$
S+E+T	$\uparrow +3\%$	$\pm 3\%$
H+E+T	$\uparrow +3\%$	$\pm 3\%$
S+H+E+T	$\downarrow -3\%$	$\pm 1\%$

Les augmentations de coefficient de frottement peuvent indiquer un effet de nettoyage ou de régénération de la microtexture par le biais des sollicitations combinées. La figure 2.16 illustre ces variations de hauteur observées sur le profil d'une surface reproduite par le scanner laser.

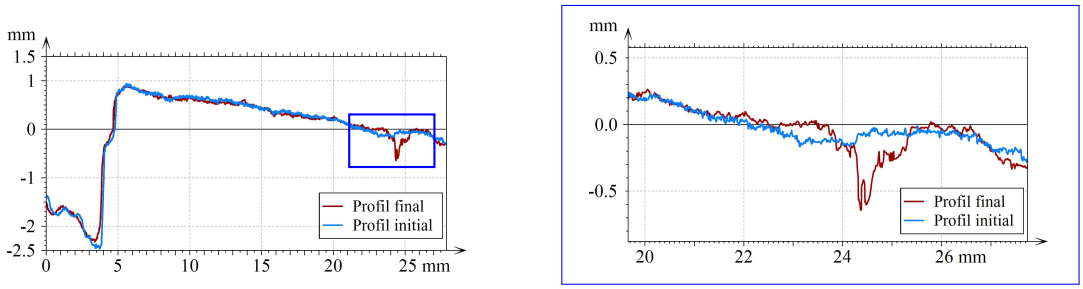


FIGURE 2.16 – Profil complet d'une surface scannée au laser de l'éprouvette 11 (gauche) avec zone de zoom (cadre rouge) et détail agrandi de cette zone (droite, encadré en bleu).

La combinaison complète des sollicitations indique une baisse du μ_{WS} moins importante que les baisses constatées après l'application unique du trafic.

Ces résultats ne suivent pas la logique attendue selon laquelle l'accumulation de sollicitations doit entraîner une dégradation plus marquée. Cela suggère un effet de régénération de la microtexture, entraînant une augmentation de la rugosité et, par conséquent, du frottement.

L'application des sollicitations simulant trois années de service sur le réseau ATMB n'entraîne pas de variations significatives des coefficients de frottement $\mu_{\mathbf{WS}}$ des éprouvettes mesurés avec la machine Wehner et Schulze. Les comportements observés restent contrastés selon les éprouvettes et les combinaisons de facteurs environnementaux appliquées.

2.6.4 Caractérisation - Banc LUG

Le banc LUG fournit de nombreux indicateurs, mesurés pour l'ensemble des conditions d'essai de cette campagne. **Lors de la présentation des résultats, les conditions d'essais sont distinguées par leur taux de glissement : 0%, 14 % ou 33 %.**

• **Coefficient de frottement $\mu_{\mathbf{LUG}}$**

Le calcul du coefficient de frottement μ_{LUG} mesuré par le banc LUG est basé sur la moyenne des rapports entre la force normale F_z et la force longitudinale F_x à chaque instant de l'essai. Ces valeurs sont répertoriées dans les tableaux 2.21, 2.22 et 2.23.

À 0 % de glissement, les coefficients de frottement initiaux des éprouvettes se situent entre 0,071 et 0,189. Après l'application des sollicitations, la majorité d'entre elles présentent une diminution de μ_{LUG} comprise entre -9 % et -62 %, tandis que quatre éprouvettes sur seize enregistrent au contraire une augmentation, allant de +4 % à +33 %.

À 14 % de glissement, l'application des sollicitations entraîne une baisse quasi systématique du μ_{LUG}, avec des réductions allant de -1 % à -93 %. Seules les éprouvettes 05 et 10 dérogent à cette tendance, avec des augmentations respectives de +9 % et +6 %.

À 33 % de glissement, les coefficients initiaux s'inscrivent entre 0,793 et 1,660. Là encore, les sollicitations appliquées en surface entraînent majoritairement une diminution de μ_{LUG}. Les baisses s'étalent entre -4 % et -74 %, tandis que certaines éprouvettes (01, 09, 12 et 16) enregistrent des hausses comprises entre +2 % et +25 %.

TABLEAU 2.21 – Valeurs de coefficients de frottement μ_{LUG}, sans unité, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 0 % de glissement aux deux états : initial et final.

0 % glissement				
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur moyenne μ_{LUG} (-)**		**Écart relatif $\Delta\mu_{\text{LUG}}$ (%)**
		État initial	**État final**	
T	01	0,079	0,072	$\downarrow -9\%$
T	02	0,083	0,109	$\uparrow +31\%$
T	03	0,079	0,092	$\uparrow +16\%$
S+T	04	0,096	0,082	$\downarrow -15\%$
H+T	05	0,155	0,102	$\downarrow -34\%$
H+T	06	0,094	0,086	$\downarrow -9\%$
E+T	07	0,126	0,076	$\downarrow -40\%$
E+T	08	0,093	0,066	$\downarrow -30\%$
S+H+T	09	0,141	0,075	$\downarrow -47\%$
S+H+T	10	0,147	0,087	$\downarrow -41\%$
S+E+T	11	0,107	0,087	$\downarrow -19\%$
S+E+T	12	0,094	0,055	$\downarrow -41\%$
H+E+T	13	0,126	0,070	$\downarrow -45\%$
H+E+T	14	0,189	0,072	$\downarrow -62\%$
S+H+E+T	15	0,093	0,096	$\uparrow +4\%$
S+H+E+T	16	0,071	0,094	$\uparrow +33\%$

TABLEAU 2.22 – Valeurs de coefficients de frottement μ_{LUG}, sans unité, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 14 % de glissement aux deux états : initial et final.

14 % glissement				
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur moyenne μ_{LUG} (-)**		**Écart relatif $\Delta\mu_{\text{LUG}}$ (%)**
		État initial	**État final**	
T	01	1,101	0,805	$\downarrow -27\%$
T	02	0,894	0,886	$\downarrow -1\%$
T	03	1,324	1,207	$\downarrow -9\%$
S+T	04	0,938	0,068	$\downarrow -93\%$
H+T	05	0,771	0,771	$\rightarrow 0\%$
H+T	06	0,941	1,024	$\uparrow +9\%$
E+T	07	1,066	1,043	$\downarrow -2\%$
E+T	08	0,940	0,625	$\downarrow -34\%$
S+H+T	09	0,914	0,678	$\downarrow -26\%$
S+H+T	10	0,789	0,840	$\uparrow +6\%$
S+E+T	11	0,942	0,765	$\downarrow -19\%$
S+E+T	12	1,117	0,607	$\downarrow -46\%$
H+E+T	13	1,227	0,852	$\downarrow -31\%$
H+E+T	14	1,046	0,681	$\downarrow -35\%$
S+H+E+T	15	1,439	0,812	$\downarrow -44\%$
S+H+E+T	16	0,866	0,837	$\downarrow -3\%$

TABLEAU 2.23 – Valeurs de coefficients de frottement μ_{LUG}, sans unité, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 33 % de glissement aux deux états : initial et final.

33 % glissement				
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur moyenne μ_{LUG} (-)**		**Écart relatif $\Delta\mu_{\mathrm{LUG}}$ (%)**
		État initial	**État final**	
T	01	0,898	1,037	$\uparrow +15\%$
T	02	1,275	1,042	$\downarrow -18\%$
T	03	1,253	1,125	$\downarrow -10\%$
S+T	04	1,151	0,300	$\downarrow -74\%$
H+T	05	0,974	0,914	$\downarrow -6\%$
H+T	06	0,843	0,611	$\downarrow -28\%$
E+T	07	0,916	0,792	$\downarrow -14\%$
E+T	08	0,808	0,777	$\downarrow -4\%$
S+H+T	09	0,888	0,909	$\uparrow +2\%$
S+H+T	10	0,925	0,652	$\downarrow -29\%$
S+E+T	11	0,878	0,829	$\downarrow -6\%$
S+E+T	12	0,957	1,064	$\uparrow +11\%$
H+E+T	13	1,660	0,991	$\downarrow -40\%$
H+E+T	14	1,176	0,769	$\downarrow -35\%$
S+H+E+T	15	0,859	0,633	$\downarrow -26\%$
S+H+E+T	16	0,793	0,988	$\uparrow +25\%$

Remarque 28 : Les coefficients de frottement obtenus pour les essais avec 14 % et 33 % de glissement sont en moyenne dix fois supérieurs à ceux obtenus à 0 % de glissement.

Remarque 29 : Des valeurs de frottement supérieures à 1 sont observées lors des conditions de contact avec glissement. Ces résultats peuvent être expliqués par un arrachement de gomme au niveau des pneumatiques de taille réduite, par une déformation inhabituelle de ces derniers ou encore par une rigidité inadaptée. En effet, les pneumatiques utilisés ne sont pas conçus comme des pneumatiques routiers classiques : l'absence de matériaux de renfort entraîne une rigidité plus faible, ce qui les rend davantage susceptibles de générer de telles variations.

Les écarts relatifs des coefficients de frottement entre les deux états de la campagne en laboratoire sont moyennés pour toutes les éprouvettes sollicitées avec les mêmes facteurs environnementaux (cf. tableau 2.24).

TABLEAU 2.24 – Écarts relatifs moyens, en %, de μ_{LUG}, mesurés à l'aide du banc LUG pour les trois essais et pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Écarts relatifs $\Delta\mu_{\mathbf{LUG}}$ (%)**		
	0 % de glissement	**14 % de glissement**	**33 % de glissement**
T	$\uparrow +13\% \pm 16\%$	$\downarrow -12\% \pm 11\%$	$\downarrow -4\% \pm 14\%$
S+T	$\downarrow -15\%$ *(1 éprouv.)*	$\downarrow -93\%$ *(1 éprouv.)*	$\downarrow -74\%$ *(1 éprouv.)*
H+T	$\downarrow -21\% \pm 13\%$	$\uparrow +4\% \pm 4\%$	$\downarrow -17\% \pm 11\%$
E+T	$\downarrow -35\% \pm 5\%$	$\downarrow -18\% \pm 16\%$	$\downarrow -9\% \pm 5\%$
S+H+T	$\downarrow -44\% \pm 3\%$	$\downarrow -10\% \pm 16\%$	$\downarrow -14\% \pm 16\%$
S+E+T	$\downarrow -30\% \pm 11\%$	$\downarrow -32\% \pm 13\%$	$\uparrow +3\% \pm 8\%$
H+E+T	$\downarrow -53\% \pm 9\%$	$\downarrow -33\% \pm 2\%$	$\downarrow -37\% \pm 3\%$
S+H+E+T	$\uparrow +18\% \pm 15\%$	$\downarrow -23\% \pm 20\%$	$\downarrow -1\% \pm 25\%$

L'analyse des résultats permet de dégager trois constats principaux :

1. **Tendance générale à la baisse de $\mu_{\mathbf{LUG}}$**
   La majorité des combinaisons de sollicitations entraînent une diminution du coefficient de frottement, quelle que soit la condition de contact retenue pour l'évaluation. Cette tendance est d'autant plus marquée en présence de facteurs environnementaux tels que la saumure ou le climat estival.

2. **Augmentations ponctuelles de $\mu_{\mathbf{LUG}}$ à 0 % de glissement**
   En l'absence de glissement, deux combinaisons de sollicitations (S+H+E+T et T) conduisent à une augmentation du coefficient de frottement. Cependant, les écarts de comportement de ces éprouvettes sont importants (jusqu'à +21 %), traduisant une réponse hétérogène des surfaces. Cette variabilité peut s'expliquer par des différences locales de texture ou de répartition du liant, qui influencent directement le contact pneumatique-éprouvette et donc la mesure du coefficient de frottement.

3. **Effet marqué de la saumure**
   La combinaison S+T, testée sur une seule éprouvette, provoque une variation très importante de μ_{LUG} notamment à 14 % et 33 % de glissement. Ce comportement peut s'expliquer par la formation d'un dépôt résiduel ponctuel de saumure à la surface, susceptible de combler partiellement les aspérités et de réduire la rugosité effective des granulats, comme illustré dans la figure 2.17. Ce phénomène compromet la qualité du contact établi entre la surface et le dispositif de mesure. Bien que les éprouvettes soient lavées avant les caractérisations, la persistance éventuelle de traces de saumure ne peut être totalement exclue et pourrait expliquer en partie ces résultats. Il se

peut également que l'immersion des éprouvettes dans la saumure puisse générer des contraintes internes dans les granulats. Avec l'action mécanique des cycles de polissage associés au trafic, cela peut conduire à des arrachements de particules de granulats donc à une baisse de coefficient de frottement.

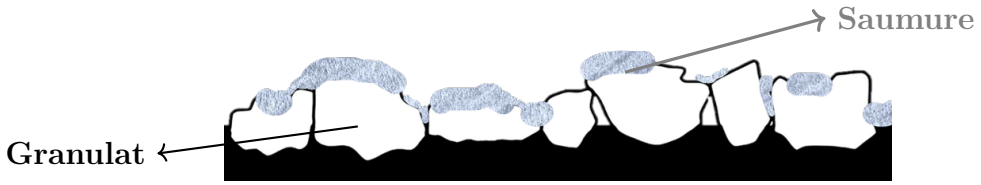


FIGURE 2.17 – Réduction de la rugosité de surface par un film de saumure.

• **Valeurs efficaces RMS des forces normales F_z et longitudinales F_x**
La valeur efficace, notée RMS, correspond à la valeur constante d'une force qui produirait un effet équivalent à celui de la force réelle qui varie au cours du temps. Dans ce travail, les valeurs efficaces des forces normales F_z et longitudinales F_x sont calculées à partir des signaux centrés, c'est-à-dire corrigés de leur valeur moyenne. L'explicitation de la méthode de calcul de ces indicateurs est donnée dans l'Annexe E. Les tableaux 2.25, 2.26 et 2.27 reportent les valeurs efficaces des F_z et F_x de chaque éprouvette pour les trois d'essais réalisés à l'aide du banc LUG. Pour plus de détails, les tableaux donnés dans l'Annexe F dressent les écarts relatifs des valeurs efficaces entre les deux états de la campagne en laboratoire.

À 0 % de glissement, globalement les valeurs RMS des forces normales F_z montrent une tendance contrastée entre les deux états. Plusieurs éprouvettes présentent une augmentation notable (01, 02, 05, 06, 07, 12, 16), avec des hausses allant jusqu'à un facteur 2 à 3 (éprouvettes 02, 06, 07, 16). À l'inverse, d'autres éprouvettes subissent une forte diminution des valeurs efficaces de F_z après sollicitations (éprouvettes 08, 09, 10, 13, 14), parfois supérieure à -70 % (cas de l'éprouvette 13). Pour les valeurs RMS des forces longitudinales F_x, la tendance est également hétérogène mais globalement orientée à la baisse. Plusieurs éprouvettes enregistrent une diminution marquée (04, 08, 09, 10, 11, 13, 14), certaines perdant plus de 70 % de leur valeur initiale (éprouvette 13). Néanmoins, quelques éprouvettes (01, 02, 03, 05, 06, 07, 16) montrent une augmentation de valeur efficace, avec des gains notables pour 02 (+102 %) et 06 (+145 %). Il est important de noter que les valeurs RMS des F_x sont, dans la plupart des cas, 10 fois plus petites que la valeur de la charge normale statique appliquée lors du contact pneumatique-éprouvette à l'aide du banc LUG (20 N).

Tableau 2.25 – Valeurs efficaces, en N, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 0 % de glissement aux deux états : initial et final.

0 % glissement					
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur efficace RMS (N)**			
		État initial	**État final**	**État initial**	**État final**
		F_z	F_z	F_x	F_x
T	01	2,857	4,725	0,248	0,396
T	02	2,765	5,987	0,244	0,493
T	03	8,373	8,953	0,622	0,764
S+T	04	3,597	2,827	0,314	0,242
H+T	05	2,779	4,210	0,292	0,414
H+T	06	2,546	8,565	0,283	0,694
E+T	07	3,186	7,072	0,337	0,459
E+T	08	4,772	3,381	0,531	0,269
S+H+T	09	6,010	3,907	0,598	0,293
S+H+T	10	3,843	2,864	0,385	0,280
S+E+T	11	4,211	4,758	0,532	0,428
S+E+T	12	3,674	5,316	0,375	0,342
H+E+T	13	13,275	3,398	1,291	0,269
H+E+T	14	7,398	2,809	0,831	0,279
S+H+E+T	15	3,231	2,512	0,348	0,365
S+H+E+T	16	3,531	6,891	0,316	0,492

Tableau 2.26 – Valeurs efficaces, en N, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 14 % de glissement aux deux états : initial et final.

14 % glissement					
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur efficace RMS (N)**			
		État initial	**État final**	**État initial**	**État final**
		F_z	F_z	F_x	F_x
T	01	4,055	5,641	1,232	1,047
T	02	3,736	7,847	1,091	1,244
T	03	8,695	6,518	5,888	4,797
S+T	04	4,167	4,344	1,511	0,491
H+T	05	4,765	4,742	2,092	0,700
H+T	06	2,991	7,098	1,041	3,366
E+T	07	4,829	7,416	1,571	4,517
E+T	08	7,236	4,710	2,042	0,594
S+H+T	09	7,600	4,259	2,366	0,586
S+H+T	10	4,964	2,924	1,557	0,560
S+E+T	11	6,172	5,055	1,944	0,662
S+E+T	12	5,561	6,050	1,780	0,634
H+E+T	13	11,301	3,549	5,957	0,644
H+E+T	14	8,454	3,538	2,773	0,560
S+H+E+T	15	4,222	3,021	3,167	0,619
S+H+E+T	16	4,533	9,225	2,241	2,506

À 14 % de glissement, les valeurs RMS des forces normales F_z montrent des comportements différenciés entre les deux états de la campagne en laboratoire. Plusieurs éprouvettes présentent une nette augmentation (02, 06, 07, 12, 16), avec des hausses parfois supérieures à un facteur 2. D'autres, en revanche, subissent une forte diminution après sollicitations, avec des pertes dépassant -65 % (éprouvettes 13 et 14). Pour la force longitudinale F_x, la tendance générale est à une forte diminution entre les deux états. Toutefois, quelques cas isolés révèlent une augmentation (02, 06, 07, 16).

À 33 % de glissement, les valeurs efficaces des forces normales et longitudinales sont dans l'ensemble du même ordre de grandeur que celles des essais à 14 % de glissement. Pour la force normale F_z, une augmentation marquée pour plusieurs éprouvettes (02, 06, 07, 16) est observée, avec des hausses allant de +80 % à +165 % (éprouvette 06 et 07). À l'inverse, de nombreuses éprouvettes présentent une forte baisse, certaines perdant plus de 55 % de leur valeur initiale (éprouvettes 13 et 14). D'autres cas restent relativement stables (01, 03, 04, 05). Concernant la force longitudinale F_x, la tendance est très majoritairement à la baisse. Quelques cas isolés affichent une évolution positive (éprouvettes 05, 12 et 16).

TABLEAU 2.27 – Valeurs efficaces, en N, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 33 % de glissement aux deux états : initial et final.

33 % glissement					
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Valeur efficace RMS (N)**			
		État initial	**État final**	**État initial**	**État final**
		F_z	F_z	F_x	F_x
T	01	4,665	4,569	1,310	0,947
T	02	3,477	7,406	1,258	1,137
T	03	7,648	7,304	3,176	2,749
S+T	04	4,632	4,454	1,693	0,771
H+T	05	4,244	4,170	1,562	1,660
H+T	06	3,323	8,825	1,026	0,994
E+T	07	4,606	8,305	1,522	0,988
E+T	08	7,583	4,153	2,082	0,600
S+H+T	09	7,216	3,228	2,037	0,603
S+H+T	10	4,586	3,754	1,362	0,569
S+E+T	11	6,162	4,587	1,850	0,852
S+E+T	12	5,204	4,412	1,716	2,122
H+E+T	13	7,880	3,103	8,627	0,739
H+E+T	14	7,645	3,219	2,999	0,638
S+H+E+T	15	4,695	3,455	1,980	0,611
S+H+E+T	16	6,874	8,471	2,639	4,338

L'analyse des valeurs RMS montre qu'à 0 % de glissement, l'augmentation des fluctuations normales accompagnée de la baisse des fluctuations longitudinales traduit une évolution des micro-contacts. La répartition des charges devient plus hétérogène (certaines aspérités se chargent, d'autres se déchargent), tandis que la contribution des mécanismes d'adhérence diminue sous l'effet du lissage de surface et de la perte d'aspérités. La stabilité du contact s'améliore, tandis que l'adhérence diminue. À 14 % et 33 % de glissement, les diminutions conjointes des valeurs RMS des F_z et F_x indiquent un contact globalement plus stable mais moins performant dans la transmission des efforts, conséquence de la simplification de la structure du contact et de l'affaiblissement des mécanismes d'adhésion et d'indentation.

• Densité spectrale de puissance DSP des forces normales F_z et longitudinales F_x

L'analyse fréquentielle des forces normales F_z et longitudinales F_x est réalisée à l'aide des densités spectrales de puissance DSP, qui permettent de caractériser la répartition de l'énergie des signaux en fonction de la fréquence. La méthode de calcul est détaillée dans l'Annexe E. Les figures suivantes (cf. figure 2.18) présentent des exemples de DSP des forces normales et longitudinales mesurées par le banc LUG lors des essais réalisés à 0 % de glissement. L'ensemble des densités spectrales de puissance des éprouvettes, pour les trois taux de glissement étudiés, est présenté dans l'Annexe G.

Les densités spectrales de puissance des forces normales et longitudinales présentent, quel que soit le glissement, une répartition similaire : un pic marqué en basses fréquences (environ 10 Hz) avec une fréquence de coupure autour de 50 Hz. Entre l'état initial et l'état final, les spectres varient selon les éprouvettes (hausse ou baisse d'amplitude, décalage fréquentiel), traduisant une évolution des mécanismes vibratoires du contact. Les aires sous les courbes sont représentatives des valeurs RMS mesurées précédemment. Le pic unique identifié dans les spectres peut être interprété comme la signature dynamique caractéristique du contact pneumatique-éprouvette. La fréquence de coupure, au-delà de laquelle les composantes rapides du signal deviennent négligeables, est cohérente avec la taille caractéristique des granulats de la formulation 0/10. Pour une vitesse de glissement de 0,47 m/s, une fréquence de 50 Hz correspond en effet à une longueur d'onde spatiale d'environ 9,4 mm. Les irrégularités de surface plus fines génèrent alors uniquement des composantes fréquentielles supérieures à 50 Hz, très peu représentées dans les signaux. Ainsi, seuls les granulats de taille comparable ou supérieure

à 9 mm contribuent de façon significative à la réponse dynamique observée.

Cette analyse permet de mettre en avant le fort impact de la macrotexture des éprouvettes dans leur réponse face au contact avec un pneumatique.

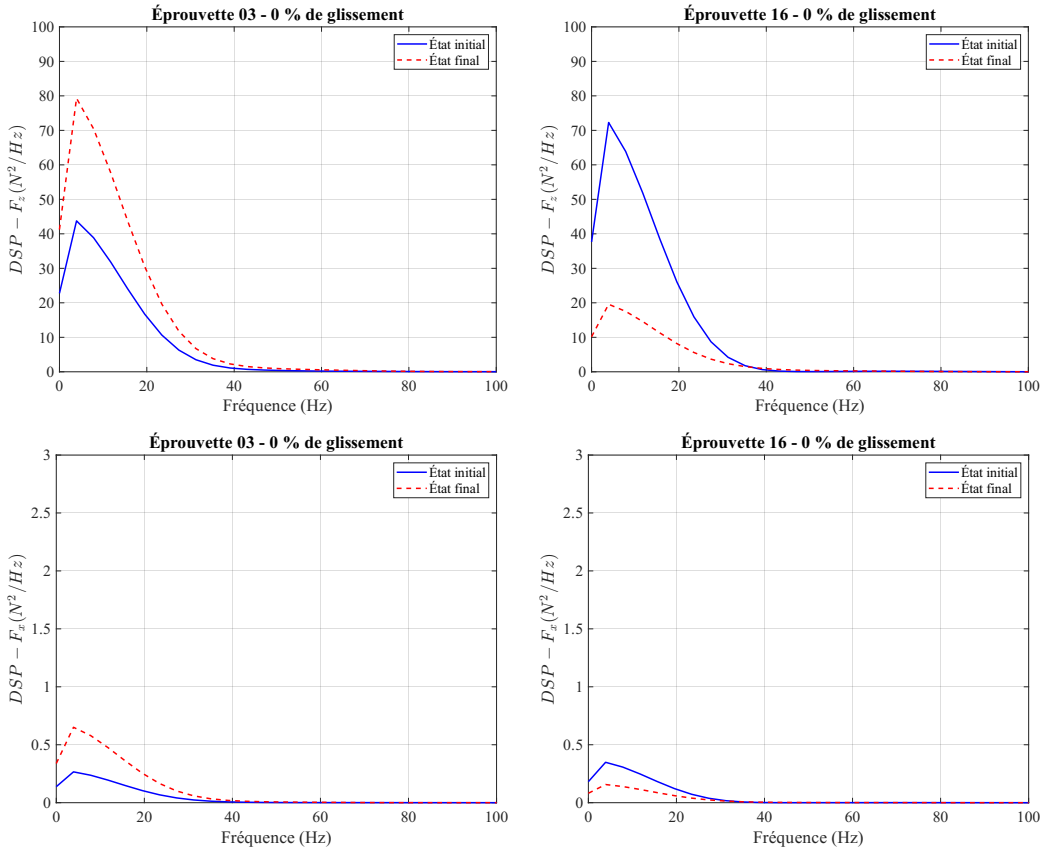


FIGURE 2.18 – Exemples de densité spectrale de puissance des forces normales et longitudinales, en N^2/Hz, pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG.

Remarque 30 : L'interprétation fréquentielle des résultats est validée par les caractéristiques dynamiques de l'hexapode de mesure du banc LUG. L'étude modale menée par Guibert *et al.* [118] met en évidence des fréquences propres supérieures à 120 Hz, bien au-delà de la bande passante effective estimée à 80 Hz en conditions expérimentales. Les fréquences relevées lors des essais étant inférieures à 50 Hz, il en découle que les composantes spectrales observées reflètent uniquement la dynamique du contact pneumatique-éprouvette, sans interférence notable du système de mesure.

• **Autocorrélation des forces normales F_z et longitudinales F_x**

La prise de mesure à une haute fréquence d'échantillonnage du banc LUG (1000 Hz) lors des essais permet de réaliser une étude d'autocorrélation des signaux des forces F_z et F_x. Cette étude permet de décrire comment la force est, à un instant donné, liée à elle-même, après un décalage temporel. La possible autocorrélation d'une force permet de déterminer la périodicité du contact et son évolution après l'application de sollicitations. L'explicitation de la méthode de calcul des valeurs d'autocorrélation est donnée dans l'Annexe E.

Les tableaux 2.28, 2.29, 2.30 récapitulent l'ensemble des longueurs de corrélation des forces normales et longitudinales pour les trois conditions d'essais de la campagne en laboratoire. Les écarts relatifs de ces indicateurs entre les deux états de la campagne en laboratoire sont indiqués dans les tableaux de l'Annexe H.

TABLEAU 2.28 – Longueurs d'autocorrélation des forces normales et longitudinales, en mm, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 0 % de glissement aux deux états : initial et final.

0 % glissement					
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Longueur d'autocorrélation (mm)**			
		Force normale F_z		**Force longitudinale F_x**	
		État initial	**État final**	**État initial**	**État final**
T	01	2,82	2,82	3,29	4,70
T	02	2,82	4,23	1,88	4,70
T	03	4,23	3,29	4,23	3,76
S+T	04	3,29	4,23	3,29	0,47
H+T	05	3,29	3,76	4,70	3,76
H+T	06	2,35	4,70	0,47	4,70
E+T	07	3,29	4,23	4,23	4,70
E+T	08	3,29	3,76	4,23	2,82
S+H+T	09	3,76	4,23	4,23	2,82
S+H+T	10	4,70	3,29	4,70	5,17
S+E+T	11	4,70	2,35	4,70	2,35
S+E+T	12	4,23	3,29	4,70	4,70
H+E+T	13	4,70	3,76	4,70	4,23
H+E+T	14	4,70	2,35	4,70	1,41
S+H+E+T	15	1,88	2,82	0,94	2,35
S+H+E+T	16	2,35	4,23	1,88	4,23

À 0 % de glissement,les longueurs d'autocorrélation des F_z évoluent à la hausse ou à la baisse selon les sollicitations : de +13 % à +100 % ou de -20 % à -50 %. De manière générale, l'autocorrélation des éprouvettes soumises aux mêmes sollicita-

tions évolue de façon similaire, à l'exception des éprouvettes 09 et 10 (S+H+T) et 01, 02 et 03 (T). En revanche, les longueurs d'autocorrélation des F_x présentent des variations plus dispersées (+10 % à +200 % et -10 % à -86 %), sans évolution cohérente entre les éprouvettes soumises aux mêmes sollicitations, ce qui traduit une réponse plus hétérogène de la texture longitudinale. La récurrence de certaines valeurs (ex. 4,70 mm) provient de la similarité des surfaces initiales et du seuil d'autocorrélation fixé à 10 %.

Tableau 2.29 – Longueurs d'autocorrélation des forces normales et longitudinales, en mm, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 14 % de glissement aux deux états : initial et final.

14 % glissement					
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Longueur d'autocorrélation (mm)**			
		Force normale F_z		**Force longitudinale F_x**	
		État initial	**État final**	**État initial**	**État final**
T	01	0,94	2,82	3,29	3,29
T	02	2,82	4,23	13,16	0,94
T	03	4,70	3,29	4,70	3,76
S+T	04	3,29	3,29	3,29	0,47
H+T	05	2,82	4,23	7,05	0,47
H+T	06	2,35	4,23	4,70	3,29
E+T	07	1,41	4,23	4,70	4,23
E+T	08	7,52	3,76	4,70	4,23
S+H+T	09	3,29	4,23	1,41	4,23
S+H+T	10	4,70	4,23	1,88	4,23
S+E+T	11	4,70	2,35	4,70	0,94
S+E+T	12	1,88	3,29	4,70	0,47
H+E+T	13	5,17	4,23	4,70	0,94
H+E+T	14	4,70	2,35	7,52	2,82
S+H+E+T	15	1,41	2,82	2,35	0,47
S+H+E+T	16	1,88	4,23	3,29	3,29

Dans le cas de l'essai à 14 % de glissement, les évolutions des longueurs d'autocorrélation restent différenciées selon le type de sollicitation étudié. Concernant les forces normales, les variations s'étendent de +29 % à +200 % et de -18 % à -50 %, sans tendance commune entre les éprouvettes soumises à une même combinaison de sollicitations. En revanche, pour les forces longitudinales, les évolutions sont globalement orientées à la baisse. Seules les éprouvettes 09 et 10 montrent une nette augmentation (+200 %), tandis que les éprouvettes 01 et 16 conservent une valeur stable.

TABLEAU 2.30 – Longueurs d'autocorrélation des forces normales et longitudinales, en mm, des éprouvettes mesurées par le banc LUG pour l'essai avec 33 % de glissement aux deux états : initial et final.

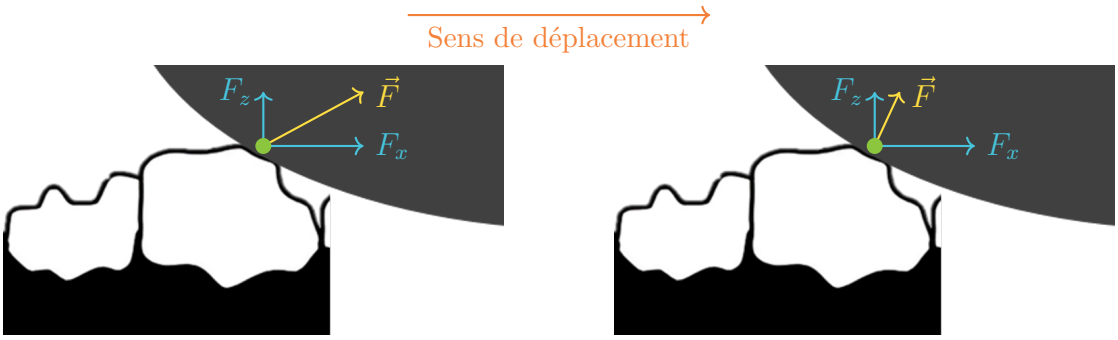
33 % glissement					
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Longueur d'autocorrélation (mm)**			
		Force normale F_z		**Force longitudinale F_x**	
		État initial	**État final**	**État initial**	**État final**
T	01	2,35	4,7	3,29	2,35
T	02	3,29	4,23	0,94	0,47
T	03	4,70	3,29	1,88	4,23
S+T	04	3,29	4,23	3,29	1,88
H+T	05	2,35	4,23	3,29	1,88
H+T	06	2,35	4,70	3,29	2,35
E+T	07	1,88	3,76	3,29	1,41
E+T	08	4,23	4,23	7,05	0,47
S+H+T	09	0,94	4,70	0,94	1,41
S+H+T	10	4,70	4,23	1,88	4,23
S+E+T	11	4,70	7,52	7,05	2,35
S+E+T	12	2,35	2,82	4,7	1,88
H+E+T	13	4,70	4,23	4,7	0,94
H+E+T	14	2,82	2,82	3,29	0,47
S+H+E+T	15	1,41	2,82	6,58	0,47
S+H+E+T	16	2,35	3,76	12,69	3,76

À 33 % de glissement, les évolutions restent contrastées selon la sollicitation. Pour F_z, elles sont globalement positives (+20 % à +100 %, mais parfois négatives jusqu'à -40 %) sans tendance commune entre éprouvettes. Tandis que pour F_x, elles sont majoritairement décroissantes (-29 % à -93 %).

Les analyses d'autocorrélation des forces normales et longitudinales permettent de caractériser la régularité spatiale du contact pneumatique-éprouvette selon le taux de glissement. Pour les forces F_z, une tendance générale à l'augmentation des longueurs d'autocorrélation est observée après sollicitations, quel que soit le glissement. Cette évolution traduit une homogénéisation progressive de la surface des éprouvettes, liée à la régularisation des textures par les sollicitations environnementales. À l'inverse, les forces F_x apparaissent très sensibles au glissement.

À glissement nul, les réponses sont dispersées, tandis qu'à des glissements plus élevés, les longueurs d'autocorrélation diminuent fortement, traduisant une dégradation progressive de la texture longitudinale. Certaines combinaisons de sollicitations (S+E+T) génèrent cependant des comportements spécifiques, parfois

en rupture avec cette tendance générale. De plus, une corrélation marquée entre F_z et F_x est observée à 0 % de glissement. Dans ce cas, le contact est gouverné par l'indentation : chaque granulat est sollicité ponctuellement, la force appliquée étant proportionnelle à la pente de pénétration du pneumatique. Les forces normales et longitudinales sont alors fortement liées par ce mécanisme d'appui local. À mesure que le glissement augmente, l'introduction d'une composante tangentielle vibratoire dans le contact tend à décorréler les deux réponses : les forces normales restent dominées par la compression verticale, tandis que les forces longitudinales deviennent de plus en plus influencées par les phénomènes de frottement et de dissipation [119, 120].



(a) Contact sans glissement (b) Contact avec glissement

FIGURE 2.19 – Représentation de l'évolution de la corrélation entre les forces normales et longitudinales selon le type de contact : (a) roulement pur, (b) roulement avec glissement.

- **Coordonnées des barycentres de contact**

Les mesures effectuées au banc LUG permettent de suivre en temps réel l'évolution de la position du barycentre du contact dans l'interface pneumatique-éprouvette, pour différentes conditions de mise en contact. Ce barycentre est défini comme le point de coordonnées $(x, y, 0)$ de la surface de contact où est appliquée la résultante des forces normales, longitudinales et transversales de manière à rendre le moment du torseur de contact nul (ou minimal). Autrement dit, le barycentre correspond à la position unique où la résultante et le moment du torseur du contact sont colinéaires, assurant une représentation équivalente du champ de pression et de contraintes tangentielles par une résultante unique.

Dans la suite, ce point est désigné par le terme de barycentre du contact et ses coordonnées (x, y) sont utilisées comme indicateur de suivi de l'évolution du contact. Cette approche reprend les travaux de [118], la méthodologie de calcul des coordonnées étant détaillée dans l'Annexe E.

La figure 2.20 illustre la zone de contact entre le pneumatique utilisé et une surface lors d'un contact statique au banc LUG. L'exemple de la zone de contact dans cette figure est obtenu à l'aide d'un film de mesure de pression Prescale (4 LW - Extreme Low Pressure, Fujifilm) [8] (cf. section 1.10.2).

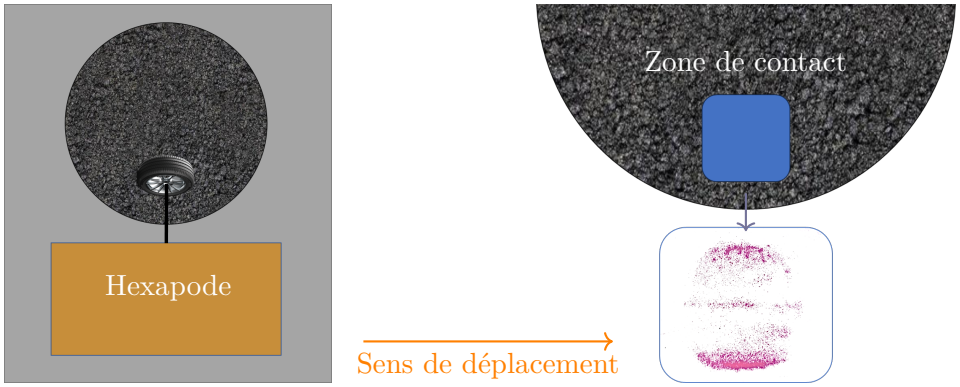


FIGURE 2.20 – Zone de contact au banc LUG : (a) schéma du montage expérimental montrant le pneumatique réduit monté sur l'hexapode, (b) définition de la zone de contact entre le pneumatique et l'éprouvette, mise en évidence par un film de pression Prescale.

Dans les graphiques représentant l'évolution temporelle des barycentres de contact, présentés dans la suite de ce rapport, les coordonnées sont exprimées relativement au centre de la zone de contact définie dans la configuration statique de référence. Le point $(0, 0)$ correspond ainsi au centre du contact pneumatique-éprouvette. L'axe horizontal sépare l'arrière (à gauche) et l'avant (à droite) du pneumatique dans la zone de contact, tandis que l'axe vertical oppose l'intérieur (en haut) à l'extérieur (en bas). La figure 2.21 ci-après permet d'illustrer ces propos.

8. Ce papier permet de visualiser les pressions de contact entre deux corps dans une plage de 0,05 à 0,2 MPa, avec une précision de ± 10 %.

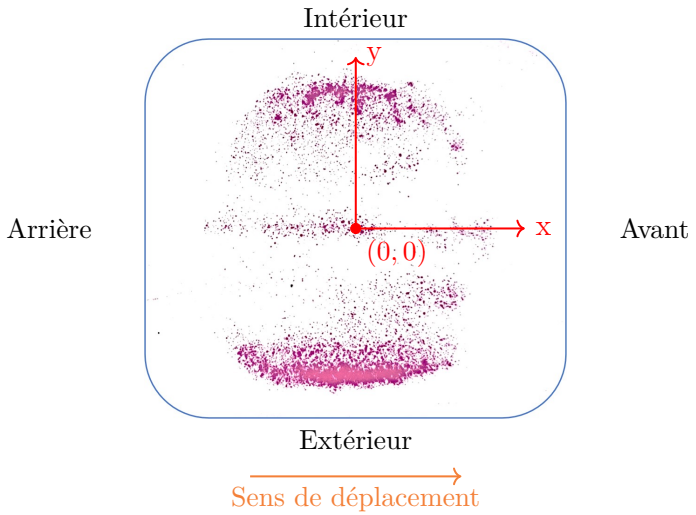


FIGURE 2.21 – Coordonnées définies sur la zone de contact pneumatique-éprouvette.

Remarque 31 : Comme illustré sur la figure ci-dessus, il est observé que la pression de contact n'est pas uniformément répartie, mais qu'elle se concentre en trois zones distinctes. Une zone centrale alignée avec l'axe longitudinal du pneumatique et deux zones alignée situées aux bords de l'empreinte. Cette distribution résulte des effets de bord induits par la géométrie en « tonneau » (courbure) du pneumatique soumis à une force normale. Bien que le pneumatique utilisé au banc LUG diffère d'un pneumatique routier classique (absence de sculptures, dimensions réduites) sa forme assure une déformabilité comparable et conduit à une répartition des pressions présentant les mêmes caractéristiques générales.

Dans les figures 2.22, 2.23 et 2.24, des exemples d'évolution temporelle des barycentres sont présentés. L'ensemble des résultats est disponible dans l'Annexe I.

Remarque 32 : Pour tous les essais, les positions des barycentres de contact se situent dans la partie intérieure avant de la zone de contact. Afin de mieux mettre en évidence les variations des positions des barycentres au cours du temps, l'échelle des graphiques est ajustée pour concentrer la représentation sur cette zone.

À 0 % de glissement, les positions des barycentres présentent une configuration comparable pour l'ensemble des éprouvettes de la campagne en laboratoire. Elles restent globalement alignées sur une même abscisse, dans la zone avant du pneumatique, tandis qu'une oscillation est observée en direction de l'intérieur.

L'amplitude de ces trajectoires dépend de l'éprouvette étudiée. Après l'application des facteurs environnementaux (état final), certaines éprouvettes présentent un léger déplacement longitudinal, orienté vers l'arrière du contact.

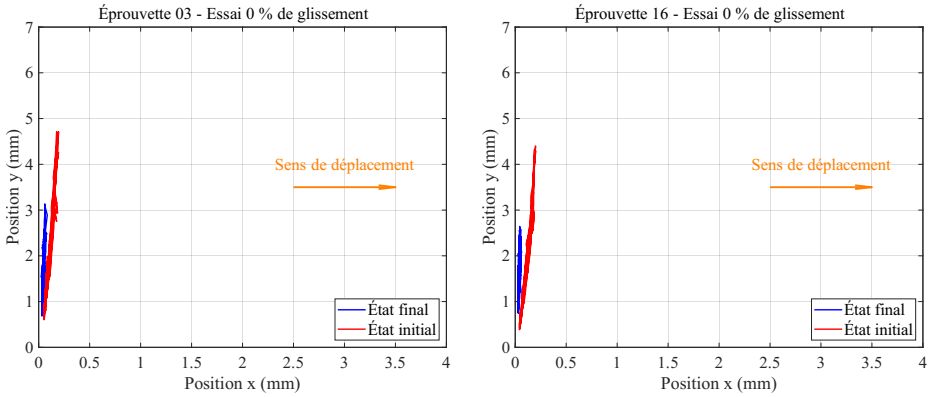


FIGURE 2.22 – Exemples des positions des barycentres des contacts pneumatique-éprouvette, en mm, pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG.

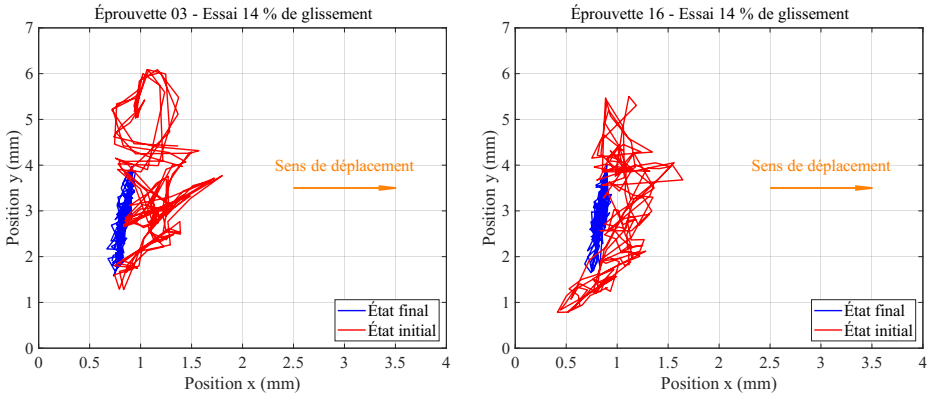


FIGURE 2.23 – Exemples des positions des barycentres des contacts pneumatique-éprouvette, en mm, pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG.

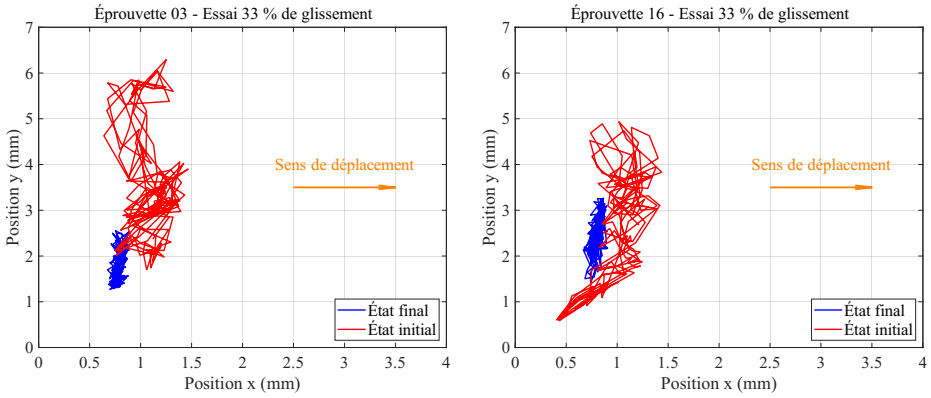


FIGURE 2.24 – Exemples des positions des barycentres des contacts pneumatique-éprouvette, en mm, pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG.

Les positions des barycentres calculées lors des essais à 14 % et 33 % de glissement présentent des configurations similaires pour l'ensemble des éprouvettes. Elles se situent toutes dans la partie supérieure et avant de la zone de contact. Comparées à celles issues des essais sans glissement, elles apparaissent plus avancées dans la direction longitudinale (1 mm en moyenne contre 0,2 mm). Après l'application des sollicitations, un léger déplacement vers l'arrière est systématiquement observé, parfois associé à un décalage supplémentaire vers l'intérieur de la zone de contact. À l'état final, les variations de coordonnées sont moins étendues : les trajectoires sont plus concentrées, voire quasi-alignées, traduisant une homogénéisation progressive de leur position.

Remarque 33 : Les positions des barycentres se déplacent vers l'avant de la zone de contact à mesure que le taux de glissement augmente. Ce phénomène est illustré dans la figure I.10 dans l'Annexe I.

Le tableau 2.31 présente les déplacements moyens des barycentres entre les deux états de la campagne en laboratoire selon les combinaisons de sollicitations.

TABLEAU 2.31 – Écarts relatifs moyens, en %, des positions des barycentres des contacts pneumatique-éprouvette mesurées à l'aide du banc LUG pour les trois essais et pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Taux de glissement (%)**					
	0 %		**14 %**		**33 %**	
	Δ position longitudinale x et transversale y (%)					
	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
T	$\uparrow +2\% \pm 4\%$	$\downarrow -9\% \pm 55\%$	$\uparrow +21\% \pm 8\%$	$\uparrow +90\% \pm 33\%$	$\uparrow +17\% \pm 15\%$	$\uparrow +63\% \pm 100\%$
S+T	$\uparrow +7\%$ *(1 éprouv.)*	$\uparrow +96\%$ *(1 éprouv.)*	$\uparrow +30\%$ *(1 éprouv.)*	$\uparrow +172\%$ *(1 éprouv.)*	$\uparrow +24\%$ *(1 éprouv.)*	$\uparrow +31\%$ *(1 éprouv.)*
H+T	$\uparrow +2\% \pm 1\%$	$\downarrow -6\% \pm 10\%$	$\uparrow +20\% \pm 0\%$	$\uparrow +20\% \pm 47\%$	$\uparrow +21\% \pm 7\%$	$\uparrow +21\% \pm 14\%$
E+T	$\rightarrow 0\% \pm 0\%$	$\downarrow -56\% \pm 28\%$	$\uparrow +22\% \pm 3\%$	$\downarrow -16\% \pm 81\%$	$\uparrow +25\% \pm 1\%$	$\uparrow +138\% \pm 26\%$
S+H+T	$\rightarrow 0\% \pm 0\%$	$\downarrow -1\% \pm 8\%$	$\uparrow +64\% \pm 24\%$	$\downarrow -148\% \pm 75\%$	$\uparrow +42\% \pm 27\%$	$\downarrow -47\% \pm 21\%$
S+E+T	$\uparrow +2\% \pm 3\%$	$\uparrow +46\% \pm 115\%$	$\uparrow +7\% \pm 8\%$	$\downarrow -63\% \pm 40\%$	$\uparrow +30\% \pm 19\%$	$\uparrow +80\% \pm 37\%$
H+E+T	$\downarrow -4\% \pm 3\%$	$\downarrow -106\% \pm 101\%$	$\uparrow +22\% \pm 28\%$	$\uparrow +9\% \pm 55\%$	$\downarrow -6\% \pm 7\%$	$\downarrow -111\% \pm 66\%$
S+H+E+T	$\uparrow +9\% \pm 3\%$	$\uparrow +108\% \pm 113\%$	$\uparrow +8\% \pm 8\%$	$\downarrow -14\% \pm 3\%$	$\uparrow +14\% \pm 6\%$	$\downarrow -12\% \pm 21\%$

Un écart positif correspond à un déplacement vers l'extérieur (transversal) ou vers l'arrière (longitudinal) du pneumatique. Les valeurs détaillées par éprouvette figurent en Annexe I (cf. tableau I.1). Ces résultats mettent en évidence des déplacements contrastés des barycentres entre l'état initial et l'état final. Les variations transversales (Δy) sont les plus marquées et traduisent un rapprochement progressif des barycentres vers le centre de la zone de contact. Cette tendance suggère une surface plus homogène à l'état final, avec des déplacements latéraux globalement réduits. À l'inverse, les déplacements longitudinaux (Δx) restent plus faibles en valeur absolue, mais apparaissent plus réguliers, avec une variabilité nettement moindre entre les éprouvettes soumises à une même combinaison de sollicitations. Parmi les différentes combinaisons de facteurs environnementaux, la combinaison S+H+T génère les plus grands déplacements longitudinaux lors des essais en condition de roulement/glissement.

La théorie de Carter, évoquée dans la section 1.10.1, peut être simulée de façon simplifiée en deux dimensions afin d'expliciter les évolutions des positions des barycentres des contacts. Dans le cadre de la modélisation du contact pneumatique-éprouvette de Carter [93], la zone de contact est idéalisée sous la forme d'un parallélépipède de dimensions $2a \times 2b$ (cf. figure 2.25).

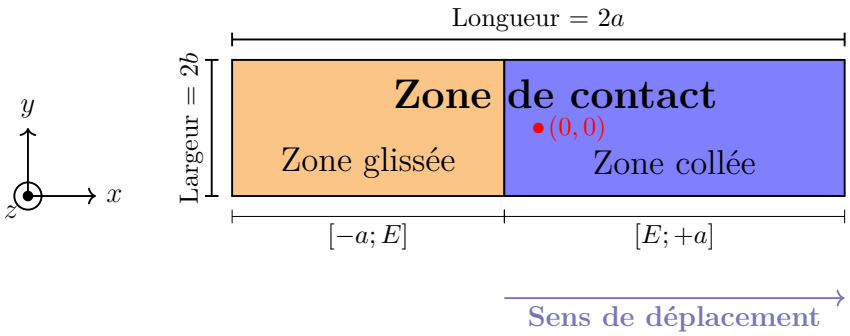


FIGURE 2.25 – Zone de contact pneumatique-chaussée définie par Carter.

Le sens de roulement du pneumatique se trouve dans le sens de la longueur x. Cette dernière est séparée en deux, avec une zone collée et une zone glissée. La zone collée du contact se trouve vers l'avant du pneumatique. Dans cette zone, seuls les efforts de la force normale F_z s'appliquent. Dans la zone glissée, qui se trouve à l'arrière du pneumatique et ayant une dimension variable en fonction du taux de glissement, les efforts de la force normale F_z et de la force longitudinale F_x s'appliquent.

La force normale F_z est ici représentée par une répartition Hertzienne exprimée par,

$$p(x) = p_0\sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}} \tag{2.2}$$

où p_0 est la pression normale (en N/m^2), r est la distance avec l'axe du contact (en m) et a est la demi-largeur du contact (en m).

La force longitudinale F_x suit une loi de Coulomb simple. Dans ce travail simplifié de simulation de l'évolution des barycentre de contact, les efforts de la force tangentielle F_y ne sont pas explicités. L'expression de la somme des efforts appliquée sur chacun des zones peut donc s'écrire :

$$\begin{cases} F_z = p(r) \quad \text{et} \quad F_x = 0 & \text{dans la zone collée,} \\ F_z = p(r) \quad \text{et} \quad F_x = \mu F_z & \text{dans la zone glissée.} \end{cases} \tag{2.3}$$

➢ Cas n°1 - Contact sans glissement

Le premier cas théorique correspond à un contact sans glissement entre un pneumatique et une surface. Sur une surface lisse, seuls les efforts normaux F_z s'exercent et la zone de contact est entièrement collée. Le barycentre de la répartition des pressions se situe alors au centre géométrique de la zone de contact, soit au point où $x = a$ et $y = b$. En présence de rugosités caractéristiques de la texture de chaussée, le barycentre de la zone de contact se décale soit vers l'avant soit vers l'arrière de la zone de contact. La figure 2.26 illustre un exemple de la différence de position du centre de contact. Le schéma de gauche correspond à une surface lisse, tandis que celui de droite représente une surface texturée comportant des aspérités [9].

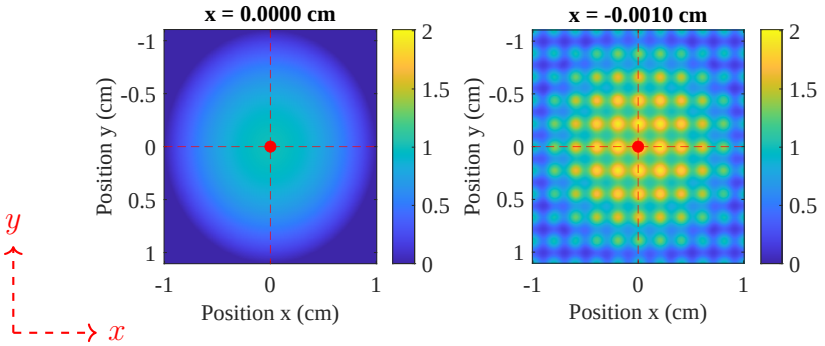


FIGURE 2.26 – Position des barycentres des contacts dans le cas d'un contact sans glissement sur une surface lisse (gauche) et une surface avec la présence d'aspérités (droite).

9. Ces aspérités sont définies par une amplitude, un rayon d'aplatissement et une fréquence de répartition sur les nœuds de la surface de contact.

Les résultats obtenus dans ce cas sont cohérents avec les observations réalisées lors de l'essai à 0 % de glissement sur le banc LUG. En effet, les barycentres mesurés se situent à proximité du centre de la zone de contact.

Remarque 34 : Une différence est notée concernant la position transversale y des barycentres des essais en laboratoire, qui tendent à se rapprocher de l'intérieur de la zone de contact. Cette évolution peut être liée à la configuration du banc LUG. Les éprouvettes sont mises en rotation autour d'un axe central et sollicitées par un pneumatique appliqué tangentiellement à ces dernières : cela peut induire un léger angle de dérive générant des forces transversales et décalant ainsi les barycentres vers l'intérieur.

Remarque 35 : Le modèle de Carter ne permet pas de déterminer si, sur une surface présentant des aspérités, le déplacement du barycentre se fait vers l'avant ou vers l'arrière de la zone de contact, ni d'évaluer l'influence de l'usure. Toutefois, les essais réalisés au banc LUG suggèrent que, sur une surface texturée, le barycentre des contacts tend à se déplacer vers l'avant, tandis que lorsque cette surface est usée, il se rapproche progressivement du centre de la zone de contact.

➢ **Cas n°2 - Contact avec glissement**

Le deuxième cas théorique correspond à un contact avec glissement entre un pneumatique et une surface. Dans cette configuration, les efforts normaux F_z s'exercent sur l'ensemble de la zone de contact, tandis que les efforts longitudinaux F_x apparaissent uniquement dans la partie arrière glissée. La position du barycentre évolue alors en fonction du taux de glissement G. Dans l'exemple (cf. figure 2.27), le barycentre du contact d'une surface lisse se situe au centre de la zone de contact à glissement nul. Lorsque G augmente jusqu'à 50 %, il se déplace vers l'avant, puis recule vers l'arrière pour des valeurs comprises entre 50 et 100 %. Dans le cas d'une surface texturée, les barycentres peuvent également se déplacer dans la zone de contact. Les résultats expérimentaux obtenus au banc LUG reproduisent ce comportement.

Remarque 36 : Dans cette configuration également, la théorie de Carter ne permet pas de préciser si le barycentre du contact se situe à l'avant ou à l'arrière du pneumatique. Elle fournit une répartition idéale des zones collées et glissées, mais ne garantit pas que ces approximations soient valides pour des surfaces réelles.

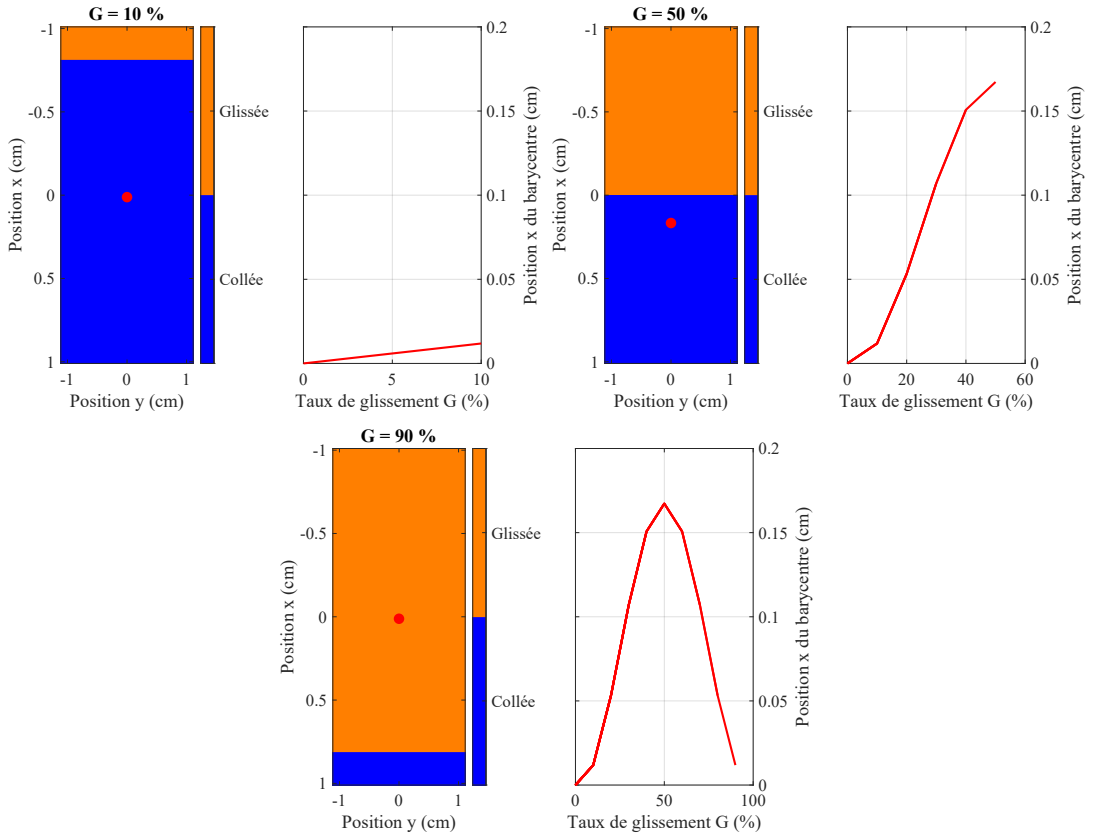


FIGURE 2.27 – Évolution de la position du barycentre des contacts lors d'un cas théorique de Carter en roulement avec glissement G allant de 0 % à 100 %.

Plus les irrégularités de surface sont marquées, plus le déplacement longitudinal du barycentre est important. Les résultats de la campagne en laboratoire montrent que sous l'effet des sollicitations, les éprouvettes tendent à devenir plus homogènes, ce qui favorise une répartition plus régulière des pressions de contact. Cette homogénéisation se traduit par un recul du barycentre vers l'arrière de la zone de contact. L'évolution des coordonnées du barycentre apparaît donc directement liée à la disposition et à l'organisation des granulats en surface.

Les essais réalisés au banc LUG permettent de calculer plusieurs indicateurs pertinents pour caractériser les phénomènes d'évolution de la texture au sein du contact pneumatique-chaussée. L'analyse met en évidence l'importance conjointe des échelles de texture (macro et micro), toutes les deux deux mobilisées dans le contact évalué par ce dispositif. Toutefois, les résultats obtenus restent liés aux conditions expérimentales propres au banc, ce qui peut limiter leur extrapolation directe à des situations de circulation réelle.

2.7 Conclusions et perspectives – Évolution de l'adhérence en fonction de facteurs environnementaux

L'objectif de ce Chapitre 2 est de caractériser l'impact de facteurs environnementaux simulés en laboratoire sur l'adhérence et l'état de surface de revêtements routiers. 16 éprouvettes sont soumises à des sollicitations représentatives de trois années de service sur le réseau ATMB et sont analysées par quatre appareils de caractérisation.

Les résultats de la campagne en laboratoire, obtenus grâce à une approche multi-échelles, multi-indicateurs et multi-appareils, montrent que l'évolution de la texture et de l'adhérence des éprouvettes n'est ni linéaire ni cumulative, mais dépend de la nature des sollicitations, de leurs combinaisons et de l'échelle d'observation. Le microscope confocal, centré sur la microtexture des granulats, révèle l'impact marqué du climat estival ; le scanner laser, appliqué à des surfaces, met en évidence une diminution généralisée de la texture sous des sollicitations thermiques et salines. De leur côté, les essais de frottement apportent des informations complémentaires : la machine Wehner et Schulze détecte peu de variations, tandis que le banc LUG révèle une baisse marquée de l'adhérence en cas de sollicitations combinées. Enfin, l'analyse fréquentielle et le suivi des barycentres soulignent une tendance à l'homogénéisation progressive des surfaces.

Pour conclure, ces résultats mettent en évidence un enseignement majeur pour la gestion de la durabilité des chaussées. Certains facteurs environnementaux, en particulier le climat estival et ses combinaisons avec d'autres sollicitations, peuvent modifier de façon significative l'adhérence. Une évaluation fiable de cette évolution nécessite une approche prenant en compte simultanément l'échelle de texture, la nature des sollicitations et l'interaction pneumatique-chaussée, afin de refléter au mieux les conditions réelles de service.

Chapitre 3

Campagne terrain – Impact des opérations de déneigement sur l'adhérence de revêtements routiers

Durant la période hivernale, il se produit des événements météorologiques conduisant à la dégradation de la viabilité des routes comme illustrés dans la figure 3.1. Chaque année, le réseau ATMB compte en moyenne 6 m de neige cumulée et plus de 100 jours de températures inférieures à 0°C [121, 122].



FIGURE 3.1 – Réseau ATMB en période hivernale © Arnaud Lesueur.

La situation géographique du réseau ATMB [1] nécessite de réaliser de nombreuses opérations de viabilité hivernale, de manière préventive ou curative, afin de garantir la sécurité du réseau. Sur les zones du réseau se situant à des altitudes plus élevées, connaissant les hivers les plus rudes, ce sont 150 opérations de raclage qui sont effectuées annuellement. Historiquement, les revêtements routiers du réseau ATMB ont une durée de vie d'au moins 12 ans : ce sont donc au minimum 1800 passages de chasse-neige qui sont opérés sur ces surfaces. En raison de sa localisation en altitude, le réseau requiert l'usage de lames de déneigement en acier (cf. section 1.5.4). **Dans le cadre de ce travail, une campagne terrain est réalisée afin d'étudier l'impact des opérations de déneigement sur l'adhérence de revêtements routiers**.

Remarque 37 : Ces opérations sont difficilement reproductibles en laboratoire : aucun appareil n'est capable de retranscrire l'action des lames de déneigement sur les surfaces de chaussées. La mise en œuvre de ce travail exigerait des ressources importantes, tant en temps qu'en moyens, et ne relève pas du périmètre de cette thèse. **La campagne expérimentale se déroule donc sur le terrain sur une section à taille réelle.**

3.1 Méthodologie de la campagne terrain

La campagne terrain consiste à appliquer des actions de raclages, effectuées à l'aide de lames de déneigement en acier, sur différentes planches d'enrobés bitumineux et à quantifier leur impact sur l'état de surface et le niveau d'adhérence de ces dernières. Le nombre de raclages effectués dans cette campagne est représentatif du nombre d'opérations se déroulant durant la durée de vie moyenne d'un revêtement sur le réseau ATMB. Les essais de cette campagne sont opérés durant la période hivernale, entre le mois de novembre et de mars. Deux échelles d'études sont considérées lors de cette campagne : à grande échelle directement sur le terrain et à l'échelle locale en laboratoire. Lors de l'étude à grande échelle, avant toute opération de raclage, l'état initial des planches d'enrobé bitumineux est caractérisé. L'état de surface ainsi que l'adhérence des revêtements sur le site expérimental sont évalués à partir de deux indicateurs : la profondeur moyenne de profil (PMP) et le coefficient de frottement longitudinal (CFL_G).

1. Le réseau ATMB est constitué de l'autoroute A40 et de la route nationale RN205 qui s'inscrivent dans les départements de l'Ain et la Haute-Savoie (cf. figure 1).

Deux appareils sont utilisés afin de mesurer ces indicateurs : le TM2 et le GripTester. La campagne terrain se déroule en deux phases qui sont répétées douze fois (cf. figure 3.2).

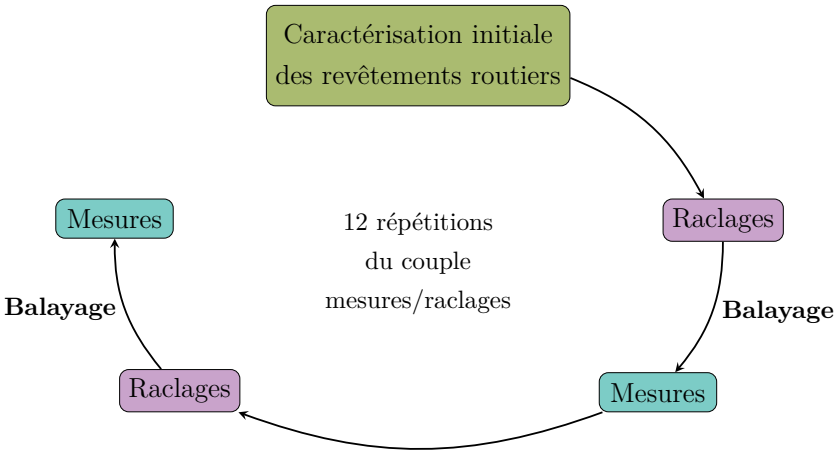


FIGURE 3.2 – Déroulement de la campagne terrain.

— **Phases de raclages**
  150 opérations de raclage sont appliquées sur la surface des revêtements testés. Ces opérations sont réalisées à l'aide d'une déneigeuse équipée d'une lame de déneigement en acier dans des conditions de vitesse et de charges représentatives des opérations de raclage standard.

— **Phases de mesures**
  Avant toute caractérisation, les planches d'enrobés bitumineux sont balayées et nettoyées. Ensuite, les mesures de l'état de surface et de l'adhérence des revêtements à grande échelle sont effectuées.

Des prélèvements, sont réalisés sur les planches d'essais à différents stades de la campagne terrain afin de permettre des études à l'échelle locale. Cela est détaillé dans la section 3.8.

Remarque 38 : Avant chaque phase de mesures, des opérations de balayage sont réalisées sur les planches de revêtements afin de limiter la présence de polluants (poussières, débris, résidus divers). Cette précaution vise à garantir que les variations observées des indicateurs d'adhérence et de texture sont liées aux seuls phénomènes étudiés et non à des éléments extérieurs susceptibles de perturber les résultats.

3.2 Site expérimental de la campagne terrain

3.2.1 Présentation du site expérimental

La campagne terrain se déroule sur une section du réseau ATMB (figure 3.3). Cette dernière est composée de quatre revêtements routiers de formulations différentes. **La section est longue de 340 m et n'est pas soumise au trafic.**

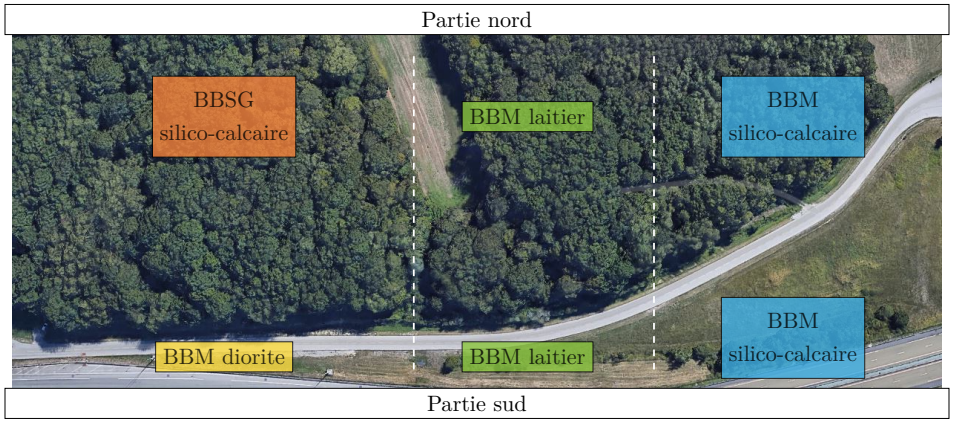


FIGURE 3.3 – Site expérimental et de sa composition.

Les enrobés bitumineux qui composent la section sont les suivants :

- Un enrobé bitumineux de type BBM composé de granulats de diorite, d'un bitume modifié (teneur 3,5 %) et de 30 % d'agrégats d'enrobé s'étendant sur 140 m sur un sens de circulation uniquement (partie sud) – **BBM diorite** ;
- Un enrobé bitumineux de type BBSG composé de granulats silico-calcaire, d'un bitume modifié (teneur 3,2 %) et de 40 % d'agrégats d'enrobé s'étendant sur 140 m sur un sens de circulation uniquement (partie nord) – **BBSG silico-calcaire** ;
- Un enrobé bitumineux de type BBM composé de granulats de laitier et d'un bitume modifié (teneur 5,3 %) s'étendant sur 90 m dans les deux sens de circulation – **BBM laitier** ;
- Un enrobé bitumineux de type BBM composé de granulats silico-calcaire et d'un bitume modifié (teneur 5,3 %) s'étendant sur 110 m dans les deux sens de circulation – **BBM silico-calcaire**.

Les enrobés bitumineux de ce site sont formulés avec le même bitume modifié par un copolymère thermoplastique de type Styrène-Butadiène-Styrène.

Remarque 39 : Lors de la mise en œuvre du BBSG silico-calcaire, des problèmes de non-conformité ont été relevés dû à un problème d'injection du filler menant à des faibles teneurs en particules fines dans le matériau. Cela constitue un point d'attention dans l'étude de l'évolution de cet enrobé face aux actions de raclages.

Les granulats de composition des revêtements en place ont des natures pétrographiques et des caractéristiques intrinsèques différentes. Ces granulats répondent aux spécifications des normes en vigueur [7, 10-12, 123]. Les résultats des granulats aux essais Los Angeles, Micro-Deval et Polished Stone Value sont donnés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 – Caractéristiques intrinsèques des granulats de composition des enrobés bitumineux du site expérimental.

Nature pétrographique	**Diorite**	**Laitier**	**Silico-calcaire**
Los Angeles (LA)	14	17	15
Micro-Deval (MDE)	9	8	12
Polished Stone Value (PSV)	56	60	51

Les résultats de l'essai PSV, permettant de mesurer la résistance au polissage des granulats, indiquent une meilleure résistance des granulats laitiers. Les valeurs des essais Los Angeles et Micro-Deval des trois natures de granulats sont proches. Ces essais permettent de déterminer la résistance à l'usure (par fragmentation ou abrasion) des gravillons. Les faibles différences de résultats de ces essais sont comprises dans la plage de répétabilité des essais (6 % pour l'essai Los Angeles et 3 % pour l'essai Micro-Deval). Les granulats répondent donc approximativement de la même manière face aux usures liées aux phénomènes de fragmentation et d'abrasion.

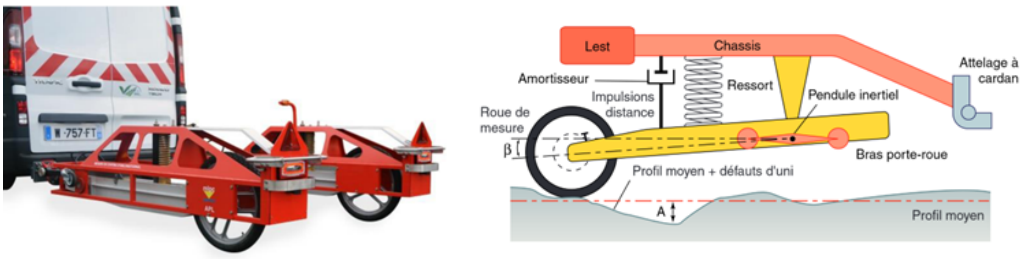
Ce site d'essais permet d'avoir une diversité dans le type de formulation (BBM ou BBSG), mais également dans les granulats de composition des formules (silico-calcaire, laitier, diorite). **Pour la campagne terrain, les revêtements étudiés sont situés dans la partie nord de la section, soit les revêtements : BBSG silico-calcaire, BBM laitier et BBM silico-calcaire.**

3.2.2 Caractérisations du site expérimental

Des études du site d'essais sont réalisées dans le but de déterminer l'homogénéité de chaque matériau sur sa zone d'application.

Étude de l'uniformité longitudinale

Le profil longitudinal d'une chaussée doit théoriquement suivre une ligne régulière. En pratique, des défauts de construction ou des dégradations génèrent des irrégularités géométriques regroupées sous le terme d'uniformité (uni) longitudinale [124]. Dans ce travail, l'uniformité longitudinal du site expérimental est mesurée en fin de campagne terrain à l'aide de l'APL (cf. figure 3.4a), qui enregistre en continu le profil en long et en déduit les caractéristiques d'uniformité.



(a) Appareil APL [125]. (b) Principe de la remorque APL [124].

FIGURE 3.4 – Appareil APL : (a) photographie, (b) principe de fonctionnement.

Son principe (cf. figure 3.4b) repose sur la mesure de l'angle β entre le bras porte-roue et le pendule inertiel, permettant de déduire l'amplitude A des défauts d'uniformité par rapport au profil moyen. Le découplage avec le véhicule tracteur est assuré par un attelage à cardan, tandis qu'un châssis lesté garantit le contact permanent de la roue de mesure avec la chaussée. Pour l'étude du site expérimental, l'appareil mesure l'uniformité longitudinale selon deux positions sur la voie : en bande de roulement droite et gauche. L'appareil passe à une vitesse de 54 km/h et le pas de mesure est égal à 5 cm. Le traitement des données de l'appareil APL est réalisé à l'aide du logiciel *APL2015 - Version 1.1* des entités IFSTTAR-CEREMA-VECTRA. L'exportation des résultats est donnée dans la figure 3.5.

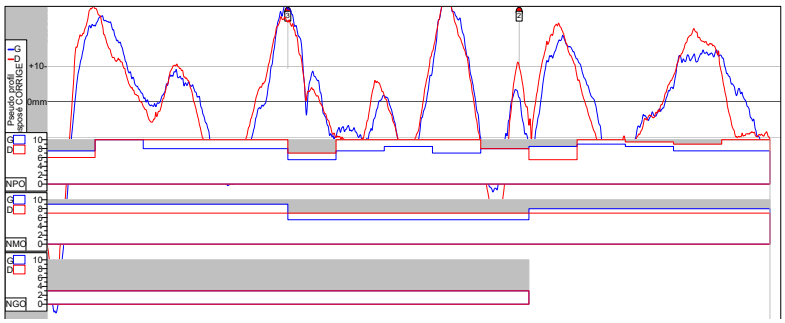


FIGURE 3.5 – Traitement des données de APL avec les relevés des profils longitudinaux en bande de roulement droite (rouge) et gauche (bleu).

Les mesures APL mettent en évidence des variations de profil longitudinal comprises entre +27 mm et -30 mm par rapport au profil moyen, la bande de roulement droite étant la plus irrégulière. L'analyse repose sur les indices NPO, NMO et NGO, définis selon les bandes de longueurs d'ondes du tableau 3.2.

Tableau 3.2 – Définition des bandes de longueurs d'ondes.

Désignation	**Terme abrégé**	**Longueurs d'ondes (m)**	**Longueur des segments de calcul (m)**
Petites ondes	PO	$0{,}707 < \lambda < 2{,}828$	20
Moyennes ondes	MO	$2{,}828 < \lambda < 11{,}312$	100
Grandes ondes	GO	$11{,}312 < \lambda < 45{,}248$	200

Comme les planches du site expérimental mesurent entre 90 et 140 m, seuls les indicateurs de petites (NPO) et moyennes ondes (NMO) sont pertinents. Les notes par bandes d'ondes, exprimées sur une échelle à 20 niveaux allant de 0 (uniformité très faible) à 10 (uniformité excellente), permettent d'apprécier la qualité longitudinale. Pour la section expérimentale, les notes des petites ondes sont toutes supérieures à 6, traduisant une bonne uniformité sur des segments de 20 m. En revanche, le seuil fixé à 7 pour qualifier une bonne uniformité aux moyennes ondes n'est pas atteint par le BBM laitier sur la bande de roulement gauche, indiquant une uniformité seulement moyenne. Pour les autres revêtements, l'uniformité longitudinale est jugée correcte.

Cette étude d'uniformité longitudinale montre que les sections du site expérimental ont généralement une bonne uniformité tout au long de la voie d'étude. Les planches sont donc homogènes dans le sens de leur longueur même si quelques variations d'uniformité existent et peuvent mener à des variations locales de surface.

Étude de l'uniformité transversale

L'uniformité transversale d'une chaussée, comme l'uniformité longitudinale, peut être altérée par la mise en œuvre ou divers facteurs. Elle est mesurée à la fin de la campagne terrain à l'aide du transverso-profilomètre à ultrasons TUS (figure 3.6), qui relève le profil en travers de la chaussée grâce à 13 capteurs espacés de 20 cm (largeur maximale 2,40 m). Les mesures, acquises tous les 3 m, fournissent à la fois les altitudes des points et des indicateurs de déformation transversale [126, 127].

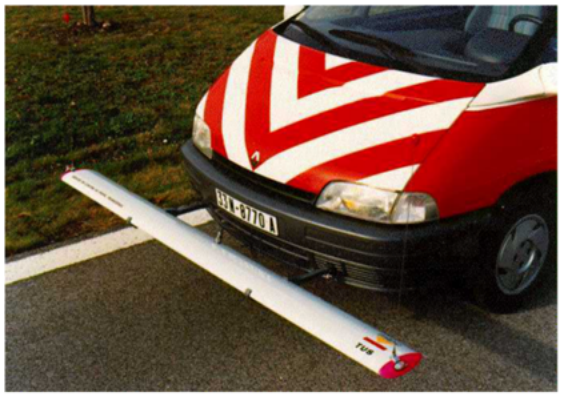


FIGURE 3.6 – Appareil TUS [128].

Le traitement des données de l'appareil TUS est réalisé de deux façons :

— à partir d'un indicateur d'ornièrage calculé par l'appareil, présenté ci-après,

— à partir d'un traitement des données brutes de hauteurs, explicité dans l'Annexe J.

L'ornièrage d'une chaussée est quantifié par l'indicateur Oc correspondant à la profondeur maximale des ornières mesurées de part et d'autre de la règle TUS. La figure 3.7 représente les valeurs d'ornièrage caractéristique du site expérimental.

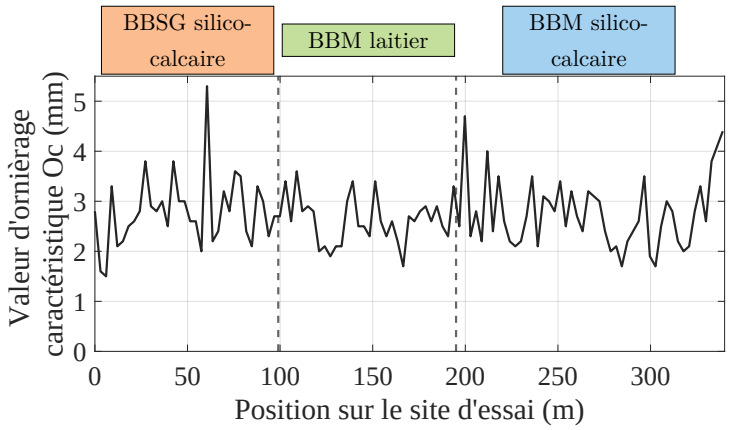


FIGURE 3.7 – Valeurs de l'ornièrage caractéristique Oc, exprimées en mm, sur toute la longueur du site expérimental calculées au pas de 3 m.

Les variations de l'indicateur mettent en évidence des écarts de l'ordre du millimètre le long du profil transversal des différentes planches d'enrobés bitumineux. Ces variations, bien que d'amplitude réduite, reflètent des hétérogénéités locales de compacité ou de régularité dans la mise en œuvre des couches. Elles révèlent ainsi la présence de singularités ponctuelles.

3.3 Dispositifs expérimentaux

Les dispositifs expérimentaux de la campagne terrain peuvent être séparés en trois catégories :

— le dispositif permettant d'effectuer **les opérations de raclage** : chasse-neige et lames de déneigement,

— les appareils permettant d'effectuer **les opérations de mesures lors des études à grande échelle** : TM2 et GripTester,

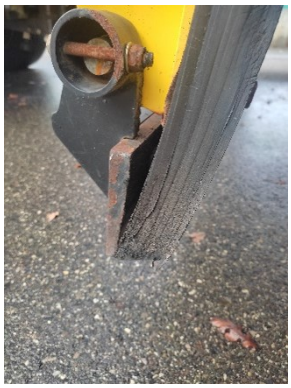
— les appareils permettant d'effectuer **les opérations de mesures lors des études à l'échelle locale** : machine Wehner et Schulze, scanner laser, TM2 et pendule SRT.

Dans le paragraphes suivant, seul le dispositif de raclage est explicité. Les appareils de mesure étant déjà évoqués dans les sections précédentes (cf. sections 1.4.1, 1.4.2, 1.4.4, 1.7.2, 1.7.3).

Le dispositif de raclage comporte un chasse-neige provenant d'un centre d'exploitation d'ATMB équipé de lames bi-raclages biaisées placées à l'avant du véhicule [68, 129]. L'appellation « bi-raclage » signifie que deux types de lames sont applicables à la chaussée : une lame en acier et l'autre en caoutchouc. Dans le cadre de cette campagne terrain, ce sont uniquement les lames composées d'acier qui sont appliquées en surface des chaussées. Les dimensions des lames de déneigement utilisées durant cette campagne terrain sont les suivantes : 1,2 m de hauteur, 3,29 m de largeur déneigée pour une largeur de 3,8 m pour un poids de 980 kg. Des photographies du dispositif de raclage sont données dans la figure 3.8.



(a)



(b)

FIGURE 3.8 – Vues : (a) du chasse-neige utilisé durant la campagne terrain, (b) d'une lame de déneigement bi-raclage.

Les lames sont apposées au sol par commande hydraulique. Ce mode permet à chaque lame appliquée de suivre le profil de la route, mais également de n'y appliquer que son poids, sans ajout d'autres charges. Le véhicule répond aux normes en vigueur correspondant aux engins de déneigement [67, 129]. Durant les opérations de raclage, la lame en acier est appliquée sur la demi-largeur de la voie d'études. Les vitesses de passage des lames, comprises entre 30 et 50 km/h, reflètent les conditions usuelles d'exploitation hivernale.

3.4 Protocoles des mesures – Étude à grande échelle

3.4.1 Localisation, répétition et ordre des mesures

La prise de mesures de paramètres d'adhérence est effectuée en deux positions pour l'étude à grande échelle. Elle est réalisée dans l'axe et dans la bande de roulement droite (BDRD) des planches. Une représentation schématique est donnée dans la figure 3.9. Le fait de mesurer l'état de surface des planches bitumineuses en deux positions permet d'évaluer les effets des opérations de raclage sur l'intégralité de la largeur des chaussées. Aussi, ces caractérisations permettent de déterminer si les surfaces des chaussées réagissent de manière homogène sur toute leur largeur face aux passages des lames, en tenant compte des éventuelles irrégularités susceptibles d'influencer localement l'action du raclage.

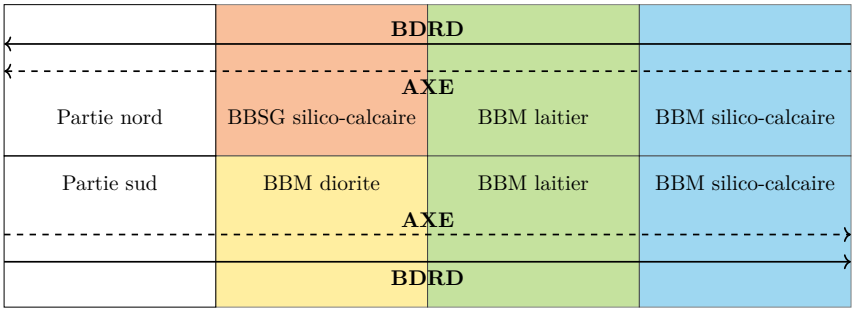


FIGURE 3.9 – Position des mesures en axe et en bande de roulement droite du site terrain.

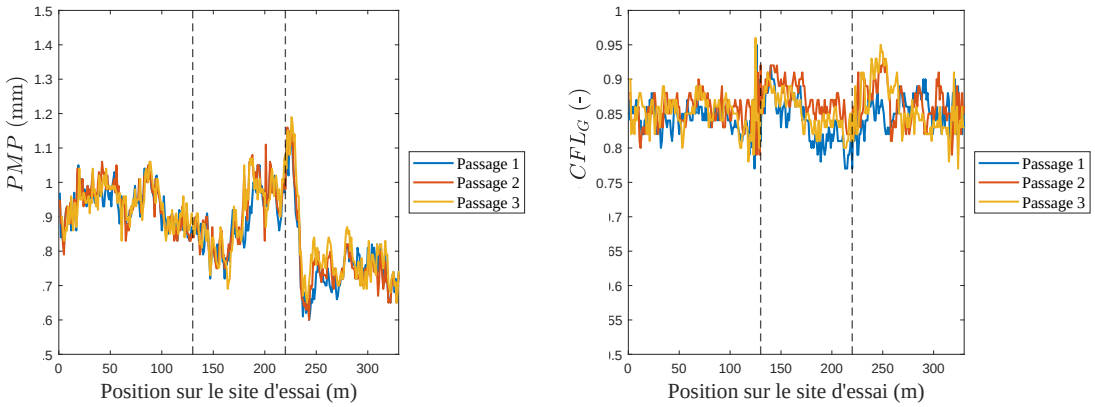
Afin de fiabiliser les mesures de caractérisation de l'état de surface des enrobés bitumineux de cette campagne terrain, les mesures sont répétées trois fois pour chaque trace. L'ordre d'utilisation des appareils de caractérisation de l'état de surface des couches de surface à une importance capitale.

Les appareils sont utilisés dans l'ordre suivant : TM2 puis GripTester. En effet, l'appareil TM2 nécessite un état de surface sec alors que les mesures effectuées par le GripTester s'opèrent sous un débit d'eau contrôlé. Un balayage des planches d'essais est réalisé en amont des mesures (cf. Remarque 38).

3.4.2 Répétabilité des appareils

- **Répétabilité - Appareil TM2**

Afin de convenir de la valeur de répétabilité de l'appareil TM2 dans le cadre de la campagne terrain, l'écart entre les valeurs de profondeur moyenne de profil d'une même trace mesurée trois fois est évalué (figure 3.10a). Les valeurs de PMP mesurées montrent la même signature. Les variations de PMP entre les phases de mesures sont comprises entre 0 et 0,13 mm, avec un écart-type moyen d'environ 0,03 mm. **La répétabilité de l'appareil TM2 dans les conditions de cette campagne terrain est fixée à 3 %.**



(a) Profondeur moyenne de profil. (b) Coefficient de frottement longitudinal.

FIGURE 3.10 – Évolution des indicateurs mesurés en position axe dans la partie nord du site expérimental : (a) PMP, (b) CFL_G.

- **Répétabilité - Appareil GripTester**

Le même travail est effectué pour les mesures du GripTester (figure 3.10b). Les variations de coefficient de frottement longitudinal entre les phases de mesures sont comprises entre 0 et 0,08. L'écart-type moyen des valeurs de CFL_G pour les trois phases de mesures est égal à 0,02 mm. **La répétabilité de l'appareil GripTester dans les conditions de cette campagne terrain est fixée à 2%.**

3.5 Traitement des données – Étude à grande échelle

Les mesures à l'aide du TM2 et du GripTester sont effectuées de façon continue sur le site expérimental. Il est nécessaire de séparer les différentes planches de revêtements afin de les traiter séparément. Pour supprimer toute erreur d'appréciation liée aux transitions entre les différentes planches de chaussées (joints), les mesures au début et à la fin de chaque planche sont rognées sur une distance de 10 m.

3.5.1 Méthode de correction des données du GripTester

L'évolution de l'adhérence résulte à la fois des effets du raclage et de conditions de mesure (état de surface, position des appareils, météorologie). Pour isoler l'effet du raclage, les coefficients de frottement longitudinal sont corrigés par un facteur spécifique à chaque session et à chaque revêtement.

Dans cette campagne terrain, un seul sens de circulation est soumis au raclage. L'autre sens sert de sens témoin, car il est uniquement exposé aux conditions environnementales. Pour chaque revêtement, la correction est déterminée à partir de la comparaison des valeurs d'adhérence de la planche témoin entre l'état initial et la phase de mesure t (figure 3.11).

Partie nord	BBSG silico-calcaire	BBM laitier	BBM silico-calcaire
Partie sud	Planche témoin 1	Planche témoin 2	Planche témoin 3

FIGURE 3.11 – Site expérimental et planches témoins.

- **Détermination des coefficients de correction**

Pour chaque phase de mesure, une correction est appliquée aux données de $\mathrm{CFL_G}$ des revêtements raclés. Les coefficients de correction $\beta(t)$ relatifs à chaque phase de mesure sont calculés à partir de la formule 3.1,

$$\beta(t) = \frac{\overline{\mathrm{CFL_G}(0)}}{\overline{\mathrm{CFL_G}(t)}} \tag{3.1}$$

où $\overline{\mathrm{CFL_G}(0)}$ est le coefficient de frottement longitudinal moyen de la planche témoin à l'état initial et $\overline{\mathrm{CFL_G}(t)}$ est le coefficient de frottement longitudinal moyen

de la planche témoin à l'état étudié. Les valeurs des coefficients $\beta(t)$ pour chaque matériau et à chaque phase de mesure sont indiquées dans le tableau 3.3.

TABLEAU 3.3 – Coefficients de correction $\beta(t)$ relatifs à chaque phase de mesure et chaque revêtement étudié.

Nombre de raclage cumulé appliqué	BBSG silico-calcaire	BBM laitier	BBM silico-calcaire
150	1,029	1,027	1,017
300	0,998	0,990	0,989
450	0,996	1,005	0,996
600	1,022	1,042	1,026
750	0,995	0,966	0,991
900	0,915	0,881	0,914
1050	0,975	0,959	1,017
1200	1,025	1,008	1,035
1350	1,112	1,068	1,135
1500	1,030	1,006	1,065
1650	1,133	1,078	1,147
1800	1,132	1,109	1,169

- **Application des coefficients de correction**

Les données de coefficient de frottement longitudinal mesurées à chaque point, pour chaque phase de raclage et chaque revêtement sont traitées et corrigées à l'aide de la formule 3.2,

$$\mathrm{CFL_G}(x,t) = \mathrm{CFL_G^b}(x,t) \times \beta(t) = \mathrm{CFL_G^b}(x,t) \times \frac{\overline{\mathrm{CFL_G}(0)}}{\overline{\mathrm{CFL_G}(t)}} \tag{3.2}$$

où $\mathrm{CFL_G}(x,t)$ est le coefficient de frottement longitudinal corrigé localement en chaque position x du revêtement pour chaque phase de mesure t et $\mathrm{CFL_G^b}(x,t)$ est le coefficient de frottement longitudinal brut local de la planche raclée étudiée.
Les données de coefficient de frottement longitudinal présentées dans la suite de ce rapport correspondent aux données corrigées par l'application de cette méthode corrective.

3.5.2 Conditions des mesures

La campagne terrain se déroule durant la période hivernale. Les conditions de mesures telles que les températures de l'air, de la chaussée ou l'état des planches sont reportées pour chaque phase de mesure et sont indiquées dans le tableau 3.4.

Le relevé des températures est assuré par un suivi réalisé par une station météorologique présente sur le site d'essais. Un contrôle visuel de l'état des surfaces des chaussées est également effectué.

Tableau 3.4 – Récapitulatif des conditions expérimentales des différentes phases de mesures de la campagne terrain.

Nombre de raclage cumulé												
0	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500	1650	1800
Température de l'air (°C)												
8,5	12,3	9,1	5,2	5,4	9,0	10,0	4,5	6,8	9,2	8,1	8,8	13,5
Température de la chaussée (°C)												
14,4	14,4	10,1	5,8	5,4	8,0	9,4	8,8	6,6	10,1	10,3	19,0	15,2
Condition météorologique (P = Pluie, E = Ensoleillé, C = Couvert)												
P	E	P	C	C	P	C	C	E	E	C	E	E
Aspect de surface (H = Humide, M = Mouillé, S = Sec)												
H	H	M+H	H	H	H	H	H	H	H	H	S	M+H
Présence de saumure (O = Oui, N = Non)												
N	N	N	N	O	N	N	N	N	N	N	N	N
Présence de pollution (F = Feuilles, S = Sel, / = Pas de pollution)												
F	F	F	/	S	/	/	/	/	/	/	/	/

La majorité des phases de mesures sont effectuées dans des conditions de températures respectant les normes et les spécifications des appareils de mesure. Les mesures effectuées à l'aide du GripTester respectent les spécifications de sa norme [28]. Elles sont effectuées lorsque la température de l'air est supérieure à 4°C et lorsque la température de la chaussée est supérieure à 5°C.

Remarque 40 : Les conditions thermiques des essais de cette campagne se rapprochent de la limite d'utilisation de l'appareil. Aussi, plusieurs phases de mesures se sont déroulées sur des revêtements humides ou mouillés. Cela peut mener à des erreurs d'interprétation concernant les valeurs mesurées à l'aide du TM2.

3.5.3 Écartement de phases de mesures - TM2

Les mesures effectuées à l'aide du TM2 dépendent fortement de l'état des surfaces. Pour les phases de mesures réalisées après 150 raclages, malgré le balayage du site, une présence importante de pollutions (feuilles, sel) est constatée, comme illustrée dans la figure 3.12. Cette session de mesure est donc écartée pour l'ensemble des matériaux constituant le site expérimental.

Pour la même raison, la session de mesure après 600 opérations de raclage est également retirée pour le BBSG silico-calcaire et le BBM laitier.



FIGURE 3.12 – Pollutions observées en surface du BBSG silico-calcaire avant les phases de mesure après 150 et 600 raclages.

3.6 Résultats - Campagne terrain – Étude à grande échelle

3.6.1 Données du TM2

Comparaison des valeurs de profondeur moyenne de profil en fonction de la position de mesure

Le tableau 3.5 présente les valeurs moyennes de PMP, calculées sur la longueur totale de chaque planche, pour chaque phase de mesure et sur les deux positions des trois revêtements. À l'état initial, les valeurs de PMP sont proches entre les deux positions de mesure, avec des écarts allant de 0,04 mm (BBSG silico-calcaire) à 0,07 mm (BBM laitier). Pour les deux revêtements de type BBM, ces écarts sont supérieurs à la répétabilité de l'appareil, ce qui suggère l'existence de variations surfaciques initiales en cohérence avec les différences d'état de surface relevées précédemment (cf. section 3.2.2). Au cours de la campagne terrain, les écarts de PMP restent du même ordre, bien que certaines phases présentent des valeurs plus marquées, liées à la présence de polluants ou à l'humidité résiduelle. Le raclage par lames de déneigement n'entraîne toutefois pas de différences systématiques entre les positions de mesure et les trois formulations montrent une réponse homogène aux sollicitations mécaniques.

La suite de l'étude se poursuit à partir des valeurs moyennes de PMP obtenues aux deux positions de mesure.

TABLEAU 3.5 – Valeurs moyennes et différence de valeurs de PMP, en mm, des trois revêtements étudiés pour chaque phase de mesures et pour les deux positions de mesure.

Nombre de raclage cumulé	BBSG silico-calcaire			BBM laitier			BBM silico-calcaire		
	PMP (mm)		Δ PMP (mm)	PMP (mm)		Δ PMP (mm)	PMP (mm)		Δ PMP (mm)
	Axe	BDRD		Axe	BDRD		Axe	BDRD	
0	1,05	1,01	0,04	0,86	0,93	0,07	0,72	0,77	0,05
150	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	0,91	0,89	0,02	0,85	0,92	0,07	0,69	0,75	0,06
450	0,90	0,90	0,00	0,82	0,89	0,07	0,75	0,74	0,01
600	-	-	-	-	-	-	0,79	0,85	0,06
750	0,89	0,89	0,01	0,81	0,89	0,08	0,75	0,67	0,08
900	0,92	0,95	0,02	0,87	0,92	0,05	0,65	0,72	0,07
1050	0,89	0,87	0,03	0,83	0,88	0,05	0,71	0,77	0,06
1200	0,87	0,86	0,01	0,84	0,88	0,04	0,75	0,76	0,02
1350	0,90	0,87	0,04	0,90	0,95	0,04	0,75	0,79	0,05
1500	0,98	0,88	0,10	0,90	0,92	0,01	0,75	0,76	0,01
1650	0,85	0,90	0,04	0,84	0,91	0,08	0,71	0,76	0,05
1800	0,91	0,91	0,91	0,83	0,90	0,07	0,72	0,74	0,02

Évolution de la profondeur moyenne de profil moyenne en fonction du nombre de raclages

La figure 3.13 montre l'évolution moyenne de la profondeur moyenne du profil pour les trois planches étudiées en fonction du nombre de raclages.

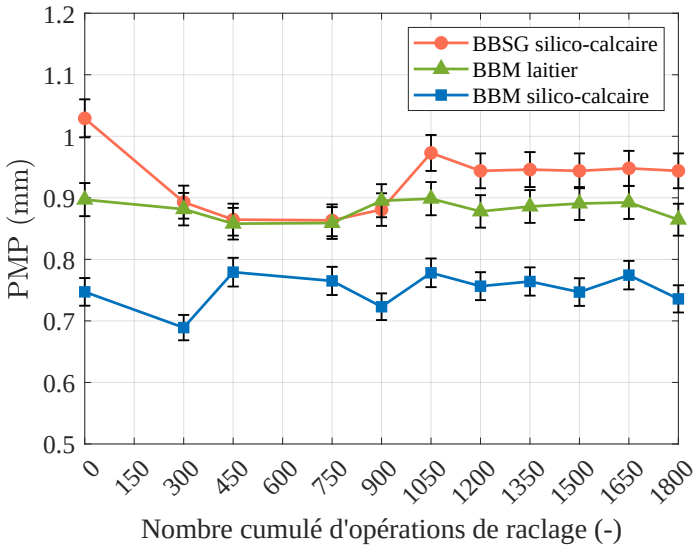


FIGURE 3.13 – Évolution de la profondeur moyenne de profil moyenne, en mm, des trois revêtements en fonction du nombre de raclages.

Les valeurs initiales de PMP sont de 1,03 mm pour le BBSG silico-calcaire, 0,91 mm pour le BBM laitier et 0,76 mm pour le BBM silico-calcaire. La valeur élevée du BBSG résulte probablement d'une mauvaise mise en œuvre (cf. section 3.2.1). Dès les premiers raclages, la PMP diminue nettement pour ce matériau, tandis que la baisse reste plus modérée pour les deux formules de type BBM. L'évolution de la PMP en fonction du nombre de raclages est non linéaire. Après environ 1050 passages de lames de déneigement en acier, les valeurs de PMP se stabilisent pour l'ensemble des revêtements.

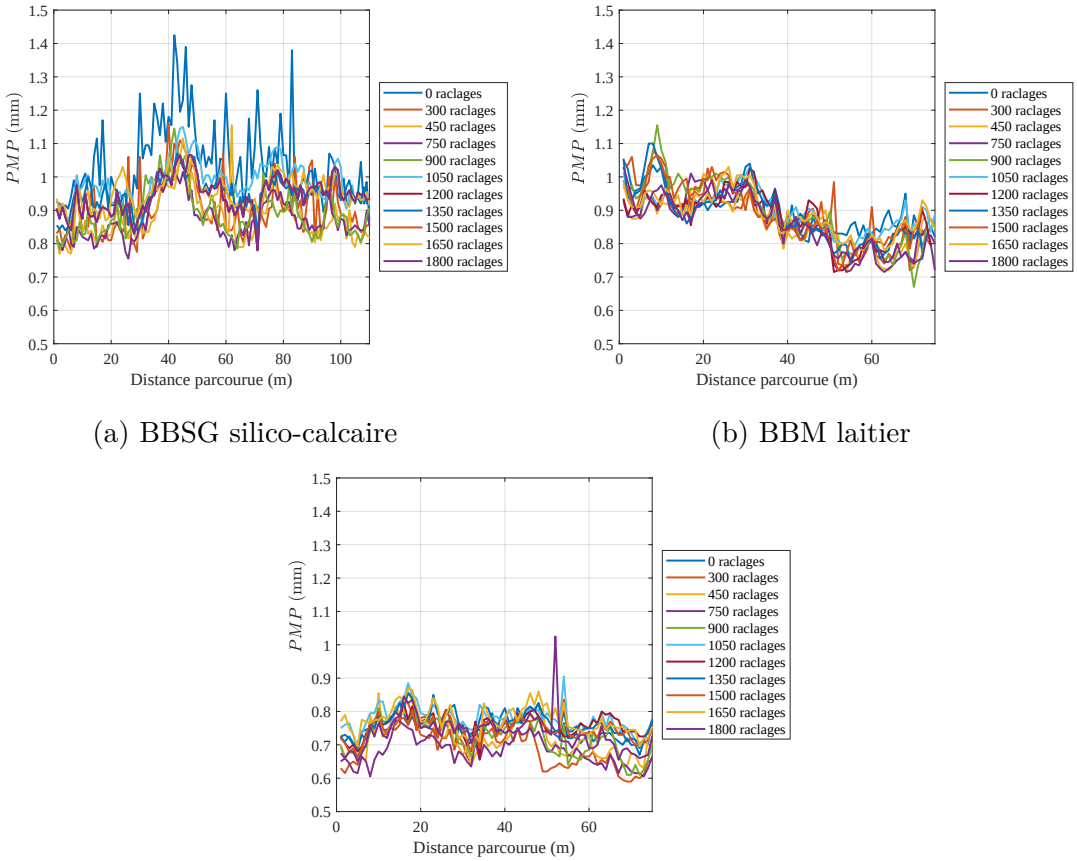
Remarque 41 : Au cours de la campagne terrain, des hausses ponctuelles de PMP sont observées. Elles s'expliquent d'une part par le mode de calcul de l'indicateur : l'abaissement progressif du niveau moyen de surface, lié à l'usure par raclage, accentue l'écart avec les aspérités saillantes et produit une hausse apparente. D'autre part, elles peuvent provenir des matériaux eux-mêmes : les enrobés à granulats silico-calcaires, du fait de leur hétérogénéité minéralogique, sont sujets à une usure différentielle.

À l'issue de la campagne, après 1800 raclages, les diminutions relatives de PMP par rapport à l'état initial atteignent -8,3 % pour le BBSG silico-calcaire, -3,6 % pour le BBM laitier et -1,5 % pour le BBM silico-calcaire. Les faibles variations finales pour les enrobés de type BBM traduisent une bonne résistance de leur texture aux sollicitations mécaniques. Toutefois, cette conclusion peut être nuancée par l'impact potentiel de la mauvaise mise en œuvre du BBSG silico-calcaire.

Évolution de la profondeur moyenne de profil locale en fonction du nombre de raclages

Les figures 3.14 montrent, pour chaque matériau, l'évolution des valeurs locales de PMP le long des planches à différentes phases de raclage. Ces représentations permettent d'appréhender les variations locales de texture en fonction du nombre croissant d'opérations de raclage. À l'état initial, le BBSG silico-calcaire présente des variations importantes de PMP (0,85 à 1,43 mm, écart-type 0,12 mm), liée à sa mise en œuvre. Le BBM laitier montre aussi des variations marquées (0,78 à 1,05 mm, écart-type 0,07 mm) pouvant être associées à la géométrie de la section (en virage). À l'inverse, le BBM silico-calcaire présente une texture initiale plus homogène (0,67 à 0,83 mm, écart-type 0,03 mm). Avec les raclages successifs, les variations locales de PMP s'atténuent pour l'ensemble des matériaux.

Ce processus conduit à l'apparition d'une « signature » de texture, avec des valeurs qui se stabilisent autour d'un niveau moyen.



(a) BBSG silico-calcaire

(b) BBM laitier

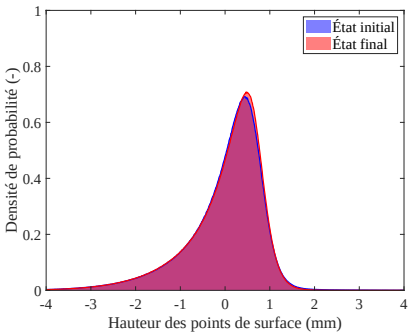
(c) BBM silico-calcaire

FIGURE 3.14 – Valeurs de PMP, en mm, moyennées sur 1 m, en fonction de la distance sur la planche d'essai pour les trois formulations d'enrobés bitumineux.

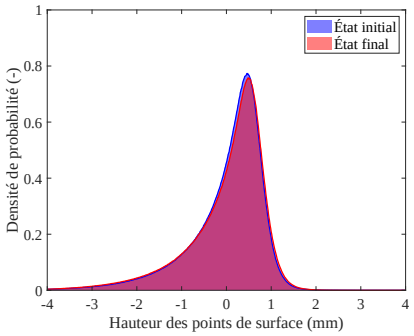
Le passage des lames de déneigement contribue à homogénéiser la texture des chaussées. L'intensité et la rapidité de ce phénomène varient selon la nature des granulats constituant les enrobés bitumineux.

Évolution de la distribution des hauteurs avec le nombre de raclages

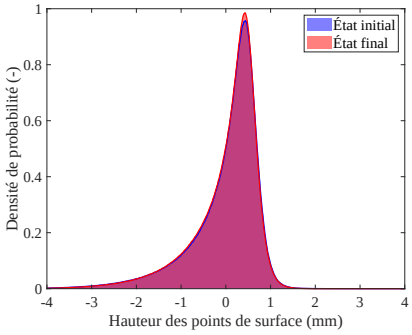
Des analyses basées sur les données brutes du TM2 sont également menées. La figure 3.15 présente les distributions de hauteurs mesurées pour les trois revêtements à l'état initial (0 raclage) et final (1800 raclages).



(a) BBSG silico-calcaire



(b) BBM laitier



(c) BBM silico-calcaire

FIGURE 3.15 – Distribution des valeurs de hauteur, en mm, entre l'état initial et final de la campagne terrain pour les trois formulations d'enrobés bitumineux.

Les courbes de distribution mettent en évidence que les trois revêtements étudiés présentent des textures positives, caractérisées par des aspérités dépassant le niveau moyen de la surface. Cela se traduit par une concentration accrue des valeurs de hauteur au-dessus de 0 mm, comme le montre la figure 3.16.

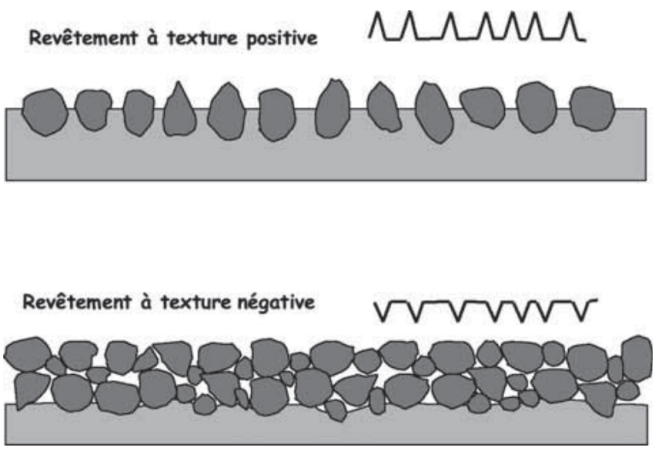


FIGURE 3.16 – Texture positive et texture négative [130].

À l'état initial, les distributions des valeurs de hauteur présentent des étendues variables selon les matériaux. Le BBM silico-calcaire se distingue par une répartition plus resserrée des hauteurs autour de la valeur moyenne, contrairement au BBSG silico-calcaire et au BBM laitier, qui présentent une dispersion plus importante. Cette observation est appuyée par les données des tableaux 3.6 et 3.7, qui indiquent, en mm, les plages dans lesquelles se situent 50 %, 70 % et 90 % des hauteurs mesurées. Entre le début et la fin de la campagne terrain, l'amplitude des plages contenant 90 % des points diminue pour l'ensemble des revêtements. Cela traduit une évolution vers une texture de surface plus homogène, avec une concentration plus marquée des hauteurs autour de la moyenne à l'état final.

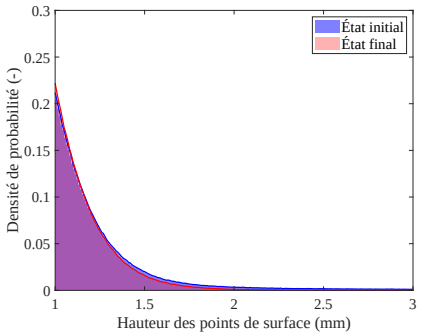
TABLEAU 3.6 – Plage de hauteurs, en mm, où se concentrent 50 %, 70 % et 90% des valeurs de hauteur des trois revêtements étudiés dans la campagne terrain lors de l'état initial.

BBSG silico-calcaire	**BBM laitier**	**BBM silico-calcaire**
Plage de hauteur où se situent 90 % des points mesurés (mm)		
$[-1,73;1,00]$	$[-1,85;0,99]$	$[-1,56;0,81]$
Plage de hauteur où se situent 70 % des points mesurés (mm)		
$[-0,82;0,70]$	$[-0,83;0,75]$	$[-0,68;0,60]$
Plage de hauteur où se situent 50 % des points mesurés (mm)		
$[-0,38;0,55]$	$[-0,37;0,59]$	$[-0,29;0,49]$

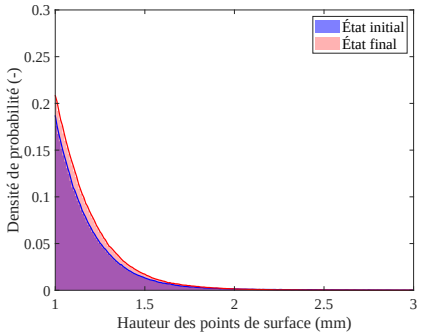
TABLEAU 3.7 – Plage de hauteurs, en mm, où se concentrent 50 %, 70 % et 90% des valeurs de hauteur des trois revêtements étudiés dans la campagne terrain lors de l'état final.

BBSG silico-calcaire	**BBM laitier**	**BBM silico-calcaire**
Plage de hauteur où se situent 90 % des points mesurés (mm)		
$[-1,70;0,95]$	$[-1,83;0,98]$	$[-1,56;0,81]$
Plage de hauteur où se situent 70 % des points mesurés (mm)		
$[-0,82;0,72]$	$[-0,84;0,75]$	$[-0,70;0,61]$
Plage de hauteur où se situent 50 % des points mesurés (mm)		
$[-0,39;0,54]$	$[-0,37;0,59]$	$[-0,30;0,49]$

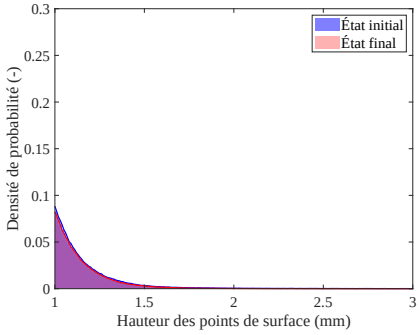
Après l'application d'opérations de raclage correspondant à 12 années de viabilité hivernale, une diminution de la concentration des valeurs les plus élevées est observée pour les trois revêtements (figure 3.17).



(a) BBSG silico-calcaire



(b) BBM laitier



(c) BBM silico-calcaire

FIGURE 3.17 – Distribution des valeurs de hauteur dans la plage 1 - 3 mm, entre l'état initial et l'état final de la campagne terrain pour les trois formulations d'enrobés bitumineux.

La baisse du niveau des points les plus hauts est quantifiée par la variation de la proportion de valeurs supérieures à la PMP initiale de la planche. Le tableau 3.8 indique le pourcentage de valeurs de hauteur supérieur à la valeur de PMP initiale de chaque revêtement. Le BBSG silico-calcaire est le plus concerné par la baisse du niveau des points les plus hauts de sa surface avec une baisse de concentration calculée à 0,57 %. La baisse du niveau des points les plus hauts des surfaces mène à la concentration plus importante des points à des valeurs de hauteur plus basses. Les surfaces sont plus homogènes.

TABLEAU 3.8 – Pourcentage des valeurs de hauteur supérieures à la valeur de PMP initiale, des trois revêtements étudiés de la campagne terrain.

PMP initiale (mm)	1,03	0,91	0,76
Hauteurs supérieures à la PMP initiale (%)	**BBSG silico-calcaire**	**BBM laitier**	**BBM silico-calcaire**
État initial (0 raclage)	4,34 %	7,91 %	6,79 %
État final (1800 raclages)	3,77 %	7,84 %	6,29 %

3.6.2 Données du GripTester

Comparaison des valeurs de coefficient de frottement longitudinal en fonction de la trace de mesure

Les mesures réalisées avec l'appareil GripTester se déroulent également sur deux positions de chaque planche. Le tableau 3.9 compile l'ensemble des valeurs moyennes corrigées de coefficient de frottement longitudinal pour chaque session de mesures des trois revêtements pour les deux positions de mesure.

TABLEAU 3.9 – Valeurs moyennes corrigées de coefficient de frottement longitudinal CFL_G des trois revêtements étudiés pour chaque session de mesures et pour les deux positions de mesures.

Nombre de raclage cumulé	**BBSG silico-calcaire**			**BBM laitier**			**BBM silico-calcaire**		
	CFL_G (-)		ΔCFL_G (-)	CFL_G (-)		ΔCFL_G (-)	CFL_G (-)		ΔCFL_G (-)
	Axe	BDRD		Axe	BDRD		Axe	BDRD	
0	0,91	0,98	0,08	0,88	0,94	0,07	0,98	1,06	0,08
150	0,90	0,89	0,01	0,89	0,91	0,01	0,99	0,98	0,01
300	0,90	0,90	0,01	0,85	0,85	0,00	0,93	0,88	0,04
450	0,86	0,86	0,00	0,85	0,85	0,00	0,90	0,88	0,02
600	0,86	0,88	0,01	0,87	0,89	0,01	0,95	0,92	0,03
750	0,87	0,88	0,01	0,85	0,85	0,00	0,94	0,92	0,01
900	0,88	0,95	0,07	0,83	0,88	0,06	0,86	0,91	0,04
1050	0,84	0,88	0,04	0,83	0,87	0,04	0,90	0,94	0,04
1200	0,88	0,87	0,01	0,83	0,85	0,02	0,91	0,92	0,01
1350	0,95	0,92	0,03	0,84	0,84	0,00	1,10	1,08	0,02
1500	0,87	0,84	0,03	0,82	0,86	0,04	1,02	1,00	0,02
1650	0,94	0,93	0,01	0,84	0,86	0,02	1,07	1,04	0,04
1800	0,90	0,91	0,00	0,82	0,83	0,01	1,11	1,15	0,04

La caractérisation initiale du coefficient de frottement longitudinal met en évidence un écart d'environ 0,075 entre les deux positions de mesure pour l'ensemble des trois revêtements étudiés. Cet écart se réduit progressivement au fil des phases de mesures, indiquant que les opérations de raclage contribuent à homogénéiser l'adhérence sur toute la largeur de la chaussée. Contrairement aux mesures de texture obtenues avec le TM2, les valeurs fournies par le GripTester sont beaucoup moins sensibles à la position sur la voie.

Dans la suite du rapport, les analyses sont basées sur les valeurs moyennes de CFL_G mesurées aux deux positions et sur l'ensemble de la longueur des planches étudiées.

Évolution de coefficient de frottement longitudinal moyen corrigé en fonction du nombre de raclages

Les valeurs de CFL_G corrigées moyennes de chaque planche après chaque phase de raclage sont répertoriées dans la figure 3.18.

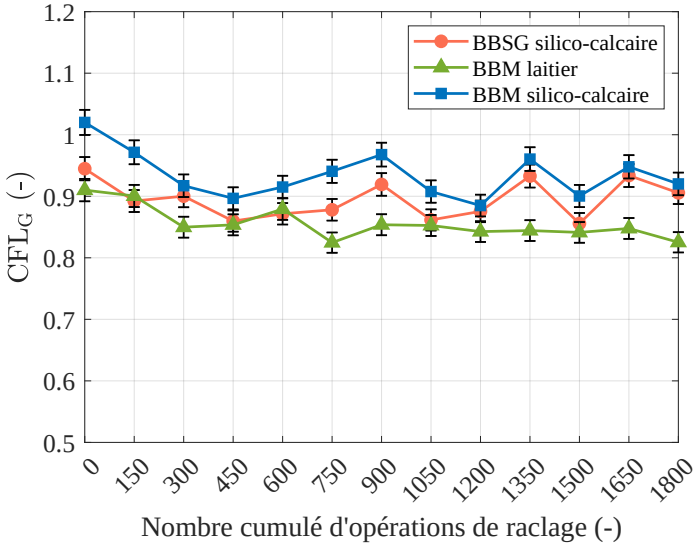


FIGURE 3.18 – Évolution des coefficients de frottement longitudinaux corrigés moyens des trois revêtements en fonction du nombre d'opérations de raclage.

Les valeurs initiales de CFL_G sont de 1,02 pour le BBM silico-calcaire, 0,945 pour le BBSG silico-calcaire et 0,910 pour le BBM laitier. L'adhérence diminue rapidement lors des premiers raclages, atteignant -6 % pour le BBM laitier, -9% pour le BBSG et -12 % pour le BBM silico-calcaire après 450 passages. Deux tendances apparaissent :

— Pour le BBM laitier, le coefficient de frottement longitudinal diminue de manière quasi-linéaire avec l'augmentation du nombre de raclages. Cette évolution progressive traduit une usure continue de la surface, aboutissant à une baisse relative de -9,28 % après 12 phases de raclages.

— Pour les deux enrobés à base de granulats silico-calcaire (BBSG et BBM), après une baisse initiale du niveau moyen de CFL_G, une remontée significative de l'adhérence est observée, dépassant la plage de répétabilité de l'appareil. Ce phénomène, attribué à une usure différentielle des granulats hétérogènes [21], résulte de la dégradation des constituants les plus tendres puis de la mise en contact des plus résistants, générant une régénération temporaire de l'adhérence.

Après 12 phases de raclages, le BBSG silico-calcaire présente la diminution relative la plus faible du CFL_G (-4,16 %), contre -9,83 % pour le revêtement de type BBM. La surface du BBSG est moins affectée au niveau de son adhérence par le passage de lames que les autres matériaux. Ce constat doit être relié avec les évolutions mesurées à l'échelle de la macrotexture.

Remarque 42 : Il convient de souligner que la campagne terrain s'est déroulée en période hivernale, dans des conditions proches de la limite basse d'utilisation du GripTester (cf. section 3.5.2). Ces températures peuvent expliquer les niveaux d'adhérence relativement élevés, conformément à ce qui est mentionné dans la littérature [21].

Évolution de la signature de coefficient de frottement longitudinal des matériaux en fonction du nombre de raclages

Les courbes données dans la figure 3.19 représentent les évolutions des valeurs de coefficient de frottement longitudinal corrigées pour les trois revêtements en fonction de la distance parcourue sur le site expérimental pour les mesures à l'état initial (0 raclage) et final (1800 raclages).

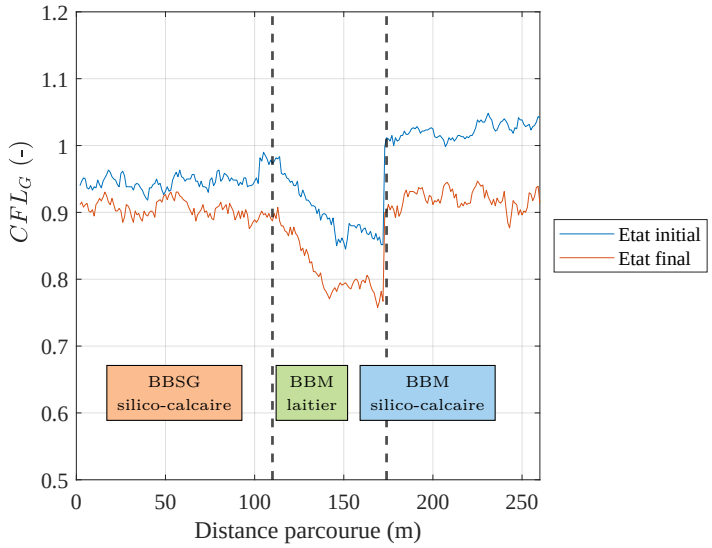


FIGURE 3.19 – Coefficient de frottement longitudinal corrigé des trois revêtements étudiés en fonction de la position sur le site expérimental durant les phases de mesures initiale et finale.

Les CFL_G sont globalement stables pour le BBSG et le BBM silico-calcaire, ce qui traduit une adhérence homogène sur toute la longueur de la planche.

En revanche, le BBM laitier présente une distribution moins régulière du CFL_G, probablement liée à la géométrie en courbe de la planche d'essai, susceptible d'introduire des biais lors des mesures. Pour les trois matériaux, les variations spatiales de CFL_G observées à l'état final reprennent les mêmes tendances que celles mesurées à l'état initial. **Cette constance indique que les lames de déneigement affectent l'adhérence de manière uniforme, sans engendrer de zones localisées plus dégradées. L'usure induite par le raclage peut ainsi être qualifiée de régulière et homogène sur l'ensemble des surfaces.**

3.7 Analyse et discussion - Campagne terrain – Étude à grande échelle

L'étude à grande échelle évalue l'effet des lames de déneigement en acier sur la texture et l'adhérence des couches de roulement. Deux indicateurs sont mobilisés : la profondeur moyenne de profil (PMP) pour la macrotexture et le coefficient de frottement longitudinal (CFL_G) pour la microtexture à basse vitesse [18, 24].

Les mesures de PMP montrent une dégradation progressive de la macrotexture des revêtements sous l'effet des raclages. Les valeurs évoluent de manière non-linéaire en fonction du nombre de raclages, avec une stabilisation après 7 hivers. Cela suggère un effet d'usure limité au-delà de ce seuil. Globalement, les revêtements tendent à s'homogénéiser : les variations locales de texture se réduisent, conduisant à l'apparition d'une « signature » stable pour chaque matériau. La figure 3.21 illustre ce phénomène.

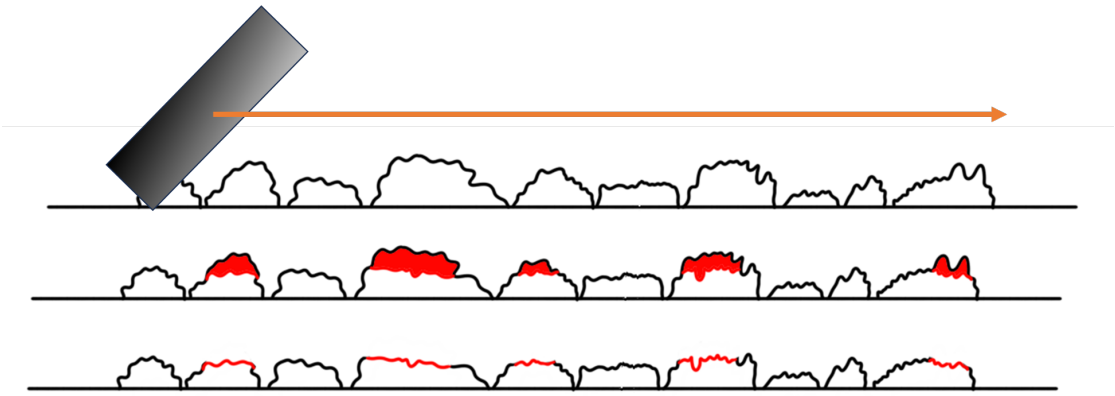


FIGURE 3.20 – Processus de dégradation de la macrotexture sous l'effet des lames de déneigement.

Les aspérités les plus saillantes sont progressivement réduites, tandis que les creux ne sont pas affectés. Les surfaces initialement positives deviennent plus régulières. La figure suivante illustre la présence de stries en surface des granulats, induites par les opérations répétées de raclage lors du passage des lames de déneigement. Ces marques linéaires confirment l'action de raclage, sans pour autant traduire un arrachement des granulats.

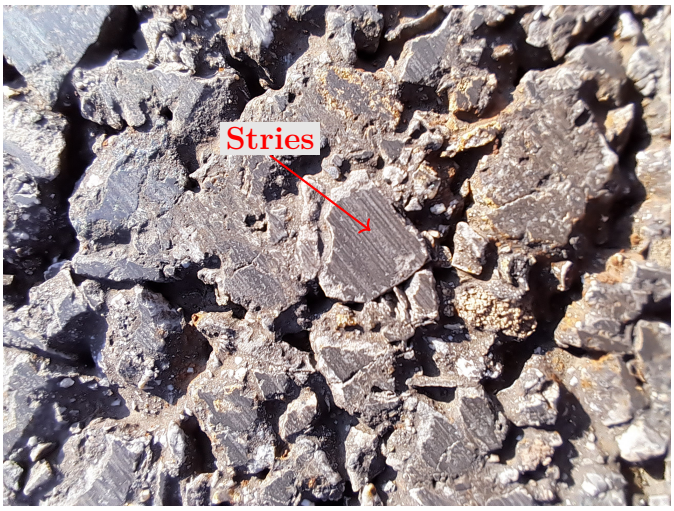


FIGURE 3.21 – Surface du BBM silico-calcaire présentant des stries en surface des granulats, témoignant du raclage par les lames de déneigement.

Le BBSG silico-calcaire subit la diminution relative la plus marquée de PMP, vraisemblablement en lien avec sa mauvaise mise en œuvre. À l'inverse, les BBM présentent une meilleure résistance de leur macrotexture.

Les mesures de CFL_G mettent en évidence une dégradation plus marquée de la microtexture. Le BBM laitier présente une diminution continue et quasi-linéaire de son coefficient de frottement. À l'inverse, les enrobés silico-calcaires présentent un comportement non-monotone : après une première phase de dégradation, une régénération temporaire de l'adhérence est observée. Ce phénomène est attribué à l'usure différentielle des granulats. Malgré quelques variations locales (notamment sur le BBM laitier), aucune différence significative n'est relevée entre les deux positions de mesure, tant pour la PMP que pour le CFL_G. Les sollicitations des lames affectent donc uniformément toute la largeur des revêtements. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 3.10.

Tableau 3.10 – Évolutions relatives, en %, des paramètres décrivant la macrotexture et la microtexture des revêtements.

Pourcentage relatif d'évolution (%)	**BBSG silico-calcaire**	**BBM laitier**	**BBM silico-calcaire**
Macrotexture - PMP	$\downarrow -8,29$ %	$\downarrow -3,63$ %	$\downarrow -1,53$ %
Microtexture - CFL_G	$\downarrow -4,16$ %	$\downarrow -9,28$ %	$\downarrow -9,83$ %

Les propriétés intrinsèques des granulats influencent fortement leur comportement sous raclage :

— Les granulats laitiers présentent un fort PSV, ce qui explique leur bonne tenue microtexturale malgré une fragilité à l'usure mécanique.

— Les granulats silico-calcaires, bien que plus résistants à l'usure (meilleurs résultats aux essais LA et MDE), sont plus sensibles au polissage.

— À type équivalent (BBM), la microtexture est davantage affectée lorsque les granulats sont sensibles au polissage.

— La nature de l'enrobé (BBM ou BBSG) joue également un rôle. Le BBSG présente une macrotexture plus exposée, ce qui le rend plus vulnérable à la dégradation superficielle.

Les lames de déneigement en acier induisent une dégradation progressive et différenciée de l'adhérence des revêtements, en agissant à la fois sur leur macrotexture et leur microtexture. L'intensité de cette dégradation dépend à la fois de la formulation de l'enrobé, de la nature des granulats et de leur mise en œuvre.

3.8 Campagne terrain – Étude à l'échelle locale

Afin de confirmer les tendances observées à grande échelle et de valider les résultats obtenus sur site, des analyses complémentaires sont menées en laboratoire à partir d'éprouvettes prélevées sur le terrain. Ces essais visent à vérifier si les phénomènes identifiés se retrouvent à des échelles plus fines.

3.8.1 Éprouvettes d'essais - Étude à l'échelle locale

Au cours de la campagne terrain, des carottes cylindriques (diamètre 225 mm, épaisseur 50 mm) sont prélevées sur chaque planche afin d'analyser, à l'échelle de locale, l'évolution de l'état de surface sous l'effet des lames de déneigement (figure 3.22).

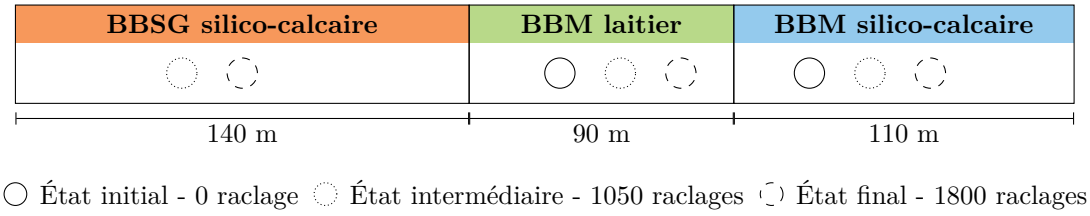


FIGURE 3.22 – Localisation des éprouvettes prélevées sur le site terrain.

Aucun prélèvement n'a été réalisé à l'état initial pour le matériau BBSG silico-calcaire. Au total, 8 éprouvettes sont examinées en laboratoire.

3.8.2 Dispositif de caractérisations - Étude à l'échelle locale

Quatre appareils sont utilisés afin de caractériser l'état de surface des éprouvettes prélevées sur le site expérimental : une machine Wehner et Schulze, un scanner laser, un TM2 ainsi qu'un pendule SRT. La caractérisation des éprouvettes par ces appareils permet d'avoir accès à plusieurs indicateurs (figure 3.23).



FIGURE 3.23 – Indicateurs provenant des appareils de mesures utilisés à l'échelle locale.

— **Machine Wehner et Schulze**
Les essais de frottement réalisés avec la machine Wehner et Schulze suivent le protocole décrit dans la section 2.5.3.

— **Scanner laser**
Pour chaque éprouvette, quatre zones de 90 mm² sont scannées avec le scanner laser AMES 9400 HD. Cette approche permet d'obtenir une caractérisation moyenne de la surface, limitant l'influence des variations locales.

— **TM2**
Le TM2 est initialement conçu pour un usage terrain. Une mise en place spécifique est donc réalisée afin de caractériser les éprouvettes en laboratoire.

Les caractérisations de profondeur moyenne de profil représentent la moyenne de trois passages répétés de TM2 sur les éprouvettes (figure 3.24).



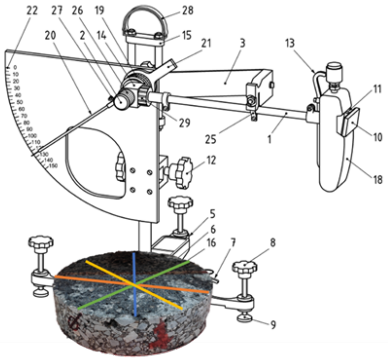
FIGURE 3.24 – Caractérisation de l'état de surface des éprouvettes de la campagne terrain à l'échelle locale par le TM2 en laboratoire.

— **Pendule SRT**

Les mesures de coefficient de frottement réalisées à l'aide du pendule SRT sont réalisées en différentes positions sur une éprouvette (figure 3.25). La multiplication des mesures permet de s'affranchir d'une éventuelle usure directionnelle liée au sens de passage de lames de déneigement. Pour chaque position, l'essai est réalisé 5 fois. La valeur de frottement d'une éprouvette correspond à la moyenne de 20 essais au pendule SRT.



(a)



(b)

FIGURE 3.25 – (a) Essai au pendule SRT d'une éprouvette de la campagne terrain, (b) Représentation des 4 positions de mesure d'une éprouvette.

3.9 Résultats - Campagne terrain – Étude à l'échelle locale

3.9.1 Évolution du coefficient de frottement en fonction de l'état de dégradation des éprouvettes

Les valeurs de coefficients de frottement μ_{WS} des éprouvettes mesurées à l'aide de la machine Wehner et Schulze sont reportées dans la figure 3.26. À l'état initial, les coefficients de frottement des deux revêtements de type BBM présentent des valeurs similaires. Une augmentation est observée au cycle intermédiaire, suggérant la présence résiduelle d'un film de liant en surface lors du premier cycle. Ce film, progressivement éliminé par le passage des lames et le trafic simulé lors de la campagne terrain, entraîne une amélioration de l'adhérence. Cette tendance à la hausse du coefficient de frottement se poursuit jusqu'au cycle final pour les deux BBM. À l'inverse, seul l'échantillon de BBSG silico-calcaire présente une diminution de sa valeur de frottement.

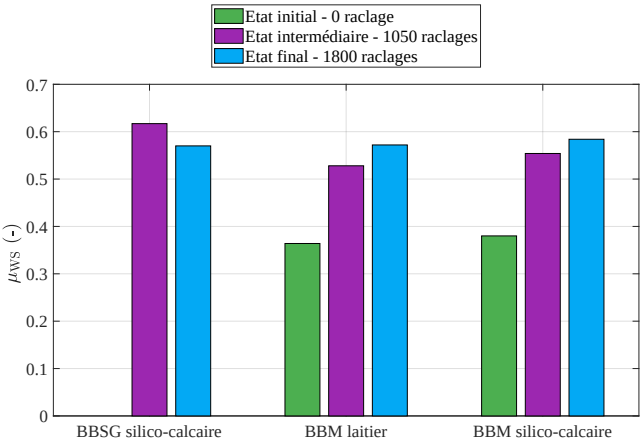


FIGURE 3.26 – Valeurs de coefficient de frottement μ_{WS} des éprouvettes de la campagne terrain mesurées à l'aide de l'appareil Wehner et Schulze.

Les coefficients de frottement μ_{SRT} des éprouvettes mesurées à l'aide du pendule SRT sont présentés dans la figure 3.27. Les mesures de frottement obtenues à l'aide du pendule SRT indiquent que, à l'état initial, les deux revêtements de type BBM présentent des valeurs comparables. Une augmentation de l'indicateur est observée entre les états initiaux et intermédiaires. Ces mesures confirment également une diminution du frottement pour le BBSG silico-calcaire à l'état final, tandis qu'une amélioration est constatée pour les deux BBM (laitier et silico-calcaire).

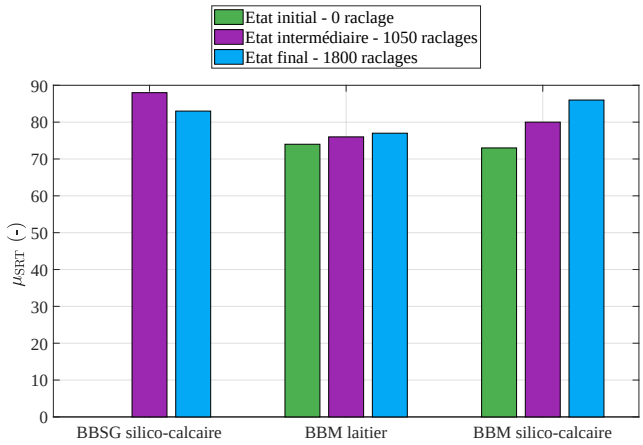


FIGURE 3.27 – Valeurs de coefficient de frottement moyennes μ_{SRT} des éprouvettes de la campagne terrain mesurées à l'aide du pendule SRT.

3.9.2 Évolution de profondeur moyenne de profil en fonction de l'état de dégradation des éprouvettes

Les valeurs de profondeur moyenne de profil des éprouvettes évaluées à l'aide du scanner laser sont indiquées dans la figure 3.28.

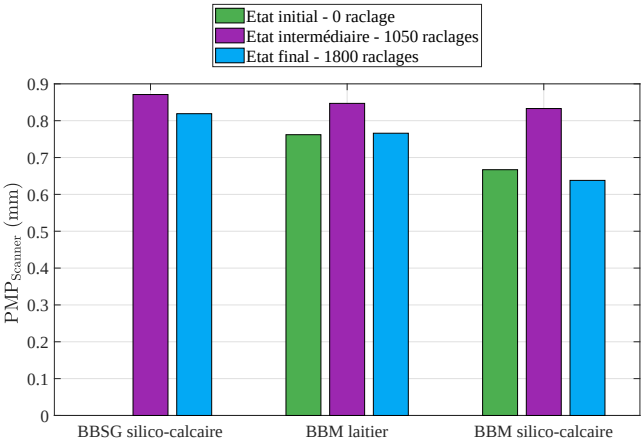


FIGURE 3.28 – Valeurs de profondeur moyenne de profil, en mm, des éprouvettes de la campagne terrain mesurées à l'aide du scanner laser.

Pour les éprouvettes de type BBM, les valeurs de profondeur moyenne de profil augmentent entre l'état initial et l'état intermédiaire. Cette hausse de la macrotexture peut être liée à un départ localisé de matériau ou à un abaissement progressif du niveau moyen de la surface, révélant des points hauts plus résistants au raclage. Entre le cycle intermédiaire et le cycle final, les valeurs de PMP diminuent pour l'ensemble des revêtements. Le BBM silico-calcaire présente la baisse relative la

plus marquée, atteignant 23 %, ce qui traduit une altération significative de sa texture. Cette diminution peut être attribuée au lissage des aspérités sous l'effet des raclages successifs. Le BBM laitier et le BBSG silico-calcaire subissent quant à eux des baisses plus modérées de leur macrotexture, respectivement de 10 % et 6 %.

Les valeurs moyennes de profondeur moyenne de profil des éprouvettes mesurées à l'aide du TM2 sont données dans la figure 3.29.

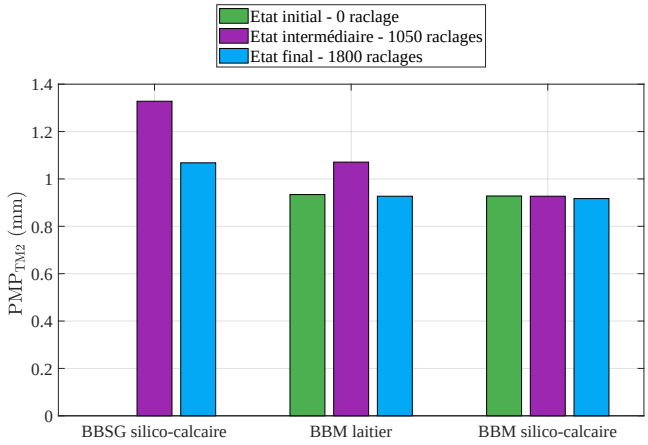


FIGURE 3.29 – Valeurs de profondeur moyenne de profil, en mm, des éprouvettes de la campagne terrain mesurées à l'aide du TM2.

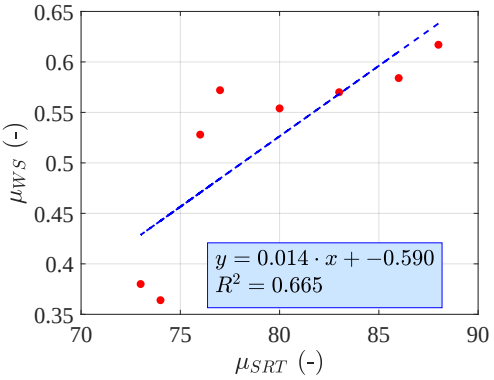
Les mesures de profondeur moyenne de profil réalisées à l'aide du TM2 présentent des tendances globalement cohérentes avec celles obtenues par le scanner laser. Entre l'état initial et l'état intermédiaire, les revêtements montrent soit une légère augmentation, soit une stabilisation des valeurs. En revanche, une baisse systématique est observée entre l'état intermédiaire et l'état final, avec une diminution particulièrement marquée pour le BBM laitier, estimée à 20 %.

Ces résultats confirment que les opérations de raclage induisent une évolution progressive de la macrotexture, avec un effet plus ou moins marqué selon la nature du matériau.

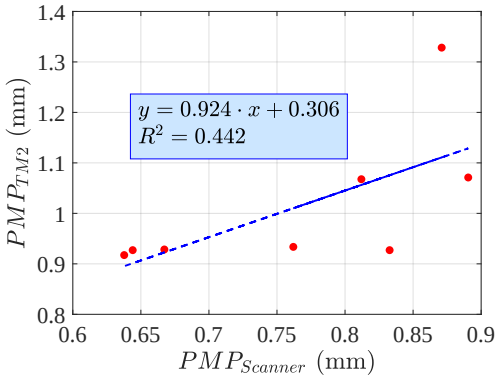
3.10 Analyse et discussion - Campagne terrain – Étude à l'échelle locale

L'analyse à l'échelle locale d'éprouvettes prélevées à différents stades de la campagne terrain permet de tirer plusieurs enseignements.

Les coefficients de frottement mesurés à l'aide de la machine Wehner et Schulze et du pendule SRT montrent une augmentation après les premiers raclages, qui se poursuit jusqu'à la fin de la campagne pour les revêtements de type BBM. Cette évolution peut s'expliquer par la présence, à l'état initial, d'un film de liant recouvrant les granulats, progressivement éliminé par l'action des lames. Malgré des protocoles de mesure distincts, les résultats issus des deux appareils sont corrélés à hauteur de 69 % (cf. figure 3.30a). Les mesures réalisées avec le scanner laser et le TM2 mettent en évidence une hausse ou une stabilisation des PMP entre l'état initial et intermédiaire, suivie d'une diminution entre l'état intermédiaire et final. La corrélation entre les valeurs de PMP obtenues par les deux appareils est d'environ 44 % (cf. figure 3.30b). Cette corrélation modérée s'explique principalement par le caractère local de l'indicateur, mais également par les différences entre les deux appareils, notamment en termes de méthode de calcul et de zones de mesure.



(a) Corrélation entre les coefficients de frottement (pendule SRT et machine Wehner et Schulze).



(b) Corrélation entre les profondeurs moyennes de profil (scanner laser et TM2).

FIGURE 3.30 – Corrélations entre les indicateurs d'adhérence et de texture évalués par différents appareils à l'échelle locale de la campagne terrain.

Ces caractérisations en laboratoire à l'échelle locale permettent d'observer des phénomènes non constatés lors de l'étude à grande échelle des planches des revêtements.

L'interprétation des résultats locaux doit être replacée dans le contexte du site expérimental. La figure 3.31 illustre l'uni longitudinal du site, précédemment présenté (cf. section 3.2.2) et y localise les zones de carottage utilisées pour l'étude à l'échelle locale.

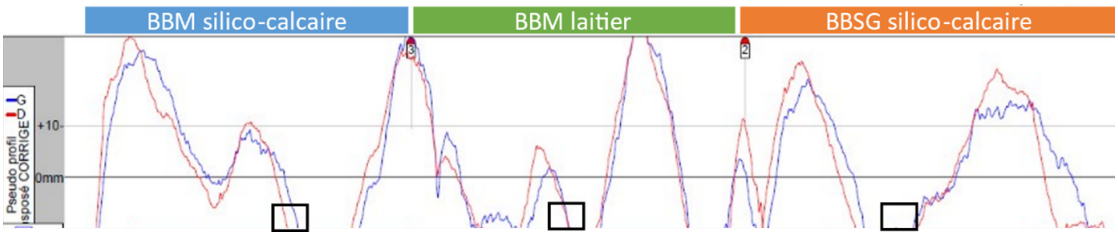


FIGURE 3.31 – Uniformité longitudinale du site expérimental et positions des zones de carottages de l'étude à l'échelle locale.

Les zones de prélèvement se situent dans des secteurs à plus faible altitude. Cette configuration interroge sur leur représentativité, car ces zones sont probablement moins exposées au passage des lames de déneigement. Il est possible que certaines zones basses ne soient pas impactées par le raclage en raison de la faible profondeur de pénétration des lames. Le décapage du film de liant résiduel et l'abrasion des granulats y sont donc limités.

Dans ce contexte, les évolutions d'adhérence ou de texture mesurées en laboratoire, telles que certaines augmentations de coefficients de frottement, relèvent sans doute d'effets locaux plutôt que de mécanismes généralisables à l'ensemble du revêtement, ce qui souligne les limites d'extrapolation des mesures locales.

3.11 Conclusions et perspectives – Impact des opérations de déneigement sur l'adhérence de revêtements routiers

L'objectif de ce Chapitre 3 est de caractériser l'impact des lames de déneigement en acier sur l'adhérence et l'état de surface de revêtements routiers. Pour cela, une campagne terrain est menée sur le réseau ATMB, en alternant des phases de raclage et de mesure, simulant 12 années d'opérations de viabilité hivernale. Deux échelles d'analyse sont mobilisées : une étude à grande échelle sur l'ensemble des planches et une étude locale en laboratoire sur des éprouvettes prélevées à différents stades.

À grande échelle, les résultats montrent une dégradation progressive de la macrotexture (PMP) et de la microtexture (CFL_G). Les revêtements de type BBM résistent mieux en macrotexture que le BBSG, tandis qu'en microtexture, la tendance s'inverse. L'évolution n'est pas strictement linéaire : des phénomènes de régénération de l'adhérence apparaissent, notamment pour les enrobés silico-calcaires.

Trois facteurs principaux conditionnent la résistance aux raclages : la nature des granulats (PSV, LA, MDE), le type d'enrobé (BBM ou BBSG) et la qualité de mise en œuvre. À l'échelle locale, les résultats diffèrent, du fait de l'hétérogénéité du site et de la position des prélèvements. Les éprouvettes issues de zones moins sollicitées par les lames ou le trafic ne reflètent pas toujours l'évolution globale. L'évaluation de l'impact des lames n'est donc pertinente qu'à grande échelle, sur l'ensemble des planches.

Remarque 43 : Il convient de souligner que les conditions de raclage mises en œuvre lors de cette campagne ne sont pas totalement représentatives des situations réelles d'exploitation. En effet, les opérations de raclage sont réalisées sur des chaussées dépourvues de neige ou de glace. Cette configuration, bien que permettant d'isoler les effets mécaniques des lames, entraîne probablement des sollicitations plus agressives que celles observées en conditions réelles.

Chapitre 4

Lois d'évolution de l'adhérence

Dans le cadre d'une démarche d'entretien préventifs et afin d'anticiper la durabilité des revêtements routiers, il est pertinent de proposer une loi d'évolution de l'adhérence tenant compte des différents facteurs environnementaux auxquels ils sont exposés. À terme, de telles lois fournissent aux gestionnaires routiers des outils prédictifs pour la conception, l'entretien, la gestion de leur réseau ainsi qu'une évaluation de l'impact de facteurs environnementaux.

Le développement d'une loi d'évolution de l'adhérence de chaussées repose sur une démarche statistique à partir de l'exploitation conjointe des données expérimentales des deux campagnes d'essais réalisées durant ce travail de recherche. En raison de l'impossibilité technique d'intégrer directement tous les facteurs environnementaux étudiés dans une loi unique (cf. remarque 37), deux démarches complémentaires sont retenues :

1. Le développement d'une loi fondée sur les facteurs environnementaux simulés en laboratoire (trafic, épandage de saumure, climat hivernal et estival).
2. Le développement d'une loi issue des observations terrain, ciblant les sollicitations mécaniques liées aux opérations de raclage par lames de déneigement en acier.

Ces deux lois sont développées séparément (cf. figure 4.1). La loi issue de la campagne en laboratoire est notée μ_L, tandis que celle issue des observations de terrain est notée μ_T. Le but est de converger vers une loi unique d'évolution de l'adhérence, notée μ.

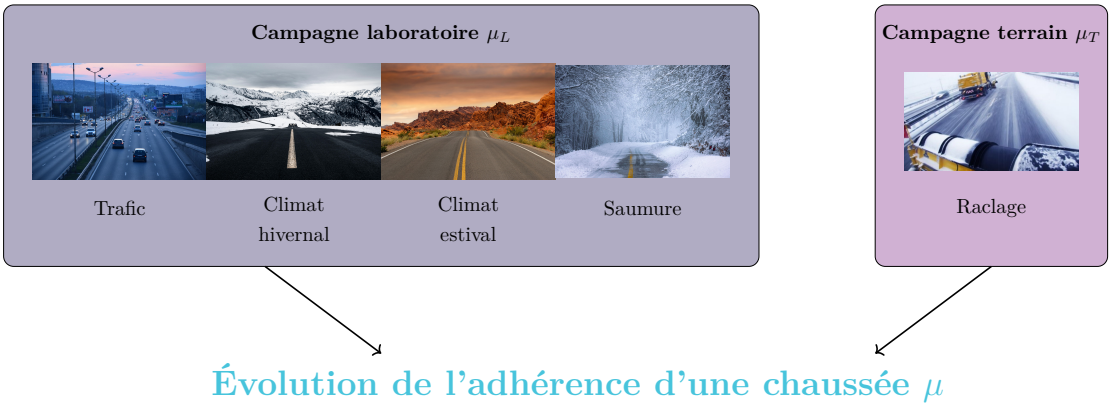


FIGURE 4.1 – Principe de l'élaboration de la loi d'évolution de l'adhérence d'une chaussée.

Ce Chapitre 4 suit une démarche progressive. Dans un premier temps, une revue critique de la littérature est menée afin d'identifier les lois les plus pertinentes pour décrire l'évolution de l'adhérence en fonction de facteurs environnementaux. Sur cette base, les deux lois distinctes sont développées. Leur validité et leur robustesse sont examinées au regard des mesures disponibles, en considérant à la fois leur capacité prédictive et leur accessibilité pour un gestionnaire de réseau routier, de manière à en favoriser l'usage concret dans les pratiques de gestion et d'entretien. Enfin, ces développements aboutissent à la proposition d'une loi générale intégrant l'ensemble des facteurs étudiés.

4.1 Bilan des lois existantes et justification de l'approche retenue

Une synthèse des principales lois d'évolution est présentée dans le Chapitre 1 (cf. section 1.9). Ici, les lois sont explicitées selon leur mode de développement afin d'en rappeler les principes et les limites. Les approches développées dans la littérature peuvent être regroupées en trois grandes familles.

1. **Les approches empiriques**
   Ces lois reposent sur des ajustements statistiques entre des variables (trafic, âge du revêtement, PSV, indicateurs d'adhérence). Leur simplicité et leur adaptabilité expliquent leur utilisation fréquente à grande échelle, mais leur validité reste souvent limitée au contexte des études.
2. **Les approches hybrides**
   Ces lois introduisent des variables plus proches des mécanismes de dégrada-

tion (texture, abrasion, teneur en liant), tout en conservant une formulation relativement simple. Elles offrent ainsi un compromis entre interprétation physique et applicabilité pratique.

3. **Les approches physiques**
   Ces lois cherchent à décrire directement les phénomènes d'usure : polissage progressif des granulats, altération du liant ou évolution de la texture. Certaines lois intègrent également le vieillissement climatique ou saisonnier. Bien que plus exigeants en données, ces lois permettent une interprétation plus robuste et une meilleure capacité de transposition des phénomènes observés.

Malgré cette diversité, la plupart des lois se concentrent sur un facteur isolé et négligent les interactions entre les sollicitations. Aucune loi ne prend en compte simultanément les facteurs environnementaux étudiés dans ce travail. Cette approche limite leur applicabilité dans des contextes réalistes où les sollicitations sont multiples, combinées et évolutives. De plus, elles s'appuient essentiellement sur des indicateurs conventionnels (CFL, CFT, PSV). Les campagnes expérimentales menées dans ce travail intègrent des indicateurs complémentaires, issus d'une approche multi-échelle, permettant une caractérisation plus détaillée de l'état de surface de chaussées [40, 70, 89-92].

L'étude de ces lois et des limites associées conduit à envisager le développement de nouvelles lois d'évolution, mobilisant des indicateurs inédits et une approche multi-échelle, afin de prendre en compte l'ensemble des facteurs environnementaux auxquel sont soumises les chaussées durant leur mise en circulation.

4.2 Loi d'évolution de l'adhérence – Campagne en laboratoire

L'objectif de cette section est de modéliser l'évolution de l'adhérence d'un enrobé bitumineux sollicité en laboratoire par des facteurs environnementaux : trafic (T), climat hivernal (H), climat estival (E) et l'exposition à la saumure (S).

• **Démarche de développement de la loi μ_L - Campagne en laboratoire**
Pour le développement de la loi d'évolution de l'adhérence à partir des résultats de la campagne en laboratoire, des indicateurs sont sélectionnés afin de rendre compte des mécanismes de dégradation à différentes échelles : macrotexture et

microtexture (cf. figure 4.2). Ces indicateurs sont issus de deux dispositifs de mesure : la machine Wehner et Schulze, largement utilisée dans le domaine routier et le scanner laser, encore peu répandu, mais présentant un fort potentiel pour le suivi régulier de l'état de surface des chaussées. Cette combinaison garantit la pertinence et l'applicabilité de cette loi d'évolution de l'adhérence dans divers contextes opérationnels.

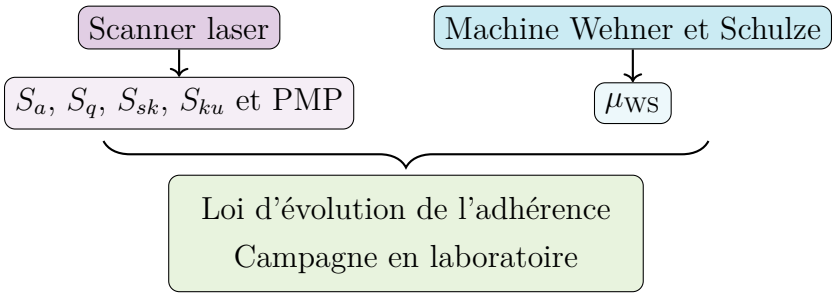


FIGURE 4.2 – Indicateurs sélectionnés pour la loi d'évolution de l'adhérence en fonction des sollicitations simulées en laboratoire.

Les indicateurs sont les suivants :

— Les indicateurs S_a, S_q, S_{sk} et S_{ku}, ainsi que la profondeur moyenne de profil PMP qui permettent de caractériser finement l'évolution des états de surface, en combinant des informations sur la macrotexture et la microtexture.

— Les valeurs de coefficients de frottement μ_{WS}, relatifs à l'adhérence, qui constituent une mesure représentative du comportement fonctionnel à l'échelle de l'enrobé.

Une analyse de variance ANOVA (cf. tableau 4.1) est effectuée afin de déterminer quelles sont la ou les combinaisons de facteurs qui sont en lien avec l'évolution des indicateurs mesurés par les deux appareils de caractérisation. L'analyse ANOVA repose sur le principe de comparaison des variabilités. Elle évalue si la dispersion observée entre les groupes de mesures soumis à différentes sollicitations est supérieure à la variabilité interne de chaque groupe [131]. Si tel est le cas, il est alors probable que la différence constatée entre les groupes provienne de l'effet réel des sollicitations appliquées et non du seul hasard expérimental. Cette analyse est conduite en deux temps :

1. une approche sans interaction, qui suppose l'indépendance des sollicitations lorsqu'elles sont combinées,
2. une approche avec interactions, qui prend en compte les effets inter-facteurs.

Dans les deux cas, la significativité de l'effet d'un facteur (ou d'une combinaison de facteurs) est évaluée à l'aide de la statistique de Fisher. Celle-ci compare le rapport entre la variance inter-groupes et la variance intra-groupes. Plus ce rapport est élevé, plus il est probable que les différences observées entre groupes ne soient pas dues au hasard. La probabilité associée à cette statistique est appelée *p-value*. Elle correspond à la probabilité, sous l'hypothèse nulle (absence d'effet du facteur étudié), d'obtenir un rapport de variances au moins aussi extrême que celui mesuré. Une petite *p-value* indique donc que l'hypothèse d'absence d'effet est peu vraisemblable. En pratique, un seuil conventionnel de 5 % (soit $p < 0{,}05$) est retenu : lorsque la *p-value* est inférieure à ce seuil, l'hypothèse nulle est rejetée et l'effet du facteur étudié sur l'évolution de l'indicateur est considéré comme significatif.

Remarque 44 : Dans ce travail, le trafic ne peut pas être considéré comme une sollicitation impactante puisque que l'ensemble des éprouvettes est soumis à des cycles de polissage.

Remarque 45 : Les valeurs *p-value* associées à un même facteur varient entre les deux modèles (avec et sans prise en compte des interactions). Cette différence s'explique par l'ajout d'interactions lors de la prise en compte d'interaction inter-factorielle qui augmente le nombre de paramètres à estimer. En conséquence, les *p-value* tendent à être plus élevées dans le modèle avec interactions.

Tableau 4.1 – Analyse ANOVA des sollicitations ayant un impact sur les indicateurs déterminés par le scanner laser et la machine Wehner et Schulze.

Appareil	**ANOVA sans interaction**			**ANOVA avec interaction**	
	Indicateur	**Sollicitation impactante**	***p-value***	**Sollicitation impactante**	***p-value***
Scanner laser	PMP	H	0,0273	-	-
	S_a	S	0,0214	-	-
		H	0,0291		
	S_q	H	0,0142	H	0,0314
	S_{sk}	S	0,0008	S	0,0025
		E	0,003	E	0,0075
	S_{ku}	S	0,0022	S	0,002
		H	0,0269	H	0,0207
		E	0,0044	E	0,0041
Machine Wehner et Schulze	μ_{WS}	E	0,0287	E	0,0167

Les caractérisations effectuées au scanner laser mettent en évidence l'impact de l'ensemble des sollicitations, considérées séparément, sur l'évolution des indicateurs de texture aux échelles macro et microscopique. Les cycles climatiques et l'immersion en saumure (H, E et S) conduisent ainsi à des modifications notables des surfaces des éprouvettes. En revanche, les essais réalisés avec la machine Wehner et Schulze ne révèlent qu'une influence marquée du climat estival (E), seule sollicitation présentant un impact dans cette campagne en laboratoire.

Ces analyses statistiques mettent en évidence les sollicitations influençant significativement les indicateurs étudiés et servent de base pour orienter la sélection des variables explicatives lors du développement de la loi. Bien que le trafic, appliqué systématiquement à toutes les éprouvettes, n'apparaisse pas dans cette analyse, il est néanmoins pris en compte comme un facteur majeur de l'évolution du frottement. En raison du nombre restreint d'éprouvettes issues de la campagne menée en laboratoire, il n'est pas possible de scinder les données en deux jeux distincts pour l'apprentissage et la validation de la loi. La démarche adoptée vise donc à tester plusieurs formes de lois sur les indicateurs retenus afin d'identifier celle offrant la meilleure corrélation avec les résultats expérimentaux.

• **Présentation des résultats de la loi μ_L - Campagne en laboratoire**
La loi d'évolution $\mu_L(t)$ est développée à partir des données expérimentales des essais en laboratoire. Sa formule générique de la loi est donnée par,

$$\begin{aligned}\mu_L(t) = \ & \mu_{\mathrm{WS}}(0) + \ \alpha_1 \left[T \times \mu_{\mathrm{WS}}(0)\right] \\ & + \ \alpha_2 \left[S \times S_a(0) \times S_{sk}(0) \times S_{ku}(0)\right] \\ & + \ \alpha_3 \left[H \times \mathrm{PMP}(0) \times S_a(0) \times S_q(0) \times S_{ku}(0)\right] \\ & + \ \alpha_4 \left[E \times \mu_{\mathrm{WS}}(0) \times S_{sk}(0) \times S_{ku}(0)\right] \end{aligned} \tag{4.1}$$

où

— t est la durée réelle de mise en circulation (en années),

— $\mu_{\mathrm{WS}}(0)$ est la valeur de coefficient de frottement mesuré après décapage à la machine Wehner et Schulze (sans unité),

— $T = T(t)$ correspond au trafic cumulé de poids lourds lors d'une durée t,

— $S = S(t)$ correspond au nombre cumulé de jours d'opérations d'épandage de saumure lors d'une durée t,

— $H = H(t)$ correspond au nombre cumulé de jours de gel-dégel lors d'une durée t,

— $E = E(t)$ correspond au nombre cumulé de jours hautes températures lors d'une durée t,

— $S_a(0)$ et $S_q(0)$ sont les valeurs des indicateurs de texture initiaux après décapage (en mm),

— $S_{sk}(0)$ et $S_{ku}(0)$ sont les valeurs des indicateurs de texture initiaux après décapage (sans unité),

— PMP(0) est la valeur de profondeur moyenne de profil initiale après décapage (en mm),

— α_1, α_2, α_3 et α_4 sont des coefficients de pondération/d'ajustement (sans unité).

La forme additive de la loi est retenue afin de permettre l'identification individuelle de l'impact de chaque mécanisme de dégradation, en lien avec une sollicitation spécifique. Ce choix repose sur l'analyse ANOVA, qui met en évidence l'absence d'interaction significative entre les différents types de sollicitations.

Remarque 46 : Cette approche présente plusieurs avantages. Sur le plan méthodologique, elle facilite l'estimation des contributions respectives de chaque facteur environnemental, en limitant les phénomènes de redondance ou de compensation entre termes. Sur le plan physique, elle permet une lecture directe du rôle joué par chaque mécanisme de dégradation sur l'évolution du coefficient de frottement, en lien avec les indicateurs mesurés. Enfin, sur le plan opérationnel, cette forme additive constitue une base souple et extensible, qui peut être enrichie pour intégrer d'autres interactions ou pour adapter la loi à d'autres types de revêtements.

Les coefficients d'ajustement $\alpha_{1\text{ à }4}$ sont estimés à l'aide de l'outil «*Solver*» sous Microsoft Excel. L'objectif de l'ajustement est de minimiser l'écart quadratique entre les valeurs modélisées par la loi d'évolution et les valeurs expérimentales mesurées. L'optimisation est conduite avec le moteur «*GRG Nonlinear*», en activant l'option «*Transform Non-Smooth Model*» afin d'assurer une meilleure convergence dans le cas d'un modèle quadratique convexe à quatre variables. Le solveur trouve une solution satisfaisant l'ensemble des contraintes en cinq itérations, avec un temps de calcul court (2 ms), garantissant la stabilité numérique du processus.

Remarque 47 : Au cours des essais d'ajustement, il est observé qu'une éprouvette perturbe significativement la qualité de la corrélation entre les valeurs modélisées et les données expérimentales (éprouvette 09). Bien que ses valeurs individuelles ne soient pas extrêmes, son évolution ne suit pas les tendances générales observées sur les autres échantillons. Cette éprouvette, soumise à la combinaison de la saumure et du climat estival, présente une dynamique atypique qui dégrade fortement les performances de la loi. Face à ce constat, elle est écartée de l'ensemble d'apprentissage, ce qui permet de renforcer la cohérence globale de la loi et d'améliorer sa stabilité.

La loi (4.1) intégrant les coefficients ajustés s'écrit :

$$\begin{aligned}\mu_L(t) = \mu_{\mathrm{WS}}(0) &- 0{,}01425\,[T \times \mu_{\mathrm{WS}}(0)] \\ &+ 0{,}00020\,[S \times S_a(0) \times S_{sk}(0) \times S_{ku}(0)] \\ &+ 0{,}00037\,[H \times \mathrm{PMP}(0) \times S_a(0) \times S_q(0) \times S_{ku}(0)] \\ &- 0{,}00061\,[E \times \mu_{\mathrm{WS}}(0) \times S_{sk}(0) \times S_{ku}(0)]\,. \end{aligned} \tag{4.2}$$

Les coefficients d'ajustement obtenus reflètent l'effet différencié des facteurs environnementaux sur l'adhérence d'une chaussée.

Les valeurs négatives (associées à α_1 et α_4) soulignent l'influence dégradante du trafic et du climat estival. Le trafic entraîne une perte progressive d'adhérence liée au polissage des granulats, tandis que les hautes températures favorisent la migration et le ramollissement du liant, altérant durablement la texture. La contribution du trafic apparaît comme le facteur prédominant dans la décroissance de l'adhérence, avec un coefficient d'ordre 10^{-2}, soit près de deux ordres de grandeur supérieurs à ceux associés aux autres sollicitations.

À l'inverse, les coefficients positifs (α_2 et α_3) traduisent des effets transitoirement favorables de la saumure et du climat hivernal. Ces sollicitations peuvent provoquer des micro-arrachements ou des micro-fissurations de liant ou de granulats, susceptibles d'accentuer localement la rugosité en surface. Ces contributions demeurent néanmoins ponctuelles et de faible intensité.

Les valeurs modélisées sont confrontées aux mesures expérimentales pour l'ensemble des éprouvettes. La figure 4.3 présente la corrélation entre les valeurs d'adhérence $\mu_L(t)$, mesurées expérimentalement et déterminées par la loi ajustée.

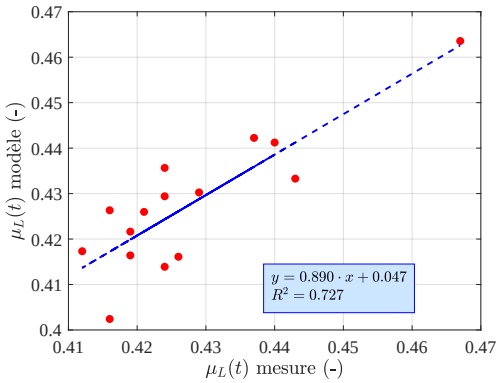


FIGURE 4.3 – Corrélation entre les valeurs $\mu_L(t)$ mesurées expérimentalement et modélisées par la loi d'évolution de la campagne en laboratoire.

Le coefficient de corrélation de 73 % met en évidence la capacité de la loi à restituer fidèlement les tendances globales d'évolution de l'adhérence. Il convient toutefois de souligner que l'ajustement repose uniquement sur des données acquises sur une durée limitée à trois années. La validité de la loi proposée ne peut donc être garantie au-delà de cet horizon temporel et son extrapolation à des périodes plus longues doit être considérée avec prudence.

- **Limites de la loi μ_L - Campagne en laboratoire**

Bien que la corrélation entre les résultats de la loi et les données expérimentales soit globalement satisfaisante, plusieurs limites doivent être soulignées. La liste suivante, non exhaustive, regroupe les principales réserves identifiées de la loi μ_L.

1. **Faible effectif** : La calibration est effectuée sur 15 éprouvettes d'une seule formulation, ce qui limite la représentativité et la robustesse de la loi.
2. **Hétérogénéité du matériau et variabilité des indicateurs** : Les différences des états de surface des éprouvettes ne sont pas prises en compte. De plus, la forte hétérogénéité locale des indicateurs S_a, S_q, S_{sk}, S_{ku} peut mener à des incertitudes.
3. **Rôle du liant ignoré** : L'évolution de l'adhérence modélisée ne tient pas compte de la contribution du liant bitumineux dans cette dernière.
4. **Horizon temporel restreint** : La loi est établie à partir d'un suivi expérimental couvrant uniquement les trois premières années de mise en circulation. L'absence de données à plus long terme limite la compréhension des mécanismes de dégradation lente ou cumulative, susceptibles d'apparaître au-delà de cet horizon.

5. **Absence d'interactions** : La formulation additive de la loi ne prend pas en compte des potentiels effets croisés entre les sollicitations.
6. **Choix basé sur ANOVA** : L'analyse de variance peut manquer la détection de certains effets faibles des sollicitations sur l'état de surface des éprouvettes d'enrobé bitumineux.
7. **Sélection partielle des appareils** : Seules les caractérisations issues du scanner laser et de la machine Wehner et Schulze sont retenues. Or, d'autres dispositifs (par exemple le microscope confocal ou le banc LUG) mettent en évidence des évolutions de la texture et de l'adhérence, dont la prise en compte pourrait modifier à la fois le poids attribué aux sollicitations et la hiérarchie de leurs effets.

4.3 Loi d'évolution de l'adhérence – Campagne terrain

L'objectif de cette section est de modéliser l'évolution de l'adhérence de trois chaussées de type et de formulation différents, soumises à une sollicitation réelle à grande échelle. Contrairement à la campagne en laboratoire, les essais terrain cherchent à isoler l'effet d'un unique facteur environnemental : le raclage mécanique dû au passage répété de lames en acier lors des opérations de déneigement. Cette sollicitation est appliquée de manière progressive, jusqu'à l'équivalent de douze années d'exposition.

• **Démarche de développement de la loi μ_T - Campagne terrain**

Pour le développement de la loi d'évolution de l'adhérence à partir des résultats de la campagne terrain, deux indicateurs complémentaires sont retenus (figure 4.4). Ils proviennent de deux dispositifs de mesure couramment employés dans le domaine routier, le TM2 et le GripTester.

Les indicateurs sélectionnés sont :

— La profondeur moyenne de profil, mesurée à l'aide du dispositif TM2,

— Le coefficient de frottement longitudinal, obtenu via le GripTester.

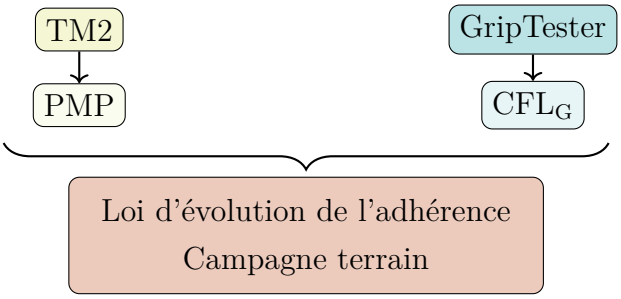


FIGURE 4.4 – Indicateurs sélectionnés pour la loi d'évolution de l'adhérence en fonction des opérations de raclage.

Dans cette campagne terrain, aucune analyse ANOVA n'est conduite pour sélectionner les variables explicatives. Le choix des indicateurs retenus pour modéliser les évolutions repose sur des considérations physiques liées aux matériaux. Les variables explicatives considérées incluent, d'une part, les caractéristiques initiales de chaque chaussée, à savoir le coefficient de frottement longitudinal et la profondeur moyenne de profil et d'autre part les propriétés intrinsèques des granulats utilisés (PSV, LA et MDE). À cela, s'ajoute un facteur, décrivant le type de formulation de l'enrobé, ainsi que le nombre cumulé de passages de lames, utilisé comme variable principale de sollicitation.

Remarque 48 : Ce cadre suppose que les différences de comportement entre des revêtements routiers peuvent être expliquées par leurs caractéristiques initiales et les propriétés des matériaux les composants.

• **Présentation des résultats de la loi μ_T - Campagne terrain**

La loi d'évolution $\mu_T(t)$ est développée à partir des données expérimentales issues des essais terrain et s'applique à l'échelle de planches routières. Sa formule générique est,

$$\begin{aligned}\mu_T(t) = \mathrm{CFL_G}(0) + \ & \alpha_1 \times \mathrm{PMP}(0) \\ + \ & \alpha_2 \times [\mathrm{PSV} - \mathrm{LA} - \mathrm{MDE}] \\ + \ & \alpha_3 \times B \\ + \ & \alpha_4 \times \ln(1+R) \\ + \ & \cos(\alpha_5 \times R) - 1 \end{aligned} \tag{4.3}$$

où

— t est la durée réelle de mise en circulation (en années),

— $R = R(t)$ correspond au nombre cumlé d'opération de raclages lors d'une durée t.

— $\mathrm{CFL_G}(0)$ est la valeur de coefficient de frottement longitudinal initiale mesuré à l'aide du GripTester (sans unité),

— PMP(0) représente la valeur de profondeur moyenne de profil initiale (en mm),

— PSV, LA et MDE sont les propriétés intrinsèques des granulats utilisées : PSV (sans unité) , LA (en %) et MDE (en %),

— B est un facteur représentant le type de chaussée (sans unité). Une valeur arbitraire est attribuée à chaque formulation afin de les différencier : $B = 1$ pour un enrobé de type BBM et $B = 2$ pour un enrobé de type BBSG.

— α_1 à α_5 représentent des coefficients d'ajustement (sans unité).

La structure additive de la loi est retenue afin de faciliter l'interprétation physique des différents termes et d'identifier clairement la contribution de chaque variable dans l'évolution de $\mu_T(t)$. L'introduction de termes non linéaires (logarithme, cosinus) vise à mieux reproduire les comportements observés expérimentalement. Il convient de souligner que la loi proposée ne cherche pas à reproduire les phases de régénération ponctuelle de l'adhérence qui peuvent survenir localement entre deux campagnes de viabilité hivernale. Ces variations, souvent aléatoires ou transitoires, sont difficilement prévisibles. **En conséquence, la loi restitue une trajectoire globale de dégradation de l'adhérence, en lissant les éventuelles hausses transitoires liées à des phénomènes de régénération difficilement prédictibles.**

Comme pour la loi d'évolution de l'adhérence précédente, les coefficients d'ajustement $\alpha_{1\text{ à }5}$ sont estimés à l'aide de l'outil «*Solver*» sous Microsoft Excel [1] en minimisant l'écart quadratique entre les valeurs modélisées et les valeurs mesurées. Dans ce cas, l'estimation s'appuie sur les données issues de l'étude à grande échelle, afin d'ancrer la loi μ_T dans des conditions expérimentales représentatives d'une mise en circulation réelle. Lors des essais d'ajustement, certaines données présentent des évolutions légèrement divergentes par rapport aux tendances générales. Néanmoins, toutes les observations expérimentales sont conservées afin de

1. L'optimisation est conduite avec le moteur « *GRG Nonlinear* », en activant l'option « *Transform Non-Smooth Model*». Le solveur trouve une solution en cinq itérations, avec un temps de calcul de 5 ms.

garantir la représentativité et la robustesse de la modélisation. Les coefficients de la loi sont ainsi estimés en intégrant l'ensemble des variations observées.

La loi finale (4.3) avec les coefficients ajustés s'écrit,

$$\begin{aligned}\mu_T(t) = \mathrm{CFL_G}(0) + \; & 0,02322 \times \mathrm{PMP}(0) \\ + \; & 0,00054 \times [\mathrm{PSV} - \mathrm{LA} - \mathrm{MDE}] \\ - \; & 0,00855 \times B \\ - \; & 0,09480 \times \ln(1+R) \\ - \; & \cos(0,03243 \times R) - 1 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Les coefficients ajustés traduisent le rôle différencié des indicateurs et des paramètres considérés dans la loi $\mu_T(t)$. Le coefficient positif associé à la profondeur moyenne de profil initiale met en évidence qu'une macrotexture initialement élevée contribue favorablement au niveau d'adhérence. Autrement dit, une surface présentant des aspérités plus marquées au départ conserve plus durablement un potentiel d'adhérence après des opérations de raclages. Le coefficient positif associé au terme $(\mathrm{PSV} - \mathrm{LA} - \mathrm{MDE})$ met en évidence le rôle favorable des propriétés intrinsèques des granulats dans l'évolution de l'adhérence. Cette combinaison est physiquement cohérente, dans la mesure où un PSV élevé traduit une meilleure résistance au polissage, alors que des valeurs faibles de LA et de MDE traduisent une meilleure résistance, respectivement, à l'abrasion et à la fragmentation. Par conséquent, une augmentation de ce terme correspond globalement à une amélioration de la qualité intrinsèque des granulats. Le signe positif obtenu par ajustement confirme ainsi que des granulats plus résistants favorisent le maintien de l'adhérence sous l'effet des opérations de raclage. Il convient toutefois de souligner que l'amplitude de cet effet reste limitée par rapport aux autres paramètres de la loi.

Le facteur B présente un coefficient négatif, traduisant une différence nette d'usure entre les types d'enrobés. Le terme logarithmique en fonction du raclage est négatif, confirmant le rôle cumulatif et irréversible des passages de lame dans la perte d'adhérence, avec un effet qui s'accentue à mesure que la durée équivalente de raclage augmente. Enfin, le terme oscillant traduit une composante périodique associée au caractère cyclique de l'évolution de la texture sous raclage. Le signe négatif de ce terme contribue à accentuer la décroissance globale du frottement longitudinal à mesure que le nombre de cycles croît.

Les valeurs modélisées sont confrontées aux mesures expérimentales pour l'ensemble des éprouvettes. La figure 4.8 présente la corrélation entre les valeurs d'adhérence $\mu_T(t)$, mesurées expérimentalement et déterminées par la loi ajustée. Le coefficient de corrélation, égal à 64 %, atteste de la capacité de la loi à restituer les grandes tendances de dégradation de l'adhérence sous l'effet du raclage mécanique. Certaines dispersions demeurent, en particulier au sein de chaque formulation d'enrobé, traduisant une variabilité intrinsèque des matériaux et des réponses locales à la sollicitation mécanique.

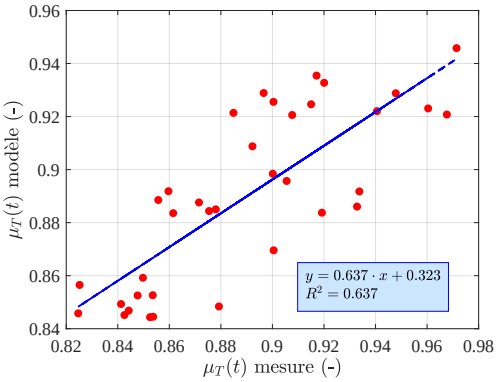
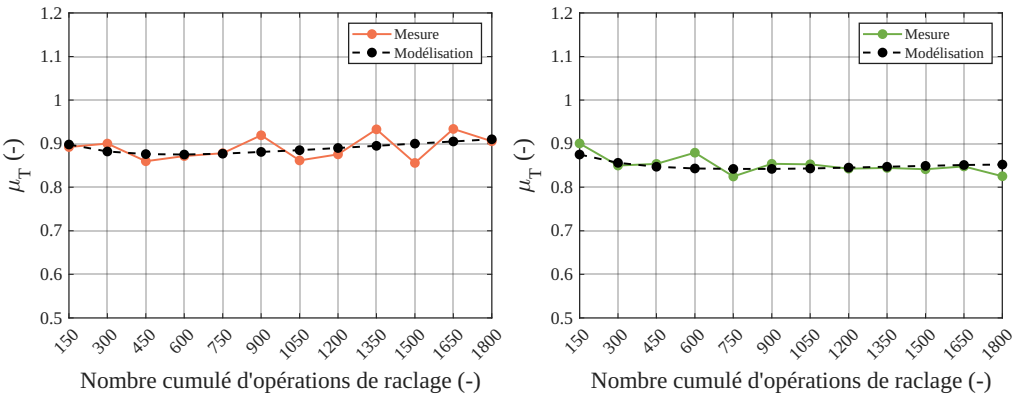
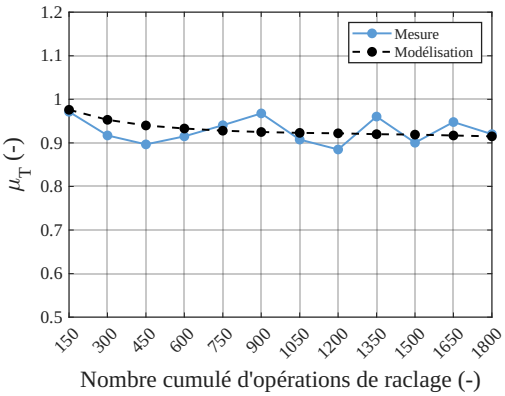


FIGURE 4.5 – Corrélation entre les valeurs $\mu_T(t)$ mesurées expérimentalement et modélisées par la loi d'évolution de la campagne terrain.

Les comparaisons entre les valeurs expérimentales et modélisées (cf. figure 4.6), présentées par formulation en fonction du nombre de cycles de raclage, permet d'évaluer plus finement la pertinence de la loi. Ces courbes mettent en évidence une concordance globale entre les valeurs mesurées et celles prédites par la loi en fonction du nombre de cycles de raclage. Les graphiques montrent que, malgré certaines phases de régénération ponctuelle de l'adhérence, l'allure générale des points suit la même tendance, ce qui confirme la capacité de la loi à restituer la dynamique moyenne de dégradation. **Dans l'ensemble, si la loi permet de restituer les trajectoires moyennes d'évolution de l'adhérence, elle montre des limites lorsqu'il s'agit de reproduire fidèlement les variations ponctuelles, propres à chaque formulation.**



(a) BBSG silico-calcaire (b) BBM laitier



(c) BBM silico-calcaire

FIGURE 4.6 – Évolutions des $\mu_T(t)$ en fonction du nombre d'opérations de raclage appliqué aux trois revêtements routiers.

- **Limites de la loi μ_T - Campagne terrain**

Malgré sa capacité à restituer les grandes tendances d'évolution de l'adhérence sous l'effet du raclage, la loi d'évolution de l'adhérence développée à partir de la campagne terrain présente plusieurs limites regroupées dans la liste suivante non exhaustive.

1. **Différences entre formulations simplifiées** : La distinction entre les différentes types de chaussée est sommaire et ne reflète pas toutes leurs spécificités mécaniques et structurales.
2. **Facteurs environnementaux manquants** : Seul l'effet du raclage est pris en compte, sans intégrer les facteurs environnementaux habituellement présents dans un contexte hivernal (cycles de gel-dégel, application de saumure ou trafic) ce qui réduit la portée de la loi.
3. **Phases transitoires ignorées** : Les améliorations temporaires d'adhérence (régénérations) ne sont pas représentées, la loi décrit uniquement une dégradation décroissante.

4. **Rôle du liant ignoré** : L'évolution du liant bitumineux dans le temps, pourtant significative pour l'adhérence, n'est pas modélisée.
5. **Conditions de mesure partiellement corrigées** : Malgré un traitement préalable des mesures d'adhérence, des incertitudes liées aux conditions météorologiques ou d'acquisition persistent.

4.4 Loi d'évolution de l'adhérence en fonction de facteurs environnementaux

Cette section vise à proposer une loi unique d'évolution de l'adhérence μ, développée à partir des deux lois intermédiaires établies précédemment : μ_L, issue des essais en laboratoire et μ_T, issue des observations terrain. L'objectif est de combiner ces approches complémentaires afin de représenter l'effet conjoint des facteurs environnementaux sur l'adhérence de revêtements routiers.

- **Démarche de développement de la loi μ**

La démarche adoptée consiste à définir une structure additive permettant de combiner les contributions issues de chaque loi intermédiaire. Les paramètres associés à la campagne en laboratoire rendent compte de l'influence du trafic, des cycles climatiques (hivernal et estival) et de l'épandage de saumure, tandis que les paramètres issus de la campagne terrain traduisent l'effet du raclage mécanique par les lames de déneigement.

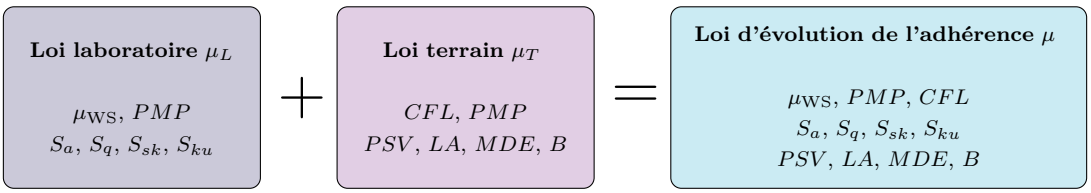


FIGURE 4.7 – Combinaison des lois issues des campagnes en laboratoire et terrain pour développer la loi unique d'évolution de l'adhérence μ.

- **Présentation des résultats de la loi μ**

La formulation retenue conserve une structure explicite pour chaque facteur.

$$
\begin{aligned}
\mu(t) = \mu_L(t) + \mu_T(t) = \; & \mu_{\mathrm{WS}}(0) \\
& + \; \alpha_1 \times \mathrm{PMP}(0) \\
& + \; \alpha_2 \times [\mathrm{PSV} - \mathrm{LA} - \mathrm{MDE}] \\
& + \; \alpha_3 \, [T \times \mu_{\mathrm{WS}}(0)] \\
& + \; \alpha_4 \, [S \times S_a(0) \times S_{sk}(0) \times S_{ku}(0)] \\
& + \; \alpha_5 \, [H \times \mathrm{PMP}(0) \times S_a(0) \times S_q(0) \times S_{ku}(0)] \\
& + \; \alpha_6 \, [E \times \mu_{\mathrm{WS}}(0) \times S_{sk}(0) \times S_{ku}(0)] \\
& + \; \alpha_7 \times \ln(1 + R) \\
& + \; \cos(\alpha_8 \times R) - 1
\end{aligned}
\tag{4.5}
$$

La détermination des coefficients d'ajustement de la loi repose sur l'exploitation conjointe de deux jeux de données expérimentales. D'une part, les résultats issus de la campagne en laboratoire permettent d'évaluer l'influence des facteurs environnementaux (T, S, H et E), mais uniquement sur une durée de trois ans. D'autre part, les résultats de la campagne terrain, analysés cette fois ci à l'échelle locale (cf. section 3.8), renseignent spécifiquement l'effet des opérations de raclage (R). Pour ces sections, les caractérisations initiales ($\mu_{\mathrm{WS}}(0)$, PMP(0) et indicateurs de texture) sont complétées par les mesures finales du coefficient μ_{WS} après un nombre R de passages de lame. N'ayant pas d'éprouvettes à l'état initial pour le BBSG silico-calcaire, ce revêtement est écarté de l'analyse. L'étude porte donc exclusivement sur des chaussées de type BBM. En conséquence, le paramètre B de la loi μ_T, associé au type de revêtement, n'est pas utilisé ici.

Pour l'optimisation de la loi, le jeu de données est scindé en deux ensembles : 70 % des données sont utilisées pour l'apprentissage de la loi et 30 % sont réservées à sa validation. Afin de limiter l'influence d'un découpage particulier du jeu de données, plusieurs séparations apprentissage/validation sont testées. Ces validations croisées permettent de vérifier la robustesse et la stabilité des coefficients estimés. Sur cette base, un recalage final est ensuite réalisé sur l'ensemble des données disponibles, afin de retenir une formulation unique et consolidée de la loi. Ce sont ces coefficients finaux, obtenus à partir du jeu de données complet, qui sont présentés et discutés dans la suite.

La loi finale de $\mu(t)$ (4.5) obtenue avec les coefficients ajustés s'écrit,

$$\begin{aligned}\mu(t) = \mu_L(t) + \mu_T(t) = \; & \mu_{\mathrm{WS}}(0) \\ & - \; 0,00253 \times \mathrm{PMP}(0) \\ & + \; 0,0007 \times [\mathrm{PSV} - \mathrm{LA} - \mathrm{MDE}] \\ & - \; 0,00012\,[T \times \mu_{\mathrm{WS}}(0)] \\ & - \; 0,00002\,[S \times S_a(0) \times S_{sk}(0) \times S_{ku}(0)] \\ & + \; 0,00003\,[H \times \mathrm{PMP}(0) \times S_a(0) \times S_q(0) \times S_{ku}(0)] \\ & + \; 0,00002\,[E \times \mu_{\mathrm{WS}}(0) \times S_{sk}(0) \times S_{ku}(0)] \\ & + \; 0,08663 \times \ln(1+R) \\ & + \; \cos(0,01601 \times R) - 1 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Les coefficients obtenus pour la loi d'évolution généralisée sont négatifs pour les termes associés à la profondeur moyenne de profil, au trafic et au nombre d'opération d'épandage de saumure. Cela peut s'expliquer par une diminution de l'adhérence plus importante : avec des macrotexture de chaussée plus grandes, du trafic plus élevé et une exposition plus grande à la saumure. À l'inverse, l'adhérence reste plus élevée dans le cas où :

— les granulats présentent des caractéristiques intrinsèques plus importantes (PSV, LA, MDE) ;

— le nombre de cycles de gel-dégel est plus grand ;

— le nombre de cycles de hautes températures est plus grand ;

— le nombre d'opération de raclage est important.

Néanmoins, l'interprétation physique de ces coefficients doit être nuancée. En effet, plusieurs termes de la loi sont formulés sous forme de produits entre indicateurs morphologiques et variables de sollicitation, de sorte que le signe du coefficient associé ne peut pas être interprété indépendamment de la structure complète du terme. Ainsi, les contributions positives associées au gel-dégel, aux hautes températures ou au raclage ne signifient pas nécessairement que ces sollicitations améliorent intrinsèquement l'adhérence, mais plutôt qu'au sein de l'ajustement global, leur effet combiné avec les autres paramètres conduit à une augmentation de la réponse modélisée sur la plage de données étudiée. Ces résultats peuvent traduire des effets transitoires de révélation de texture, mais aussi des compensations entre variables corrélées. Ils invitent donc à considérer cette loi avant tout comme

un outil de représentation globale de l'évolution observée, plutôt que comme une traduction directe de l'effet propre de chaque mécanisme considéré isolément.

Les valeurs modélisées sont confrontées aux mesures expérimentales des campagnes expérimentales (cf. figure 4.8).

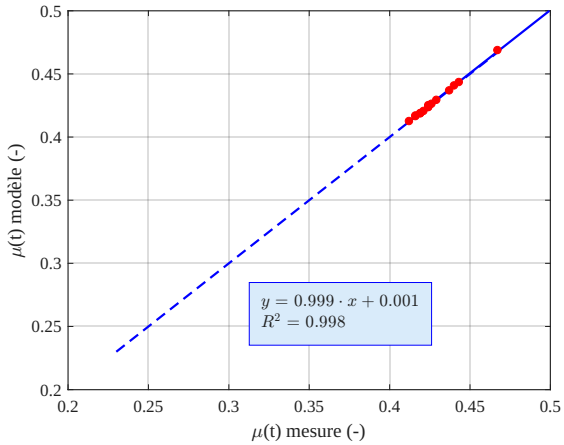


FIGURE 4.8 – Corrélation entre les valeurs $\mu(t)$ mesurées expérimentalement et modélisées par la loi d'évolution de l'adhérence en fonctions de facteurs environnementaux.

Le coefficient de corrélation, égal à 99 %, met en évidence l'excellente capacité de la loi à reproduire les évolutions de l'adhérence d'une chaussée sur une période de trois ans sous l'effet de facteurs environnementaux. La très faible dispersion des valeurs observée atteste de la robustesse de la loi proposée et de sa pertinence pour décrire les tendances de dégradation.

Remarque 49 : Il est également à noter que la corrélation demeure particulièrement bonne pour des valeurs du coefficient de frottement proches de 0,45, soit le seuil de sécurité classiquement retenu pour les réseaux routiers [18, 25].

Remarque 50 : La loi proposée doit toutefois être considérée, à ce stade, comme une loi essentiellement descriptive des valeurs expérimentales obtenues dans le cadre de cette thèse. Si la très bonne corrélation observée confirme sa capacité à rendre compte des tendances mesurées sur le jeu de données étudié, sa portée généralisable reste encore à consolider.

- **Limites de la loi μ**

Malgré sa capacité à restituer les tendances d'évolution de l'adhérence sous l'effet de facteurs environnementaux, la loi $\mu(t)$ présente plusieurs limites identifiées dans

la liste suivante, non exhaustive.

1. **Absence de données de la campagne en laboratoire après trois ans de sollicitations** : La durée des essais en laboratoire est limitée à trois ans. L'évolution au-delà de cette durée repose sur une extrapolation linéaire, ce qui une source d'incertitude non négligeable.
2. **Absence de données pour la campagne terrain** : Le faible nombre de données à l'échelle locale réduit la représentativité et l'évaluation de la valeur de μ_{WS} repose sur une méthode corrective simple.
3. **Rôle du liant non pris en compte** : L'évolution du liant bitumineux sous l'effet du vieillissement et des sollicitations environnementales n'est pas explicitement intégrée dans la modélisation.
4. **Distinction simplifiée entre formulations** : La variable introduite pour différencier les types de chaussées (B) reste sommaire et ne reflète pas toutes les propriétés mécaniques et pétrographiques des enrobés. Dans ce travail, cette variable n'a par ailleurs pas été utilisée.
5. **Structure additive** : La loi repose sur une formulation additive qui suppose l'indépendance des facteurs. Les interactions possibles entre sollicitations environnementales et mécaniques ne sont donc pas représentées.
6. **Phases transitoires non représentées** : Les régénérations ponctuelles d'adhérence parfois observées en conditions réelles ne sont pas prises en compte, la loi décrivant uniquement une évolution monotone décroissante.

4.5 Conclusion – Loi d'évolution de l'adhérence en fonction de facteurs environnementaux

L'objectif de ce Chapitre 4 est de développer une loi d'évolution de l'adhérence μ en fonction de facteurs environnementaux. Pour cela, deux lois intermédiaires sont proposées. La première, μ_L, décrit l'influence combinée du trafic, des cycles climatiques et de l'épandage de saumure, tandis que la seconde, μ_R, cible spécifiquement l'effet du raclage par lames de déneigement en acier. Leur articulation conduit à une loi unifiée, intégrant explicitement des sollicitations représentatives des conditions réelles de service des chaussées.

Les résultats obtenus montrent que la loi parvient à restituer fidèlement les tendances expérimentales, comme en témoigne le coefficient de corrélation élevé entre valeurs modélisées et mesurées. La formulation retenue présente une structure

explicite pour chaque facteur, ce qui assure une interprétation physique claire des paramètres et permet de mettre en évidence le rôle relatif de chaque sollicitation.

Au-delà de cette performance de modélisation, la loi proposée constitue une première étape vers un outil opérationnel d'aide à la gestion des infrastructures. Elle offre une base solide pour anticiper l'évolution de l'adhérence et orienter les choix en matière d'entretien préventif ou de conception des revêtements.

Il convient toutefois de souligner certaines limites inhérentes à la démarche. La loi repose sur un jeu de données nécessairement restreint et sur des hypothèses simplificatrices, qui en bornent le domaine de validité. Le choix méthodologique retenu, à savoir l'élaboration d'une loi explicitant séparément l'effet de chaque facteur, privilégie la clarté physique et la lisibilité des résultats, mais il peut occulter des interactions plus complexes entre sollicitations. Ces limites n'enlèvent rien à la pertinence de l'approche, qui constitue un socle robuste pour de futurs travaux d'enrichissement et de généralisation.

Chapitre 5

Modèle mécanique du contact pneumatique-chaussée

La compréhension fine des mécanismes de contact entre un pneumatique et une chaussée constitue un enjeu central dans l'analyse de l'adhérence et de la durabilité des revêtements routiers [132-134]. Les chapitres précédents permettent de caractériser expérimentalement l'évolution de l'état de surface de chaussées sous différentes sollicitations environnementales. Ces travaux mettent en évidence l'influence directe de la texture sur les propriétés d'adhérence et leur évolution dans le temps. Cependant, si ces campagnes expérimentales apportent une vision quantitative des changements de surface, elles ne renseignent pas directement sur l'évolution du contact avec un pneumatique et donc sur l'adhérence réellement offerte par l'interface pneumatique-chaussée. Dans cette perspective, la modélisation numérique apparaît comme un complément indispensable. Elle permet d'explorer, de manière contrôlée, comment les évolutions de texture observées expérimentalement se traduisent dans les conditions locales de contact, offrant ainsi une meilleure compréhension de l'évolution de l'adhérence avec l'usure induite par les facteurs environnementaux. Ce chapitre s'inscrit dans la continuité des analyses expérimentales. Il propose une approche numérique du contact pneumatique-chaussée, en mobilisant le code ra3d développé pour simuler les interactions mécaniques entre un pneumatique déformable et une surface rugueuse. Il s'agit de :

— présenter les bases physiques, numériques et algorithmiques de ce code, en lien avec les choix de modélisation ;

— d'observer numériquement les effets des modifications de texture induites par les facteurs environnementaux sur l'évolution du contact pneumatique-éprouvette, à travers l'analyse des distributions de pressions de contact.

5.1 Code numérique – ra3d

Le contact pneumatique-chaussée est approché de façon numérique par un logiciel de simulation numérique en mécanique du contact nommé ra3d. Ce code approche ce contact à l'aide d'un cylindre élastique en contact avec une surface rugueuse indéformable, comme schématisé dans la figure 5.1 [135, 136].

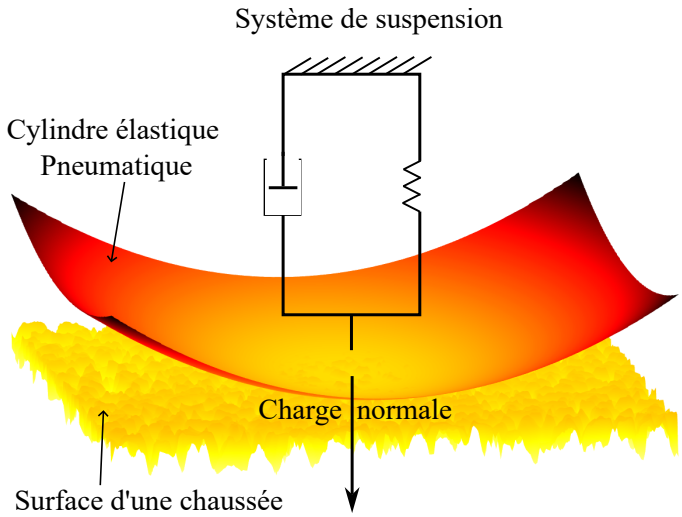


FIGURE 5.1 – Contact pneumatique-chaussée réalisé à l'aide du code numérique ra3d.

Le pneumatique est représenté par un cylindre suspendu à une altitude fixée par le biais d'un système mettant en parallèle un ressort et un amortisseur, régit par différents paramètres (raideur, viscance). Une charge verticale s'applique sur le cylindre imitant le quart du poids d'un véhicule. Cette charge est à l'origine du contact entre le pneumatique et la chaussée. Le modèle numérique utilisé dans ces recherches assimile le pneumatique à une plaque mince orthotrope précontrainte sur fondation avec des conditions de périodicité et des conditions aux limites qui sont décrites dans la section suivante (cf. section 5.1.1). La surface de chaussée, quant à elle, est décrite par une surface réelle d'enrobé bitumineux indexée par ces valeurs de hauteurs (altitude pour un point de coordonnées x et y) acquises par le scanner laser (cf. section 1.7.3). Dans ce cas numérique, le contact entre le pneumatique et la surface rugueuse est supposé parfait. C'est-à-dire qu'il n'y a pas la prise en compte des forces de frottement ou du phénomène d'adhésion (cf. Chapitre 1). Le contact se résume à la condition de répulsion mécanique entre les deux surfaces connues qui porte le nom de condition de Signorini [137].

5.1.1 Modèle de pneumatique

Le code ra3d modélise le pneumatique comme une plaque orthotrope sous tension reposant sur une fondation élastique, selon l'approche proposée par Kropp [138]. La courbure du pneumatique est négligée : celui-ci étant « déroulé » dans les directions circonférentielle et latérale. Le caractère périodique est imposé dans la direction circonférentielle (condition de périodicité), tandis qu'un appui simple est retenu sur les bords latéraux (condition de bord). L'orthotropie de la plaque traduit l'anisotropie liée aux nappes d'acier constituant l'armature du pneumatique. Une rigidité en flexion B résulte de la présence de ces nappes, tandis qu'une tension membranaire T provient de la pression interne du pneumatique. Enfin, la compressibilité de l'air confiné dans le pneumatique induit un terme de fondation élastique S, modélisé par une fondation de Winkler.

Le déplacement vertical de la plaque est assimilé au déplacement radial du pneumatique, noté $u(x, y, t)$. Lorsque le pneumatique est soumis à un champ de pression externe $p(x, y, t)$, des forces de contact compressives $f(x, y, t)$ apparaissent, issues de l'interaction entre les aspérités de la chaussée et la bande de roulement de pneumatique.

L'équation du mouvement de la plaque peut dès lors être formulée comme,

$$\begin{aligned}\left[\left(\sqrt{B_x}\,\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\sqrt{B_y}\,\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)^2-\left(T_x\frac{\partial^2}{\partial x^2}+T_y\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)+S+c\frac{\partial}{\partial t}+m\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right]u(x,y,t)&=f(x,y,t)+p(x,y,t)\\ \left[\mathcal{K}+c\frac{\partial}{\partial t}+m\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right]u(x,y,t)&=f(x,y,t)+p(x,y,t)\end{aligned} \tag{5.1}$$

où B_x et B_y sont les rigidités en flexion longitudinale et latérale de la plaque (en N.m^2), T_x et T_y sont les tensions longitudinale et latérale de précontrainte (en N/m), S est une raideur par unité de surface (en N/m^3) , c est un coefficient d'amortissement visqueux (en N.s/m^3) et m est la masse par unité de surface (en kg/m^2). $\mathcal{K}$ désigne l'opérateur associé à la raideur d'une plaque orthotrope précontrainte reposant sur une fondation élastique. La pression extérieure est exprimée par $p(x, y) = mg + N/ab$ où g est l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre, N une charge externe appliquée à la surface et a et b les dimensions caractéristiques de la plaque (longueur et largeur).

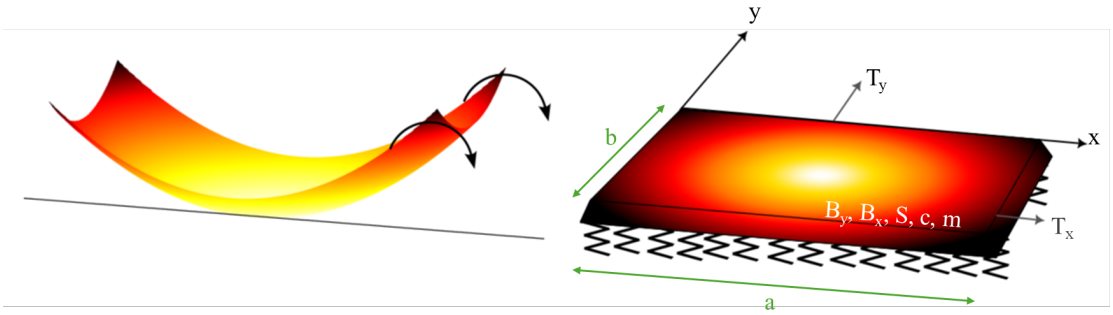


FIGURE 5.2 – Pneumatique considéré en tant que plaque orthotrope.

- **Condition de périodicité**

Le pneumatique, représenté par une plaque mince orthotrope, admet des conditions de périodicité tels que le déplacement dû à la flexion, la rotation, le moment fléchissant et l'effort tranchant soient continus. Cela se traduit par les égalités suivantes,

$$u(0,y,t) = u(a,y,t) \tag{5.2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0,y,t) = \frac{\partial u}{\partial x}(a,y,t) \tag{5.3}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(0,y,t) + \nu_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}(0,y,t) = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(a,y,t) + \nu_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}(a,y,t) \tag{5.4}$$

$$\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}(0,y,t) + (2-\nu_y)\frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2}(0,y,t) = \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}(a,y,t) + (2-\nu_y)\frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2}(a,y,t) \tag{5.5}$$

où $a = 2\pi R$ est la longueur de la plaque orthotrope avec un rayon R du pneumatique, ν_x et ν_y sont les coefficients de Poisson dans les directions x et y respectivement.

- **Condition de bord simplement appuyé**

Dans le modèle numérique, les flancs du pneumatique sont en appuie simple. Cela mène à une configuration où la plaque orthotrope est appuyée sur ses côtés. Cela se traduit par,

$$u(x,0,t) = 0 = u(x,b,t) \tag{5.6}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}(x,0,t) + \nu_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x,0,t) = 0 = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}(x,b,t) + \nu_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x,b,t) \tag{5.7}$$

où pour rappel b correspond à la largeur de la plaque orthotrope.

5.1.2 Conditions de contact

Conditions de Signorini [137]

Le contact entre deux surfaces, aussi appelé pénétration ou gap et noté g, est défini par l'écart vertical entre le plan de la surface et la position (x, y) du cylindre (figure 5.3). La pénétration des surfaces peut s'écrire :

$$g(x, y, t) = Z - h_0(x, y) - u(x, y, t) - h_1(x, y) \tag{5.8}$$

où Z est l'écart vertical entre les deux lignes moyennes, h_0 est l'altitude du cylindre non déformé à la position (x,y), h_1 est l'altitude du profil de la texture de chaussée à la position (x,y) et u est la déformation du cylindre.

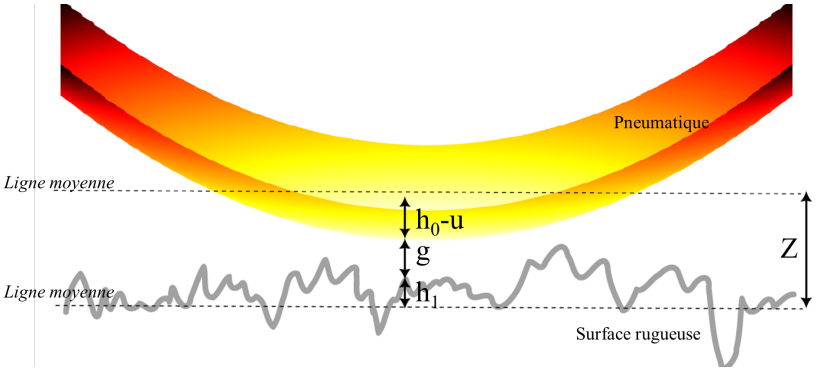


FIGURE 5.3 – Contact entre un pneumatique approché par un cylindre et une surface rugueuse.

Le contact entre le cylindre et le plan respecte les conditions de Signorini d'un contact parfait, c'est-à-dire sans pénétration ni dissipation en tout point de la zone de contact. Ces conditions de non pénétration peuvent être exprimées en fonction des trois points suivants :

1. $g(x, y, t) \geq 0$
2. $f(x, y, t) \leq 0$
3. $g(x, y, t) \cdot f(x, y, t) = 0.$

La première condition représente la condition d'impénétrabilité des deux corps. La deuxième condition indique que les forces de contact sont toujours répulsives. Enfin, la dernière condition indique deux situations. Soit la force de pression de contact est nulle ce qui correspond à l'absence de contact entre les deux surfaces, soit l'écart entre les deux surfaces est nul alors il y a l'existence d'un contact avec une pression non nulle.

Méthode de pénalité

La méthode de pénalité est un schéma numérique pour satisfaire la condition de Signorini. Elle consiste à autoriser une pénétration selon la loi,

$$f(x, y, t) = g(x, y, t) \cdot \gamma. \tag{5.9}$$

Cette loi, exprimant la pénétration de la texture d'une surface sur la surface d'un pneumatique, est représentative du comportement visco-élastique de ce dernier. En effet, les forces de contact répulsives correspondent à la réaction du système ressort-amortisseur pouvant être associé à chaque nœud du pneumatique.

5.1.3 Projection dans la base des modes propres

Les modes propres sont notés $\psi_k(x, y)$ où k=0,1,2,... et ils vérifient $\mathcal{K}\psi_k = m\omega_k^2\psi_k$ où ω_k est la pulsation propre (en rad/s) du mode k. Les modes propres et les valeurs propres d'une plaque orthotrope sont définis par les équations 5.10 et 5.11.

$$\psi_{ij1}(x, y) = A_{ij} \cos\left(2i\pi\frac{x}{a}\right) \sin\left(j\pi\frac{y}{b}\right) \quad i\text{=}0,1,\ldots\ j\text{=}1,2,\ldots \tag{5.10}$$

$$\psi_{ij2}(x, y) = B_{ij} \sin\left(2i\pi\frac{x}{a}\right) \sin\left(j\pi\frac{y}{b}\right) \quad i\text{=}1,2,\ldots\ j\text{=}1,2,\ldots \tag{5.11}$$

Dans ce cas, les facteurs normalisés, A_{ij} et B_{ij} sont obtenus à l'aide de l'expression, $\int_0^a \int_0^b [\psi_{ijk}(x, y)]^2 dxdy = 1$, qui indique que A_{ij} est égal à $\sqrt{2/ab}$ si $i = 0$ et que sinon $A_{ij} = B_{ij} = 2/\sqrt{ab}$. Les valeurs propres du cylindre sont obtenues à l'aide de l'équation du mouvement,

$$m\omega_{ij}^2 = \left[T_x\left(\frac{2i\pi}{a}\right)^2 + T_y\left(\frac{j\pi}{b}\right)^2\right] + \left[\sqrt{B_x}\left(\frac{2i\pi}{a}\right)^2 + \sqrt{B_y}\left(\frac{j\pi}{b}\right)^2\right]^2 + S \tag{5.12}$$

où ω_{ij} est la pulsation propre en rad/s du mode i, j.

La déformée $u(x, y, t)$ du pneumatique est obtenue par composition modale à chaque instant t comme,

$$u(x, y, t) = \sum_{k=0}^{\infty} U_k(t)\psi_k(x, y). \tag{5.13}$$

où $U_k(t)$ est l'amplitude modale. Il faut maintenant résoudre les amplitudes mo-

dales U_k. Pour cela, l'équation de mouvement est projetée dans la base modale.

$$\mathcal{K}\sum_{k=0}^{\infty} U_k(t)\psi_k(x,y)+c\frac{\partial}{\partial t}\sum_{k=0}^{\infty} U_k(t)\psi_k(x,y)+m\frac{\partial^2}{\partial t^2}\sum_{k=0}^{\infty} U_k(t)\psi_k(x,y) = f(x,y,t)+p(x,y). \tag{5.14}$$

Cette expression devient alors,

$$\sum_{k=0}^{\infty} mw_k^2 U_k(t)\psi_k(x,y) + c\sum_{k=0}^{\infty} \dot{U}_k(t)\psi_k(x,y) + m\sum_{k=0}^{\infty} \ddot{U}_k(t)\psi_k(x,y) = f(x,y,t) + p(x,y). \tag{5.15}$$

En intégrant les deux membres de l'équation sur l'intégralité de la plaque qui est orthonormale, l'équation (5.15) devient,

$$m\ddot{U}_k(t) + c\dot{U}_k(t) + m\omega_k^2 U_k(t) = F_k(t) + P_k \tag{5.16}$$

où F_k est la force modale définie par $F_k(t) = \int_0^a \int_0^b f(x,y,t)\psi_k(x,y)\,dx\,dy$.

La pression modale extérieure P_k est définie par l'expression,

$$P_k = \int_0^a \int_0^b p(x,y)\psi_k(x,y)\,dx\,dy. \tag{5.17}$$

En introduisant l'amortissement modal comme étant égal à $2m\xi_k\omega_k = c$, cela devient,

$$m\left[\ddot{U}_k + 2\xi_k\omega_k\dot{U}_k + \omega_k^2 U_k\right] = F_k(t) + P_k \tag{5.18}$$

ce qui correspond à un système d'équations différentielles d'ordre deux. Pour réduire ce système à l'ordre un, une variable auxiliaire est introduite sous la forme $V_k = \dot{U}_k$. L'équation du mouvement s'écrit finalement comme,

$$\dot{U}_k(t) = V_k(t) \tag{5.19}$$

et

$$\dot{V}_k(t) = \frac{F_k(t) + P_k}{m} - 2\xi_k\omega_k V_k(t) - \omega_k^2 U_k(t). \tag{5.20}$$

5.1.4 Schéma numérique

Discrétisation temporelle

Le temps est discrétisé en plusieurs instants $t_0 = 0 < t_1 < t_2 < \ldots < T$ avec un pas de temps $\tau = t_{n+1} - t_n$ comme illustré dans la figure 5.4.

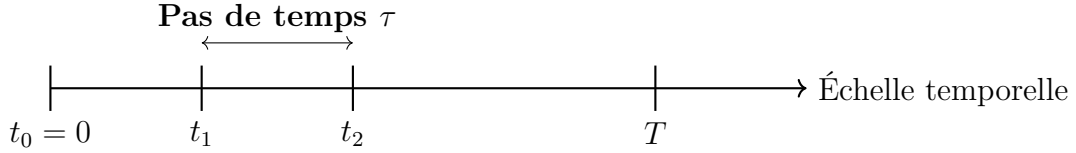


FIGURE 5.4 – Représentation simplifiée de la discrétisation temporelle.

Des variables modales discrétisées peuvent être introduites comme la déformée modale $U_k(t)$, la vitesse modale $V_k(t)$, l'accélération modale $\dot{V}_k(t)$, la force modale $F_k(t)$ et la force modale extérieure P_k. Ces variables sont approximées respectivement par $U_{n,k}$, $V_{n,k}$, $\dot{V}_{n,k}$, $F_{n,k}$ et P_k. Pour résoudre l'équation du mouvement (5.18), la méthode des différences finies est utilisée. Elle consiste à exprimer la vitesse et l'accélération à l'instant n en fonction des déplacements aux instants $n-1$ et $n+1$.

$$\dot{U}_{n,k} = \frac{U_{n+1,k} - U_{n-1,k}}{2\tau} \tag{5.21}$$

$$\dot{V}_{n,k} = \frac{U_{n+1,k} - 2U_{n,k} + U_{n-1,k}}{\tau^2}. \tag{5.22}$$

En remplaçant les vitesses et les accélérations par les expressions ci-dessus, l'équation (5.18) devient,

$$U_{n+1,k}\left[\frac{1}{\tau^2} + \frac{\xi_k\omega_k}{\tau}\right] = U_{n,k}\left[\frac{2}{\tau^2} - \omega_k^2\right] + U_{n-1,k}\left[\frac{1}{\tau^2} - \frac{\xi_k\omega_k}{\tau}\right] + \frac{F_{n,k} + P_k}{m}. \tag{5.23}$$

Sous la forme récursive, cette expression prends la forme suivante,

$$U_{n+1,k} = a_k U_{n,k} + b_k U_{n-1,k} + c_k(F_{n,k} + P_k) \tag{5.24}$$

avec

$$a_k = \left(\frac{2}{\tau^2} - \omega_k^2\right) / \left(\frac{1}{\tau^2} + \frac{\xi_k\omega_k}{\tau}\right) \tag{5.25}$$

$$b_k = \left(-\frac{1}{\tau^2} + \frac{\xi_k\omega_k}{\tau}\right) / \left(\frac{1}{\tau^2} + \frac{\xi_k\omega_k}{\tau}\right) \tag{5.26}$$

$$c_k = 1/m\left(\frac{1}{\tau^2} + \frac{\xi_k\omega_k}{\tau}\right). \tag{5.27}$$

Cette manière d'expliciter l'équation du mouvement permet le calcul successif des paramètres. Au pas de temps n, les valeurs de $U_{n,k}$ et $U_{n-1,k}$ sont connues. L'algorithme de contact permet ensuite de calculer la force modale $F_{n,k}$, puis par la suite $U_{n+1,k}$ et finalement $V_{n,k}$.

Critère de stabilité

Ce schéma de calcul est stable si la partie réelle des modules des valeurs propres est inférieure à 1, soit lorsque $\tau < 2/\omega_k$. Cela s'explique par le cas simple où aucune force extérieure, ni d'amortissement ne sont présents dans le contact. Ces conditions se traduisent par : $F_{n,k} = P_k = \zeta_k = 0$. La résolution de l'équation 5.24 considérée comme une suite géométrique $U_{n,k} = U_0\lambda^n$ de raison λ, donne les solutions

$$\lambda^2 = (2 - \omega_k^2\tau^2)\lambda - 1 \tag{5.28}$$

Les valeurs propres λ de ce schéma sont donc égales à,

$$1 - \frac{(\tau\omega_k)^2}{2} \pm i\frac{\tau\omega_k}{2}\sqrt{4 - (\tau\omega_k)^2}. \tag{5.29}$$

où les modules des valeurs propres sont égaux à $|\lambda| = 1$ si $4 - (\tau\omega_k)^2 > 0$.

Discrétisation spatiale

Les deux profils du pneumatique et de la surface de chaussée sont discrétisés en un ensemble de nœuds définis par leurs coordonnées selon l'axe x et y. L'altitude de chaque nœud est connue à tout instant. Toutefois, il peut arriver que, pour une configuration donnée, les nœuds du pneumatique ne coïncident pas directement avec ceux de la texture. Une méthode d'interpolation est alors nécessaire pour estimer les valeurs manquantes.

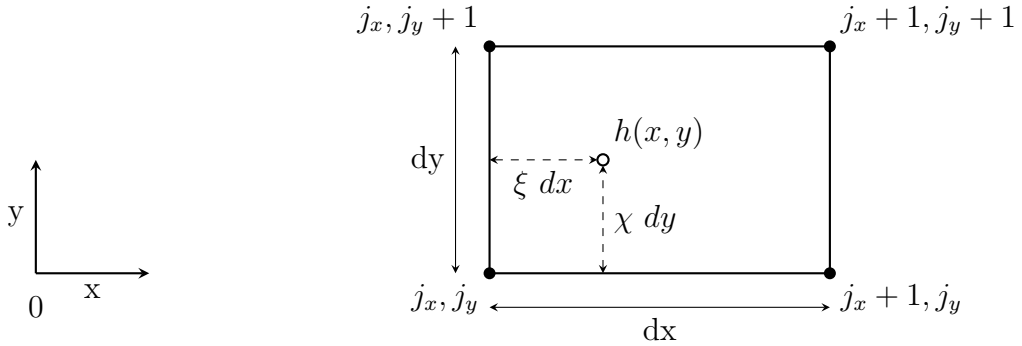


FIGURE 5.5 – Surface interpolée de façon linéaire.

L'interpolation linéaire permet d'estimer une valeur d'altitude inconnue $h(x, y)$ à partir d'une fonction continue entre les quatre points les plus proches du nœud désignés par leur altitudes h_{j_x,j_y}, h_{j_x,j_y+1}, h_{j_x+1,j_y} et h_{j_x+1,j_y+1} (figure 5.5). Si un

repère local est considéré avec comme origine le point x_{j_x}, y_{j_y} et dont les coordonnées (ζ, χ) sont telles que le coin supérieur droit du rectangle a pour coordonnées $(1, 1)$, alors les coordonnées du point (x, y) sont égales à,

$$\zeta = \frac{x - dx(j_x - 1)}{dx} \quad \text{et} \quad \chi = \frac{y - dy(j_y - 1)}{dy}. \tag{5.30}$$

La formule d'interpolation linéaire peut donc s'écrire,

$$\begin{aligned} h(x, y) = (1 - \zeta)(1 - \chi)\, h_{j_x, j_y} + \zeta(1 - \chi)\, h_{j_x+1, j_y} \\ + \chi(1 - \zeta)\, h_{j_x, j_y+1} + \zeta\chi\, h_{j_x+1, j_y+1}. \end{aligned} \tag{5.31}$$

5.1.5 Méthode de pénalité

Le problème de contact est résolu à l'aide d'une méthode de pénalité. Cette méthode consiste à autoriser une pénétration entre les deux surfaces en contact. Des forces de contact sont alors obtenues par le produit de la pénétration et du coefficient de pénalité, calculées par l'expression (5.9). Ces forces de contact correspondent aux réactions causées par un ressort fictif introduit entre les surfaces en contact. Les conditions de Signorini sont donc exactement vérifiées à la limite $\gamma \to \infty$.

La détection de contact est faite par l'algorithme « nœud segment ». La surface de chaussée est dite « esclave » et la surface du pneumatique (cylindre) est dite « maîtresse »(cf. figure 5.6). Les conditions de contact consistent à empêcher les nœuds de la texture de pénétrer à l'intérieur de la surface du pneumatique.

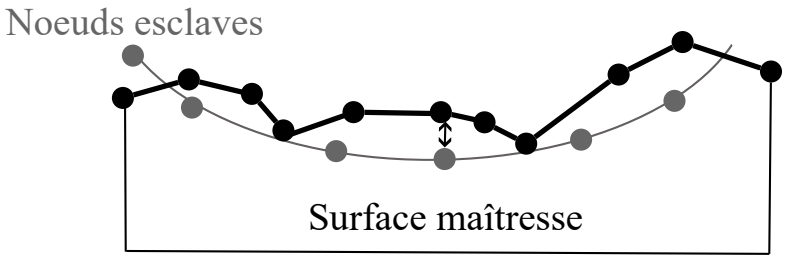


FIGURE 5.6 – Contact entre la surface esclave et la surface maîtresse.

Pour cela, des ressorts fictifs sont positionnés, grâce à la méthode de pénalité, entre la surface esclave et la surface maîtresse. Chaque ressort induit une force de rappel à chaque nœud esclave de la texture, qui se répartit sur un nœud de la

surface du pneumatique opposée. Selon la méthode d'interpolation utilisée, cette force de rappel conduit à des réactions sur un certains nombre de nœuds adjacents de la surface du pneumatique : quatre pour l'interpolation linéaire.

Remarque 51 : Il est important de noter qu'une valeur trop élevée du coefficient de pénalité γ entraîne des problèmes d'instabilité du schéma numérique. Inversement, une valeur faible donne de grandes pénétrations qui n'ont pas de sens physique. Ainsi, le choix du coefficient de pénalité a une influence directe sur les résultats de simulation.

5.1.6 Algorithmes du code ra3d

L'approche numérique est implémentée dans un code nommé ra3d. C'est un programme écrit en langage C. L'algorithme du code ra3d fait appel successivement aux fonctions suivantes (cf. figure 5.7) :

1. Détection de la zone de contact
2. Composition modale
3. Calcul des forces de contact
4. Interpolation de la déformée
5. Réactions aux nœuds
6. Projection modale
7. Intégration temporelle

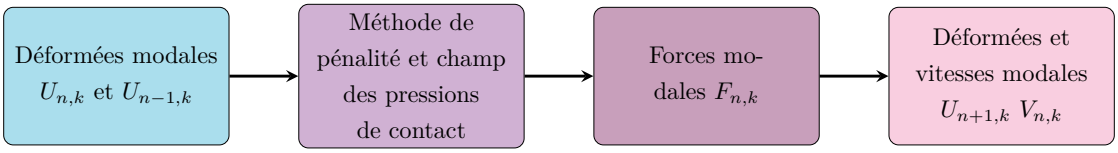


FIGURE 5.7 – Calculs du code ra3d.

L'ensemble des algorithmes du code ra3d sont détaillés dans l'Annexe K.

5.1.7 Fichiers de données

Le code source et les différentes fonctions du code ra3d fonctionnent à partir de fichiers, renseignés par l'utilisateur, qui contiennent tous les paramètres nécessaires à la simulation numérique. Ces fichiers permettent de définir les propriétés du pneumatique, de la surface de chaussée ainsi que des conditions de contact et de simulation.

Descriptions des surfaces - Pneumatique et chaussée

La surface du pneumatique et de la chaussée prennent la forme d'un fichier de topographie avec l'extension .pro. Un exemple de ce type de fichier est donné dans le tableau 5.1. Dans l'en-tête de ces fichiers, plusieurs informations apparaissent comme le nom de la surface, les conditions de mesures des profils, le nombre de nœuds N_x et N_y ou le pas spatial (en μm) selon les axes x et y. Ensuite, l'altitude de chaque point (en mm) de la surface est indiquée en fonction de ses coordonnées (N_x, N_y) soit h_{N_x,N_y}.

TABLEAU 5.1 – Exemple d'un fichier profilométrique utilisé dans le code ra3d.

Valeurs	**Description**
V2	*Version*
Zone1	*Nom de la surface*
XY	*Direction de mesure (XY, XZ, ZY)*
0.2	*Vitesse de la mesure (mm/s)*
200 200	*Nombre de nœuds N_x et N_y*
1 1	*Pas spatial Δ_x et Δ_y (μm)*
0	*Plage de mesure (μm)*
0	*Rayon du stylet (μm)*
-367.3519 -368.2468 ... -254.7517	$h_{1,1}$ $h_{1,2}$ ... h_{1,N_y}
...	...
-258.5987 -244.1357 ... -207.8847	$h_{N_x,1}$ $h_{N_x,2}$ ... h_{N_x,N_y}

Fichiers d'entrée

Le code ra3d se base sur les conditions de contact et de simulation indiquées dans un fichier texte au format .txt. Ce fichier est constitué de plusieurs sections, séparées par des balises, étiquetées par un mot-clé. Quatre sections constituent le fichier : solide supérieur, solide inférieur, condition de contact et condition de simulation.

• **Solide supérieur et solide inférieur**

Les sections concernant le solide supérieur et inférieur décrivent les propriétés des matériaux ainsi que leurs dimensions. La liste ci-après répertorie l'ensemble des propriétés et paramètres constituant ces sections. Les propriétés écrites en gras sont nécessaires au bon fonctionnement du code ra3d.

— **Densité du matériau** (kg/m^3),

— **Module de Young E (Pa)**,

— **Coefficient de Poisson ν (sans unité)**,

— **Épaisseur, largeur et longueur du solide (m)**,

— Rigidité en flexion dans la direction longitudinale et latérale (N/m),

— Raideur par unité de surface S (N/m^3),

— Tension de précontrainte T (N/m),

— **Coefficient d'amortissement modal, identique pour tous les modes du cylindre (kg/s)**,

— Charge statique extérieure (N),

— Prise en compte de la gravité (sans unité),

— **Nombre de modes de déformation avec ou sans prise en compte des trois modes de corps rigide**,

— Raideur de la suspension associée à la translation verticale (N/m),

— Viscance de la suspension associée à la translation verticale (N.s/m),

— Raideur en torsion de la suspension associée à la rotation selon x et y (N/m),

— Viscance de torsion selon x et y de la suspension (N.s/m),

— **Nom du fichier qui contient le profil de rugosité de la surface**,

— **Type de conditions aux limites : supporté par les quatre bords, périodique selon x et supporté sur les bords y ou mode de poutres.**

• **Conditions de contact**

La section indiquant les conditions de contact précise les paramètres cinématique de ce dernier comme la vitesse du solide supérieur par rapport au solide inférieur (en m/s), la durée avant la mise en glissement (en s) et la position initiale du solide supérieur par rapport au solide inférieur. **Dans le cas d'une étude statique, tous ces paramètres sont nuls.**

• **Conditions de simulation**

Enfin, la dernière section concerne les conditions de simulation numérique. Dans cette section, les paramètres suivants sont fixés :

— la durée de la simulation T (s),

— le pas de temps τ (s),

— la fréquence d'enregistrement des résultats (Hz),

— la date du déclenchement de l'enregistrement (s),

— la valeur du coefficient de pénalité γ (N/m^3),

— le schéma d'interpolation linéaire.

Fichier de résultats

De la même façon que le fichier permettant de lancer la simulation numérique du code ra3d, le fichier de résultats est constitué de plusieurs sections, séparées par des balises, étiquetées par un mot-clé. Dans le fichier des résultats, toutes les données du fichier initial sont reprises. Ensuite, plusieurs sections apparaissent et permettent d'avoir, à tous les instants de la simulation, accès à :

— l'affichage des surfaces du pneumatique et de la chaussée,

— l'affichage des déformations du pneumatique ,

— l'affichage du contact entre le pneumatique et la chaussée ,

— l'affichage du champ de pression de contact.

Les données du résultat de code ra3d sont traitées à l'aide d'un code MATLAB permettant de visualiser de manière optimale les paramètres obtenus par la simulation numérique.

5.2 Application au contact pneumatique- éprouvette

5.2.1 Paramétrage du code ra3d

Dans cette partie, les paramètres physiques et numériques utilisés pour simuler le contact entre le pneumatique et la chaussée à l'aide du code ra3d sont détaillés.

Principe de la simulation

La surface de texture utilisée comme une donnée d'entrée est issue d'un scan expérimental réalisé dans le cadre de la campagne en laboratoire. Chaque zone scannée couvre une surface d'environ 4 cm². Cette taille est significativement inférieure à la surface réelle d'une empreinte de contact entre un pneumatique et une chaussée, généralement estimée à environ 225 cm² [35]. **Plutôt que d'agrandir artificiellement la texture pour atteindre cette dimension standard, la démarche adoptée consiste à conserver la taille réelle de la surface scannée et à adapter la modélisation du pneumatique en conséquence.**

Condition de chargement du pneumatique

Le pneumatique n'est pas modélisé dans sa globalité, mais uniquement dans une zone réduite, correspondant à une portion centrale de la surface de contact réelle. Cette stratégie peut être assimilée à un sous-échantillonnage local. Dans cette zone restreinte, la pression est supposée uniforme. En considérant qu'une charge verticale de 2500 N s'exerce sur une surface de 225 cm², la charge équivalente appliquée à une surface de 4 cm², par simple proportion, est de 44 N. Cette valeur est utilisée comme la charge verticale dans la simulation. Cela permet de reproduire le comportement local du contact dans cette zone d'étude réduite.

Choix du coefficient de pénalité γ

Le coefficient de pénalité γ permet de modéliser l'autorisation d'une pénétration entre les deux surfaces en contact (cf. section 5.1.5). Conformément aux travaux de Bazari [135], la valeur γ est fixée à $3,33 \times 10^8$ Pa/m. Cela correspond au rapport entre le module de Young du matériau caoutchouteux du pneumatique et son épaisseur.

Choix du mode d'interpolation

L'interpolation utilisée pour modéliser le contact pneumatique-éprouvette est linéaire. Ce mode d'interpolation est adapté au contexte du problème, dans lequel la grille du pneumatique est volontairement sous-échantillonnée par rapport à sa dimension réelle. Le sous-échantillonnage spatial combiné à cette interpolation linéaire permet de réduire significativement la taille des matrices de calcul manipulées par le code ra3d. Cette approche garantit des temps de calculs raisonnables tout en maintenant une précision suffisante pour l'analyse locale du contact pneumatique-éprouvette.

Choix du nombre de modes du pneumatique

Dans cette étude, le nombre de modes propres du pneumatique est fixé à 10. Ce choix repose sur un compromis entre précision des résultats et temps de calcul. Les fréquences associées à ces dix premiers modes s'étendent de 1404,3 Hz à 20329,8 Hz, couvrant largement la plage fréquentielle d'intérêt du phénomène de contact [35].

Discrétisation temporelle et temps de calcul

Le code ra3d repose sur une résolution temporelle explicite du contact dynamique entre le pneumatique et la texture de chaussée. La simulation est effectuée sur une durée $T = 0,1$ s avec un pas de temps $\Delta t = 10^{-5}$ s, ce qui garantit la stabilité numérique pour l'ensemble des modes dynamiques. Les résultats sont enregistrés toutes les 100 itérations, soit à une fréquence de $f = 100$ Hz, permettant de limiter le volume de données tout en conservant une résolution suffisante pour l'analyse.

Paramètres du pneumatique

Le pneumatique est modélisé comme une plaque orthotrope sous tension reposant sur une fondation élastique, conformément aux travaux de [135, 136]. Les propriétés mécaniques utilisées sont représentatives d'un pneumatique de véhicule léger et de l'étude d'une petite zone au centre du pneumatique. Le tableau 5.2 présente les paramètres physiques et numériques utilisés dans le modèle.

Tableau 5.2 – Propriétés du pneumatique dans le code ra3d.

Description	**Unité**	**Valeur**
Densité - Masse volumique ρ	kg/m^3	1032
Module de Young E	Pa	4×10^6
Coefficient de Poisson ν	-	0,5
Épaisseur	m	0,012
Largeur	m	0,03
Longueur	m	0,03
Rigidité en flexion	N/m	4
Tension de précontrainte	N/m	$4,4 \times 10^4$
Raideur par unité de surface	N/m^3	$5,73 \times 10^5$
Coefficient d'amortissement	-	0,2
Conditions aux limites	-	Périodique en x, supporté en y
Charge verticale	N	44
Raideur de la suspension	N/m	10000
Viscosité de la suspension	N.s/m	3100
Raideur en torsion	N/m	2,76
Viscosité en torsion	N.s/m	50

Paramètres de la texture

La surface de chaussée est modélisée comme une plaque élastique homogène aux propriétés typiques d'une couche de roulement bitumineuse [135, 136]. Les caractéristiques de cette surface sont données dans le tableau 5.4.

TABLEAU 5.3 – Propriétés de la texture de chaussée dans le code ra3d.

Description	Unité	Valeur
Densité - Masse volumique ρ	kg/m^3	2300
Module de Young E	Pa	$3{,}5 \times 10^{10}$
Coefficient de Poisson ν	-	0,3
Épaisseur	m	0,010
Largeur	m	0,03
Longueur	m	0,03
Conditions aux limites	-	Supportée sur les quatre bords

5.2.2 Résultats - Cartographies de pression de contact

La simulation à l'aide du code ra3d permet d'accéder à des cartographies de pression du contact pneumatique-éprouvette. **Le contact pneumatique-éprouvette est modélisé sur une seule zone par éprouvette.** L'ensemble des cartographies de pression est disponible dans l'Annexe L.

Des comparaisons sont réalisées avant et après l'application des facteurs environnementaux de la campagne en laboratoire. Un exemple de cartographie de pression est donné ci-dessous.

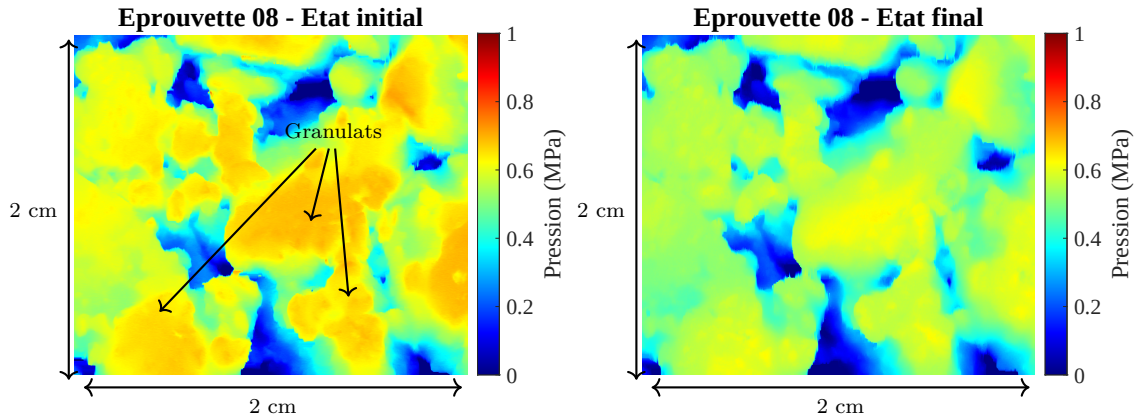


FIGURE 5.8 – Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de l'éprouvette 08 sollicitée par le climat estival et le trafic.

Les cartographies de pression de l'éprouvette 08, aux états initial et final, illustrent l'évolution du contact sous l'effet des sollicitations combinées (climat estival et trafic). À l'état initial, les pressions se concentrent sur quelques points de surface, principalement au sommet des granulats les plus saillants, tandis que les zones en creux restent non sollicitées. Après l'application des sollicitations, la distribution devient plus homogène : la pression s'étend à un plus grand nombre de points de contact, traduisant une surface de contact élargie et une répartition des charges moins concentrée. La pression moyenne diminue également, puisqu'elle se répartit sur un nombre plus important de points.

Ces simulations permettent également de la mesure de deux indicateurs (tableau 5.4) :

1. la pression maximale sur la zone de contact P_{max},
2. la pression moyenne sur la zone de contact P_{moy}.

TABLEAU 5.4 – Valeurs des pressions maximales et moyennes, en MPa, des éprouvettes aux deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Pression maximale (MPa)** P_{max}		**Pression moyenne (MPa)** P_{moy}	
		État initial	**État final**	**État initial**	**État final**
T	01	0,66	0,64	0,37	0,42
T	02	0,91	0,80	0,70	0,62
T	03	0,53	0,50	0,37	0,35
S+T	04	0,67	0,65	0,47	0,48
H+T	05	0,57	0,57	0,36	0,38
H+T	06	1,10	0,95	0,71	0,59
E+T	07	0,90	0,83	0,49	0,55
E+T	08	0,89	0,64	0,55	0,48
S+H+T	09	0,93	0,95	0,71	0,71
S+H+T	10	1,21	1,44	0,57	1,28
S+E+T	11	0,56	0,53	0,40	0,35
S+E+T	12	0,62	0,64	0,34	0,37
H+E+T	13	0,82	0,81	0,70	0,68
H+E+T	14	0,72	0,71	0,48	0,47
S+H+E+T	15	0,85	0,93	0,61	0,74
S+H+E+T	16	0,72	0,42	0,35	0,24

Ces comparaisons mettent en évidence plusieurs types d'évolution entre l'état initial et l'état final des éprouvettes.

— Dans un premier cas (cf. figure 5.9), la moitié des éprouvettes présentent à la fois **une baisse de la pression maximale et de la pression moyenne**. Ce

comportement peut être interprété comme le résultat d'un lissage progressif de la texture avec l'arrachement de parties des granulats. La surface perd alors une partie de sa capacité à concentrer les charges, ce qui conduit à une diminution générale des pressions de contact.

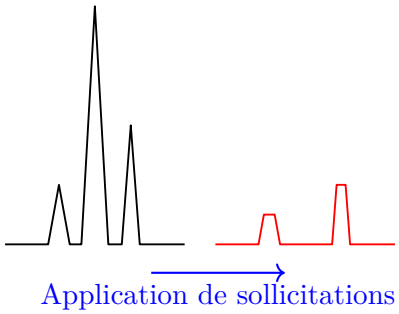


FIGURE 5.9 – Évolution de la texture d'un profil de surface : cas de diminution conjointe de la pression maximale et de la pression moyenne.

— Dans un second cas (cf. figure 5.10), pour 3 éprouvettes, **une baisse de la pression maximale est accompagnée d'une hausse de la pression moyenne**. Ce type d'évolution peut indiquer un étalement plus uniforme des charges sur la surface. Cela peut survenir si les sommets de texture sont atténués, ce qui entraîne une réduction de la rugosité.

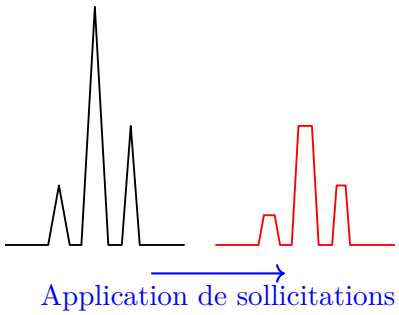


FIGURE 5.10 – Évolution de la texture d'un profil de surface : cas de diminution de la pression maximale et une augmentation de la pression moyenne.

— Enfin, 3 éprouvettes présentent **une augmentation conjointe de la pression maximale et de la pression moyenne** (cf. figure 5.11). Ce phénomène peut être lié : à une réduction localisée de la surface portante causée par la disparition de zones initialement en contact ou au recentrage du contact sur des aspérités résiduelles plus rigides et donc moins usées par les sollicita-

tions. Cela conduit à une concentration des efforts sur des points spécifiques de la surface se situant à des hauteurs plus faibles.

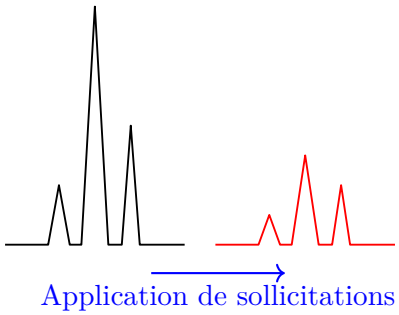


FIGURE 5.11 – Évolution de la texture d'un profil de surface : cas d'augmentation conjointe de la pression maximale et de la pression moyenne.

Afin de compléter cette analyse, les éprouvettes sont regroupées par combinaisons de sollicitations auxquelles elles sont soumises. Cela permet de calculer les valeurs moyennes des écarts relatifs des pressions maximales et des pressions moyennes pour chaque combinaison (cf. tableau 5.5).

TABLEAU 5.5 – Écarts relatifs moyens, en %, des pressions maximales et moyennes pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s)	ΔP_{max} **(%)**	ΔP_{moy} **(%)**
T	$\downarrow -6\%$	$\downarrow -2\%$
S+T	$\downarrow -3\%$	$\uparrow +4\%$
H+T	$\downarrow -6\%$	$\downarrow -10\%$
E+T	$\downarrow -18\%$	$\uparrow 0\%$
S+H+T	$\uparrow +10\%$	$\uparrow +63\%$
S+E+T	$\downarrow -1\%$	$\downarrow -2\%$
H+E+T	$\downarrow -1\%$	$\downarrow -2\%$
S+H+E+T	$\downarrow -16\%$	$\downarrow -4\%$

Les évolutions des pressions maximales et moyennes révèlent des effets différenciés selon la nature et la combinaison des sollicitations appliquées. **Globalement, la majorité des configurations induit une baisse de la pression maximale, traduisant une atténuation des pics de contact liée à l'usure ou à l'écrasement local de la texture.** Cette tendance est particulièrement marquée dans les cas intégrant des sollicitations liées au climat (hivernal ou estival). En revanche, les variations de pression moyenne sont plus contrastées. Certaines sollicitations, comme la combinaison S+H+T, conduisent à une augmentation significative de la pression moyenne (+63 %), suggérant une redistribution plus homogène de la

charge ou un affaissement global de la texture. D'autres configurations présentent des évolutions limitées, voire compensées, traduisant une résistance de la texture globale des éprouvettes.

5.2.3 Analyses - Cartographies de pression de contact

L'évolution du contact pneumatique-éprouvette après l'application de facteurs environnementaux résulte de différents processus d'usures qui modifient la topographie des éprouvettes ainsi que leur capacité à répartir et à supporter les efforts de contact.

Sous l'effet du trafic, les aspérités saillantes s'abrasent, réduisant localement les pressions maximales et transférant la charge du pneumatique vers des zones plus basses. Les reliefs s'homogénéisent en altitude, ce qui redistribue les points de contact et augmente le nombre de zones porteuses pour une même charge. Les sollicitations thermiques, quant à elles, induisent un réarrangement du liant. Les hautes températures ramollissent la matrice et déplacent les granulats, modifiant la configuration des contacts.

Les cycles de gel-dégel créent des gradients thermiques qui fragilisent la cohésion liant/granulats, pouvant engendrer microfissurations et pertes locales de contact. La saumure accentue ces processus : sa pénétration dans les pores et fissures de l'enrobé bitumineux fragilise la matrice et accélère l'arrachement des granulats, surtout en combinaison avec du trafic ou des cycles thermiques. La surface devient alors hétérogène, alternant des zones lissées et des zones à rugosité résiduelle, ce qui modifie profondément la cartographie de pression.

Dans le cas particulier de la combinaison S+H+T (saumure, cycles de gel-dégel, trafic), une synergie apparaît. La surface fragilisée par l'action chimique de la saumure et par les contraintes internes induites par les variations thermiques est davantage polie par le trafic. Le contact pneumatique-éprouvette est profondément modifié, passant d'un état initialement homogène à une configuration où les efforts se concentrent sur quelques points hauts localisés, émergeant au-dessus d'une surface plus basse et homogène. Cela se traduit par une augmentation simultanée de la pression moyenne et de la pression maximale.

Pour les autres combinaisons, l'évolution se caractérise par une baisse générale de la pression maximale, traduisant la disparition progressive de points de contact isolés. Deux situations se distinguent : soit la pression moyenne augmente, signe d'un contact plus étendu et mieux réparti, soit elle diminue, conséquence conjointe de l'abaissement des points hauts et de la perte de zones en contact effectif.

Ces résultats montrent que l'évolution du contact est le produit d'interactions complexes entre les facteurs environnementaux qui agissent conjointement sur la microtexture et la macrotexture des surfaces. Les modifications topographiques observées (lissage, redistribution des points de contact, concentration locale des efforts) sont directement liées aux mécanismes d'usure spécifiques à chaque type de sollicitation. Ces transformations influencent l'intensité et la répartition spatiale des pressions de contact soit, *in fine*, le niveau d'adhérence.

Un paramètre déterminant dans la simulation du contact est le coefficient de pénalité γ, qui conditionne directement la pénétrabilité entre les deux corps. Sa valeur influe sur la répartition des pressions de contact et, par conséquent, sur le taux de portance effectif de la surface. En pratique, un γ trop faible entraîne une pénétration excessive du pneumatique dans les aspérités, surestimant artificiellement la portance, tandis qu'un γ trop élevé rigidifie le contact et conduit à une distribution de pressions localement irréaliste. Pour garantir la représentativité des résultats numériques, il serait nécessaire de calibrer ce coefficient en comparant le taux de portance issu des simulations à celui mesuré expérimentalement sur des surfaces réelles. De tels essais permettraient de définir une plage de valeurs de γ assurant une cohérence entre les pressions simulées et les pressions observées *in situ*. Ce calage constituerait une étape essentielle pour fiabiliser la prédiction des pressions de contact.

Enfin, ces cartographies de pression doivent être interprétées à la lumière de plusieurs limites. Elles proviennent de simulations avec le code ra3d, dont les hypothèses (surface réduite, propriétés du pneumatique, nombre de modes, interpolation) influencent les résultats et peuvent induire des effets d'échelle. Les surfaces, malgré un traitement numérique, présentent localement des anomalies influençant la répartition de charge et sont limité à de faibles dimensions. Finalement, d'autres facteurs non pris en compte, comme les conditions de charge, le niveau de gonflage, la configuration des sculptures ou l'usure des pneumatiques ainsi que les effets dynamiques et latéraux liés au contact, peuvent également influencer les résultats.

Remarque 52 : Il serait intéressant de confronter les résultats obtenus aux mesures issues de moyens expérimentaux plus classiques de caractérisation du contact pneumatique-chaussée, tels que ceux présentés dans le Chapitre 1 (cf. section 1.10.2). Une telle comparaison permettrait de situer ces observations par rapport à des approches de référence et de discuter plus finement la représentativité des distributions de pression, des zones de contact et des indicateurs associés.

5.3 Conclusions et perspectives – Modélisation du contact pneumatique-chaussée

Les travaux présentés dans ce Chapitre 5 mettent en œuvre un outil de simulation numérique du contact pneumatique-chaussée à partir de surfaces réelles scannées dans le cadre de la campagne en laboratoire.

Le code ra3d, basé sur la modélisation du pneumatique comme une plaque orthotrope sur fondation élastique, est utilisé pour générer des cartographies de pression de contact et pour extraire des indicateurs tels que les pressions maximales et moyennes de contact. La comparaison des cartographies de pression de contact d'une même surface, avant et après l'application de différentes combinaisons de facteurs environnementaux, permet de mettre en évidence les mécanismes physiques mis en œuvre dans l'évolution du contact et par extension, dans la modification de l'adhérence des chaussées.

Au-delà des résultats obtenus, cette approche numérique revêt une importance particulière car elle complète les conclusions issues des campagnes expérimentales. Là où les mesures de texture et de frottement caractérisent l'adhérence de manière globale, la simulation permet de l'appréhender comme le résultat direct du contact mécanique entre un pneumatique et une chaussée. L'analyse des distributions locales de pression apporte ainsi un éclairage essentiel sur la façon dont les facteurs environnementaux transforment la texture des surfaces et en conséquence l'adhérence disponible.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion

L'adhérence entre le pneumatique et la chaussée est un paramètre essentiel pour la sécurité routière. Son évolution reste toutefois difficile à prévoir, car elle dépend de multiples facteurs environnementaux, entendus ici comme l'ensemble des sollicitations appliquées au revêtement en service : trafic, conditions climatiques et opérations de viabilité hivernale. Ces sollicitations modifient progressivement l'état de surface des chaussées et influencent directement le niveau d'adhérence disponible pour les usagers.

Cette thèse avait pour objectif d'analyser l'influence de ces facteurs environnementaux sur l'adhérence et de proposer une loi d'évolution permettant de prédire la performance des couches de roulement à moyen et long terme. Pour y parvenir, le travail a combiné une approche expérimentale et une approche numérique.

Deux campagnes expérimentales distinctes et complémentaires ont structuré la démarche. La première, conduite en laboratoire sur seize éprouvettes et avec quatre appareils de caractérisation, a permis d'isoler et de combiner différents facteurs représentatifs de trois années de service (trafic, climat hivernal et estival, épandage de saumure). La seconde, menée à grande échelle sur des planches expérimentales du réseau ATMB, a évalué l'impact des opérations de déneigement par lames en acier, simulant l'équivalent de douze années de viabilité hivernale. Leur séparation méthodologique visait à distinguer, d'un côté, les sollicitations multiples reproduites en conditions contrôlées au laboratoire et de l'autre, l'effet spécifique du raclage mécanique observé en conditions réelles. Cette complémentarité a permis de simuler fidèlement les sollicitations rencontrées sur le terrain et de quantifier leur influence sur l'adhérence. Les résultats de laboratoire montrent que les facteurs environnementaux dégradent l'adhérence selon des mécanismes

non linéaires et non cumulatifs. Le climat estival apparaît comme le plus agressif, surtout lorsqu'il agit en combinaison avec d'autres sollicitations. L'analyse multi-échelles révèle par ailleurs des évolutions divergentes entre microtexture et macrotexture, confirmant la nécessité de croiser les indicateurs pour comprendre les phénomènes d'usure. Les observations de terrain confirment l'impact des lames de déneigement, responsables d'une diminution progressive de la microtexture et de la macrotexture. Trois paramètres majeurs conditionnent la résistance des enrobés à ces sollicitations : la nature des granulats, le type de formulation et les conditions de mise en œuvre. Cette étude souligne également que l'adhérence ne peut être évaluée de manière pertinente qu'à grande échelle.

À partir de ces deux campagnes, une loi d'évolution de l'adhérence a été développée. Elle s'appuie sur deux modèles intermédiaires. Le premier, issu des essais de laboratoire, relie l'adhérence aux principaux facteurs environnementaux. Le second, fondé sur les observations de terrain, décrit la dégradation en fonction du nombre d'opérations de raclage. Bien que fondés sur des hypothèses simplificatrices et un jeu de données limité, ces modèles restituent fidèlement les tendances expérimentales. La loi unifiée qui en résulte offre ainsi aux gestionnaires routiers un outil d'anticipation des effets conjoints des sollicitations environnementales et des pratiques de viabilité hivernale sur la durabilité des revêtements.

Enfin, le travail a été prolongé par une approche numérique reposant sur le code ra3d, appliqué aux surfaces scannées lors de la campagne en laboratoire. Cette modélisation a permis de simuler les cartographies de pression de contact à partir d'états de surface mesurés, offrant une vision plus fine de l'évolution des conditions de contact pneumatique-chaussée en fonction des sollicitations et de mettre en évidence les modifications de la répartition des pressions induites par la dégradation des surfaces.

En conclusion, cette thèse apporte des éléments nouveaux pour comprendre l'évolution de l'adhérence des revêtements routiers en fonction de facteurs environnementaux. Les deux campagnes expérimentales, complétées par une modélisation numérique du contact, mettent en évidence le rôle déterminant des facteurs environnementaux appliqués sur la texture et sur le niveau d'adhérence. Les lois d'évolution proposées constituent une première étape vers une prédiction de l'adhérence en conditions réelles à long terme, tandis que les simulations numériques offrent un éclairage complémentaire sur les modifications du contact pneumatique-chaussée. Ces résultats améliorent la compréhension des mécanismes de dégradation, mais certaines limites doivent être reconnues. Les protocoles expérimentaux reposent

sur des sollicitations simplifiées qui ne reflètent que partiellement la complexité des conditions réelles. Le nombre et le type d'éprouvettes étudiées restent restreints, limitant la représentativité statistique. Les lois établies conservent une formulation volontairement simple et séparée entre les approches en laboratoire et sur le terrain, sans intégrer d'interactions plus complexes. Enfin, les simulations numériques se basent sur un nombre réduit de résultats et se limitent à un contact statique. La limite la plus importante concerne toutefois l'absence de prise en compte du rôle du liant et de l'évolution de ses propriétés dans le temps, que ce soit pour une formulation donnée ou dans la comparaison entre formulations.

Malgré ces contraintes, ce travail constitue une base solide pour de futurs développements et ouvre la voie à la mise en place d'outils prédictifs utiles à la gestion et à la maintenance des réseaux routiers.

Perspectives

Les limites identifiées au cours de ce travail ouvrent plusieurs perspectives de recherche, organisées autour de quatre axes principaux :

1. **Travail expérimental**
   - Étendre les protocoles expérimentaux à des sollicitations plus représentatives des conditions réelles (combinaisons plus variées, nouveaux facteurs, etc.).
   - Prolonger la durée des sollicitations afin de couvrir une durée de vie complète d'une chaussée, soit environ douze années de service pour le réseau ATMB.
   - Augmenter le nombre et la diversité des éprouvettes afin de renforcer la représentativité statistique et d'explorer d'autres formulations d'enrobés.
   - Élargir les configurations étudiées à grande échelle pour évaluer l'impact du raclage, en testant différents types de planches expérimentales et en comparant l'influence de matériaux de lames de déneigement (acier, caoutchouc, composites).
   - Intégrer l'étude du liant bitumineux, en complément de celle des granulats, pour mieux saisir l'évolution globale de l'adhérence des couches de roulement.

2. **Développement de lois d'évolution**
   - Développer des lois plus élaborées, intégrant explicitement les interactions entre les facteurs environnementaux, afin de proposer une modélisation plus complète.
   - Introduire des formes non linéaires et intégrer de nouveaux paramètres, en élargissant la prise en compte à d'autres sollicitations ainsi qu'à l'évolution du liant bitumineux.
   - Tester et valider les lois sur des jeux de données issus de véritables réseaux routiers, afin de vérifier leur robustesse et leur applicabilité en conditions opérationnelles.
3. **Modélisation numérique**
   - Étendre les simulations de contact pneumatique-chaussée à un plus grand nombre de surfaces afin d'améliorer la robustesse des résultats.
   - Passer du cas statique à des simulations dynamiques incluant des contacts en roulement avec ou sans glissement.
   - Explorer l'influence des paramètres numériques et mécaniques (maillage, coefficients de pénalité, propriétés du pneumatique), en réalisant des études de scalabilité du code ra3d.
   - Considérer des surfaces d'essai de dimensions plus proches d'un pneumatique réel ou mettre en parallèle les surfaces expérimentales avec le pneumatique du banc LUG, afin de renforcer la représentativité des simulations.
   - Établir un lien direct entre les résultats numériques et les observations expérimentales, en particulier entre les pressions de contact simulées et les mesures d'adhérence obtenues en laboratoires (coefficients de frottement, paramètres de texture, etc.).
4. **Applicabilité opérationnelle**
   - Exploiter la loi prédictive développée dans cette thèse comme support d'aide à la décision pour anticiper l'évolution de l'adhérence en fonction de facteurs environnementaux.
   - Proposer des recommandations sur le choix des formulations et des compositions d'enrobés, en tenant compte des facteurs environnementaux propres au réseau, afin d'améliorer la durabilité et la sécurité des chaussées.

Références bibliographiques

[1] ATMB. *Qui est ATMB ?* ATMB - Autoroutes et Tunnel du Mont Blanc. URL : https://www.atmb.com/connaitre-atmb/qui-est-atmb/ (visité le 21/07/2025).

[2] Sétra et LCPC. *Conception et dimensionnement des structures de chaussée - Guide technique*. 1er déc. 1994. ISBN : 2-7208-7010-2. URL : https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/conception-dimensionnement-structures-chaussee (visité le 10/02/2025).

[3] Jean Barillot, Hervé Cabanes et Philippe Carillo. *La route et ses chaussées - Manuel de travaux publics*. Eyrolles. Blanche BPT 2. 17 mai 2018. 244 p. ISBN : 978-2-212-67546-7.

[4] Jean-François Corté et Hervé Di Benedetto. *Matériaux routiers bitumineux 1 : description et propriétés des constituants*. Hermes - Lavoisier. Traité MIM - Série Géomatériaux. 15 déc. 2004. 234 p. ISBN : 2-7462-0959-4.

[5] AFNOR. *NF EN 12593 : Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de fragilité Fraass*. Association française de normalisation, 22 août 2015.

[6] *Revêtements des espaces publics - Guide technique*. Collection Références. Bron : Éditions du Cerema, sept. 2018. ISBN : 978-2-37180-278-0.

[7] AFNOR. *NF P18-545 : Granulats - Elément de définition, conformité et codification*. Association française de normalisation, 15 oct. 2021.

[8] Ana Patricia Pérez Fortes. « Calidad y durabilidad de áridos metamórficos empleados en capas de rodadura gallegas bajo el efecto de la sal y una climatología extrema ». These de doctorat. Universidad Complutense de Madrid, 2015. 491 p.

[9] AFNOR. *NF EN 13242+A1 : Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées*. Association française de normalisation, 1er mars 2008.

[10] AFNOR. *NF EN 1097-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval)*. Association française de normalisation, 20 déc. 2023.

[11] AFNOR. *NF EN 1097-2 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation*. 1er avr. 2020.

[12] AFNOR. *NF EN 1097-8 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 8 : détermination du coefficient de polissage accéléré*. Association française de normalisation, 15 avr. 2020.

[13] Gilles Petitet. *Matériaux caoutchouteux : morphologies, formulations, adhérence, glissance et usure*. 1 t. Matériaux 1. Issue : 1. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2008. XI-447 p. ISBN : 978-2-88074-744-2.

[14] François Olard. « Comportement thermomécanique des enrobés bitumeux à basses températures : relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé ». Thèse de doctorat. Institut national des sciences appliquées Lyon, 2003. 221 p.

[15] AFNOR. *NF EN 1426 : Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille*. Association française de normalisation, 13 nov. 2024.

[16] AFNOR. *NF EN 1427 : Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de ramollissement - Méthode Bille et Anneau*. Association française de normalisation, 6 jan. 2018.

[17] Minh Tan Do. « Adhérence des chaussées : de l'étude cognitive aux applications ». Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Université de Bordeaux 1, 29 jan. 2010. 107 p. URL : `https://theses.hal.science/tel-00851220/document`.

[18] CEREMA et IDRRIM. *L'adhérence des chaussées - État de l'art et recommandations - Guide technique*. Références. Oct. 2015. 63 p. ISBN : 978-2-37180-073-1.

[19] MICHELIN. *Le pneu - L'adhérence*. Société de Technologie Michelin 23, rue Breschet, 63000 Clermont-ferrand, jan. 2001. ISBN : 2-06-000311-3.

[20] Desmond Francis MOORE. *The friction of pneumatic tyres*. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam, Pays-Bas, 1975. 220 p. ISBN : 978-0-444-41323-9.

[21] Joël FOUCARD. « Rôle du pneumatique dans le phénomène d'adhérence ». In : Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées 255 (juin 2005), p. 11-22.

[22] Minh Tan DO. « Relation entre la microtexture et l'adhérence ». In : Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées 255 (juin 2005), p. 117-136.

[23] IDRRIM. « Adhérence des chaussées, État des lieux des pratiques au niveau européen ». In : *Note d'information* 34 (juin 2017).

[24] CFTR. « Mesure de l'adhérence des chaussées routières ». In : Cftr - info (mars 2005), p. 8.

[25] LCPC. « Méthode d'essais 50 : Mesure de l'adhérence des chaussées routières et aéronautiques ». In : *Chaussées Dépendances* (avr. 2006). OCLC : 470296911. URL : `https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/MethodeDEssai/MethodeDEssai-LCPC-ME50_2.pdf` (visité le 01/10/2020).

[26] AFNOR. *NF EN 13036-4 : 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*. Association française de normalisation, 1er mars 2012.

[27] AFNOR. *NF P98-220-2 : Essais relatifs aux chaussées - Essais liés à l'adhérence - Partie 2 : méthode permettant d'obtenir un coefficient de frottement longitudinal (adhérence longitudinale)*. Association française de normalisation, 1er nov. 1994.

[28] AFNOR. *XP CEN/TS 15901-7 : Caractéristiques de surface des routes et aéroports - Partie 7 : mode opératoire de détermination de l'adhérence d'un revêtement de chaussée à l'aide d'un dispositif à coefficient de frottement longitudinal fixe (CFLG) : le GripTester*. Association française de normalisation, 1er nov. 2011.

[29] AFNOR. *NF P98 220-4 : Essais relatifs aux chaussées - Essais liés à l'adhérence - Partie 4 : méthode permettant d'obtenir un coefficient de frottement transversal avec un appareil SCRIM*. Association française de normalisation, 1er déc. 1996.

[30] AFNOR. *XP CEN/TS 15901-6 : Caractéristiques de surface des routes et aéroports - Partie 6 : mode opératoire de détermination de l'adhérence d'un revêtement de chaussée en procédant au mesurage du coefficient de frottement transversal (CFTS) : le SCRIM*. Association française de normalisation, 1er nov. 2011.

[31] Michel GOTHIÉ. « Les mesures de l'adhérence des chaussées en France et leur interprétation ». In : Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées 255 (juin 2005), p. 53-69.

[32] AFNOR. *NF EN 12697-49 : Détermination du coefficient de frottement après polissage*. Association française de normalisation, mars 2014.

[33] Yves DELANNE. « Adhérence des pneumatiques, adhérence conventionnelle, comparaison et liaison avec la texture ». In : Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées 255 (juin 2005), p. 35-49.

[34] Philippe DENIMAL. « Le pneumatique et l'adhérence ». In : *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 185 (1993), p. 35-38. URL : https://hal.science/hal-05503008.

[35] Philippe REYNAUD et al. « Approche tribologique du contact pneu-chaussée ». In : *27ème Journées Internationales Francophones de Tribologie*. Nantes, France, 27 mai 2015, p. 8.

[36] Yves DELANNE et al. *Potentiel d'adhérence du couple pneumatique/chaussée*. LCPC. Routes et sécurité routière CR 43. 2006. 122 p. ISBN : 2-7208-2478-9.

[37] A. SCHALLAMACH. « Friction and abrasion of rubber ». In : *Rubber Chemistry and Technology* 31 (1958), p. 982-1014. DOI : 10.5254/1.3542365.

[38] Sarah Benart. « Mécanisme de vieillissement de l'interphase adhésive caoutchouc-renfort métallique dans les pneumatiques : de la physico-chimie de l'interface aux tests d'adhérence avec le caoutchouc ». Français. NNT : 2019BORD0374 ; TEL : tel-04841984. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux, 2019. URL : https://theses.hal.science/tel-04841984.

[39] Jonathan Gerthoffert. « Prévision des performances de freinage des avions sur les pistes contaminées à partir des mesures de frottement ». Thèse de doctorat. Bretagne-Loire, 17 sept. 2017. 343 p.

[40] Dan Zhao. « Evolution de l'adhérence des chaussées : influence des matériaux, du vieillissement et du trafic - variations saisonnieres ». Thèse de doctorat. Ecole centrale de Nantes, 14 oct. 2011. 197 p.

[41] Yosra Hichri. « Adhérence des chaussées contaminées par des particules ». These de doctorat. Bouguenais : Ecole centrale de Nantes, 2018. 224 p. (Visité le 25/11/2020).

[42] R F Lambourn et H E Viner. « Friction tests on contaminated road surfaces ». In : (1er jan. 2006), p. 34.

[43] W R Tyfour. « Tire Skid Resistance on Contaminated Wet Pavements ». In : *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering* 3.2 (jan. 2009), p. 119-124. ISSN : 1995-6665.

[44] Roger B Shakely, John Jewett Henry et Robert J Heinsohn. « Effects of Pavement Contaminants on Skid Resistance ». In : *Transportation Research Record* 788 (), p. 23-28.

[45] Ping Cao et al. « Effects of Contaminants on Skid Resistance of Asphalt Pavements ». In : *Traffic and Transportation Studies 2010*. Seventh International Conference on Traffic and Transportation Studies (ICTTS) 2010. Kunming, China : American Society of Civil Engineers, 26 juill. 2010, p. 1341-1351. ISBN : 978-0-7844-1123-0. DOI : 10.1061/41123(383)128.

[46] Vincent Lédée, Gérard Delalande et Pierre Dupont. « Adhérence et granulats ». In : Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées 255.4578 (juin 2005), p. 91-116. URL : https://www.ifsttar.fr/collections/BLPCpdfs/blpc_255_91-116.pdf.

[47] Adolf G. Pokorny. « Classification des granulats pour les couches de roulement des chaussées ». In : Bulletin de l'Association International de Géologie de l'ingénieur 30 (1984), p. 119-121.

[48] Yvan Brosseaud et Valéry Le Turdu. « Adhérence des revêtements de chaussées routières ». In : Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées 255 (juin 2005), p. 71-90.

[49] Sétra. « Guide méthodologique - Viabilité hivernale - Approche globale ». In : (fév. 2009). URL : https://doc.cerema.fr/Default/digital-viewer/C-18021.

[50] Comité technique B.2 Viabilité hivernale. *Développement international des méthodes d'application des fondants routiers : état de l'art et meilleures pratiques*. Rapport technique 2019R08FR. PIARC, 2019. 38 p.

[51] AFNOR. *NF EN 16811-1 : Matériels de viabilité hivernale - Fondants routiers - Partie 1 : chlorure de sodium - Exigences et méthodes d'essai*. Association française de normalisation, 5 nov. 2016.

[52] AFNOR. *NF EN 16811-2 : Matériels de viabilité hivernale - Fondants routiers - Partie 2 : chlorure de calcium et chlorure de magnésium - Exigences et méthodes d'essai*. Association française de normalisation, 5 nov. 2016.

[53] AFNOR. *XP CEN/TS 16811-3 : Équipements de viabilité hivernale - Fondants routiers - Partie 3 : autres fondants routiers solides et liquides - Exigences et méthodes d'essai*. Association française de normalisation, 23 sept. 2020.

[54] O.C.D.E. *Dégâts hivernaux causés aux chaussées : rapport*. ISSN : 0250-3808. Paris, France : O.C.D.E, mai 1972, p. 96.

[55] W Brand et al. *Laboruntersuchungen über die Einfluss von Auftausalzen auf die einzelnen Komponenten des bituminösen Mischgutes (Études en laboratoire sur l'influence des sels de déglaçage sur les composants individuels du mélange bitumineux)*. 1968.

[56] G Zichner. « Action des sels de fusion et des pneux à clous sur la tenue des revêtements routiers bitumineux ». In : *Revue Générale des Routes et Aérodromes (RGRA)* 446 (sept. 1969).

[57] B F Kallas. « Performance of Asphalt Pavements Subjected to De-Icing Salts ». In : *Highway Research Record* 24 (), p. 49-61.

[58] FEBELCEM et Ir C Ployaert. *Concevoir des ouvrages en béton résistant au gel-dégel et aux sels de déverglaçage*. Nov. 2012.

[59] Van Thang Vu. « Etude expérimentale et numérique du comportement au gel et au dégel des enrobés bitumineux partiellement saturés ». These de doctorat. Ecole centrale de Nantes, 18 déc. 2017. URL : https://www.theses.fr/2017ECDN0049 (visité le 13/12/2021).

[60] Morten Mejlholm et al. « Dihydrate de chlourure de sodium – Attention, risque de chaussée glissante ! » In : *XIe congrès international de la viabilité hivernale*. Sapporo, Japon, 2002.

[61] Jean Livet et LR Nancy - SETRA. « Note d'information 67 : Le comportement hivernal particulier de certaines surfaces routières ». In : *Chaussées Dépendances* (avr. 1991), p. 8.

[62] Jean Livet. « Accident sur chaussée glissante, sèche et salée ? » Diapositves. Diapositves. URL : https://www.viabilite-hivernale.developpement-durable.gouv.fr/accidents-sur-chaussee-seche-et-salee-a11418.html.

[63] Jean Livet. « La route en présence de verglas : phénomènes, adhérence, prévisions ». In : *Revue Générale des Routes et Aérodromes (RGRA)* 639 (mars 1987), p. 72-80.

[64] Jean Livet. « Evaluation des bétons bitumineux drainants en termes d'exploitation hivernale d'un réseau routier ». In : *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 204 (juill. 1996), p. 15-23.

[65] Ahmed Abohassan, Karim El-Basyouny et Tae J. Kwon. « Exploring the associations between winter maintenance operations, weather variables, surface condition, and road safety : A path analysis approach ». In : *Accident Analysis & Prevention* 163 (1er déc. 2021), p. 106448. ISSN : 0001-4575. DOI : 10.1016/j.aap.2021.106448. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457521004796 (visité le 17/04/2023).

[66] Sétra. *Viabilité hivernale - Stratégies de choix des outils de raclage et d'épandage*. 1er déc. 2009. 74 p. URL : https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/viabilite-hivernale-strategies-choix-raclage-epandage?v=5621.

[67] J.J Roussel et CETE de l'Est. « Note d'information 66 : Déneigement – Techniques de raclage et matériels ». In : *Chaussées Dépendances* (mars 1991), p. 4.

[68] Sétra. *Viabilité hivernale - Fiches pratiques "aide-mémoire" - Série II - fiche 07 - Stratégie d'élimination de la neige*. Fiches pratiques aide-mémoire Viabilité hivernale 2. Déc. 2013. 34 p. URL : https://dtrf.cerema.fr/pdf/pj/Dtrf/0006/Dtrf-0006572/DT6572.pdf?openerPage=notice&qid=sdx_q0.

[69] Alexandre Lacoffe. « Étude des causes de dégradation du marquage au sol sur les routes du Québec ». Maîtrise ès sciences appliquées. École Polytechnique de Montréal, août 2014. 128 p. URL : https://publications.polymtl.ca/1537/ (visité le 11/04/2023).

[70] Zhenzhong Tang. « Polishing and skid-resistance of road surfaces ». Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 17 oct. 2007. 279 p.

[71] C Tourenq et D Fourmaintraux. « Propriétés des granulats et glissance routière ». In : Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées 51 (avr. 1971), p. 61-69.

[72] National Research Council (U.S.) *Skid resistance*. Synthesis of highway practice 14. Washington, DC : Highway Research Board, 1972. 66 p. ISBN : 978-0-309-02024-4.

[73] Pierre Dupont et Claude Tourenq. « Granulats et microrugosité ». In : Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées 185 (juin 1993), p. 145-151.

[74] Wiyao Edjeou. « Analyse multiéchelle de la texture des chaussées - effet sur l'adhérence des revêtements routiers ». Thèse de doctorat. École centrale de Nantes, 15 déc. 2021. URL : https://theses.hal.science/tel-03651239 (visité le 16/03/2023).

[75] Minh Tan Do et al. « Evolution of road-surface skid-resistance and texture due to polishing ». In : *Wear*. Metrology and Properties of Engineering Surfaces 266.5 (15 mars 2009), p. 574-577. ISSN : 0043-1648. DOI : 10.1016/j.wear.2008.04.060. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164808003128 (visité le 26/02/2024).

[76] A. D. Nataadmadja et al. « Quantifying aggregate microtexture with respect to wear—Case of New Zealand aggregates ». In : *Wear*. 20th International Conference on Wear of Materials 332-333 (1er mai 2015), p. 907-917. ISSN : 0043-1648. DOI : 10.1016/j.wear.2014.11.028. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164814003652 (visité le 06/03/2024).

[77] Minh-Tan Do. « Adhérence des chaussées ». In : *Techniques de l'Ingénieur* Mécanique | Frottement, usure et lubrification (TRI4650 V1 10 mars 2015), p. 20. URL : https://www.techniques.ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-routes-les-ponts-et-les-joints-42235210/adherence-des-chaussees-tri4650/ (visité le 25/02/2025).

[78] Douglas James Wilson. *The effect of rainfall and contaminants on road pavement skid resistance*. National Library of New Zealand Catalogue. University of Auckland, avr. 2013. 186 p. ISBN : 978-0-478-40724-2.

[79] François Brillet et Michel Gothié. « Variations saisonnières de l'adhérence des chaussées mesurée par l'appareil SCRIM ». In : Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées 127 (oct. 1983), p. 37-52.

[80] Barry J Hill et John J Henry. « Short-Term, Weather-Related Skid Resistance Variations ». In : *Transport.ation Research Record* 836 (), p. 76-81.

[81] Daniel Eisenberg. « The mixed effects of precipitation on traffic crashes ». In : *Accident ; Analysis and Prevention* 36.4 (juill. 2004), p. 637-647. ISSN : 0001-4575. DOI : 10.1016/S0001-4575(03)00085-X.

[82] Minh Tan Do et Veronique Cerezo. « Road surface texture and skid resistance ». In : *Surface Topography : Metrology and Properties* 3.4 (oct. 2015), p. 043001. ISSN : 2051-672X. DOI : 10.1088/2051-672X/3/4/043001.

[83] AFNOR. *NF EN ISO 13473-1 : Caractérisation de la texture d'un revêtement de chaussée à partir de relevés de profils de la surface - Partie 1 : détermination de la profondeur moyenne du profil*. Association française de normalisation, 1er mars 2019.

[84] AFNOR. *NF EN 13036-1 : Caractéristiques de surface des routes et aérodromes - Méthodes d'essai - Partie 1 : mesurage de la profondeur de macrotexture de la surface d'un revêtement à l'aide d'une technique volumétrique à la tâche*. Association française de normalisation, 1er sept. 2010.

[85] ISO. « ISO 4287 : Specification geometrique des produits (GPS) - Etat de surface : Methode du profil - Termes, definitions et parametres d'état de surface ». 1er avr. 1997.

[86] Veronique Cerezo et al. « Mesure de la macrotexture des revêtements routiers à l'aide du Rugo 2 : bilan de dix années d'évolution ». In : *Revue Générale des Routes et Aérodromes (RGRA)* 907 (1er jan. 2012), p. 36-42.

[87] Fabienne Farcas. « Etude d'une methode de simulation du vieillissement sur route des bitumes ». These de doctorat. Paris 6, 1er jan. 1996. (Visité le 24/02/2025).

[88] M'hammed Merbouh. « Contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux - Influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue ». Thèse de doctorat. Bordeaux, 2010. 264 p.

[89] K T Diringer et R T Barros. « Predicting the Skid Resistance of Bituminous Pavements Through Accelerated Laboratory Testing of Aggregates ». In : *Surface Characteristics of Roadways : International Research and Technologies*. ASTM Selected Technical Papers. WE Meyer, J Reichert, 1er jan. 1990, p. 61-76/602. isbn : 978-0-8031-1391-6.

[90] P G Roe et S A Hartshorne. « The Polished Stone Value of aggregates and in-service skidding resistance ». In : *Transport Reseach Laboratory* 322 (1998), p. 32. issn : 0968-4107.

[91] Heriberto Pérez-Acebo et al. « A skid resistance prediction model for an entire road network ». In : *Construction and Building Materials* 262 (30 nov. 2020), p. 120041. issn : 0950-0618. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2020.120041.

[92] K. Athiappan et al. « Prediction modeling of skid resistance and texture depth on flexible pavement for urban roads ». In : *Materials Today : Proceedings* 52 (2022), p. 923-929. issn : 22147853. doi : 10.1016/j.matpr.2021.10.304.

[93] F.W Carter. « On the action of a locomotive driving wheel ». In : 112.760 (15 avr. 1926), p. 151-157. issn : 0950-1207.

[94] Valentin L. Popov. *Contact Mechanics and Friction - Physical Principles and Applications*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2017. isbn : 978-3-662-53080-1 978-3-662-53081-8. doi : 10.1007/978-3-662-53081-8.

[95] Kenneth Langstreth Johnson. *Contact mechanics*. Cambridge : Cambridge university press, 1985. 463 p. isbn : 978-0-521-34796-9.

[96] L Landau et E Lifchitz. *Physique théorique - Mécanique*. Ellipses. T. 1. Mir. Moscou, 1982. 240 p. isbn : 5-03-000198-0.

[97] Yann DELANNE et Michel GOTHIÉ. « Influence de l'état de mouillage sur les performances d'adhérence des pneumatiques ». In : Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées 4564.255 (juin 2005), p. 23-34.

[98] Jonas BOUSMAT. « Expériences et modèles du frottement élastomère sur chaussée en roulement/glissement ». Français. NNT : 2018LYSEC011 ; TEL : tel-04163157. Thèse de doct. Université de Lyon, 2018. URL : https://theses.hal.science/tel-04163157.

[99] S. ECKELS. « Distribution of Wheel Loads Through Various Rubber Tires ». In : *Proceedings of the 8th Annual Meeting of the Highway Research Board*. Meeting held in Washington, D.C., 13–14 December 1928. Washington, D.C. : National Research Council, Highway Research Board, 1929, p. 192-210.

[100] E. W. Jr. O'NEIL. « Measurement of Pneumatic Tire Contact Pressure for Static Loading ». Mém. de mast. Raleigh, NC : North Carolina State University, Department of Civil Engineering, 1969.

[101] S. A. LIPPMANN. « Effects of Tire Structure and Operating Conditions on the Distribution of Stress Between the Tread and the Road ». In : *The Tire Pavement Interface*. Sous la dir. de M. G. POTTINGER et T. J. YAGER. ASTM STP 929. Philadelphia : American Society for Testing et Materials, 1985, p. 91-109.

[102] W. E. HOWELL, S. E. PEREZ et W. A. VOLGER. « Aircraft Tire Footprint Forces ». In : *The Tire Pavement Interface*. Sous la dir. de M. G. POTTINGER et T. J. YAGER. ASTM STP 929. Philadelphia : American Society for Testing et Materials, 1985, p. 110-124.

[103] Kurt M. MARSHEK et al. « Experimental determination of pressure distribution of truck tire-pavement contact ». In : *Transportation Research Record* (1986). URL : https://api.semanticscholar.org/CorpusID:51316721.

[104] R. A. DOUGLAS. *Tyre/road Contact Stresses Measured and Modelled in Three Coordinate Directions*. Research Report 384. Wellington, New Zealand : New Zealand Transport Agency, 2009. URL : https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/384/docs/384.pdf.

[105] Smail Hamlat et Ferhat Hammoum. « Évaluation de la distribution des pressions locales de contact entre un pneumatique et un revêtement routier ». In : *CFM 2009 – 19ème Congrès Français de Mécanique*. HAL Id : hal-03391232. Marseille, France, août 2009. URL : https://hal.science/hal-03391232.

[106] M. D. De Beer et C. Fisher. *Contact Stresses of Pneumatic Tires Measured with the Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array (VRSPTA) System for the University of California at Berkeley (UCB) and the Nevada Automotive Test Center (NATC)*. Rapp. tech. Retrieved from eScholarship. UC Davis : University of California Pavement Research Center, 1997. URL : https://escholarship.org/uc/item/6vc4p8xt.

[107] Tekscan. *Tire Analysis*. Page consultée le 25 mars 2026. 2026. URL : https://www.tekscan.com/products-solutions/tire-analysis (visité le 25/03/2026).

[108] FUJIFILM. *Prescale - film de mesure de pression*. Page consultée le 25 mars 2026. URL : https://www.fujifilm.com/fr/fr/business/inspection/measurement-film/prescale (visité le 25/03/2026).

[109] Abhinav Kumar et Ankit Gupta. « Review of Factors Controlling Skid Resistance at Tire-Pavement Interface ». In : *Advances in Civil Engineering* 2021 (5 oct. 2021), p. 1-16. DOI : 10.1155/2021/2733054.

[110] Robin VAILLOT. *PIRD - Caractérisation de l'adhérence des couches de roulement*. Rapport de PIRD. INSA Lyon, 17 juin 2019, p. 62.

[111] Florian GIRERD. *PIRD - Adhérence des chaussées autoroutières*. INSA Lyon, 13 fév. 2021, p. 71.

[112] Mélanie DELENNE. *PIRD - Adhérence des chaussées autoroutières*. INSA Lyon, 27 fév. 2022, p. 68.

[113] Marie Charbonnel. *PIRD - Prise en compte des conditions environnementales lors de la caractérisation de l'adhérence des chaussées autoroutières*. INSA Lyon, 23 jan. 2023, p. 81.

[114] Céleste Jonquière. *PIRD - Adhérence des chaussées autoroutières*. INSA Lyon, 29 jan. 2024, p. 92.

[115] Mohamed Bouteldja et Garance Liaboeuf. *Rapport interne IA 2025-05 - Impact de cycles de polissage sur l'état de surface d'une éprouvette de granulats*. Cerema, jan. 2025.

[116] IDRRIM. *Recyclage des agrégats d'enrobés dans les mélanges bitumineux à chaud - État de l'art et recommandations*. 30 août 2021. 84 p. ISBN : 978-2-37180-528-6. URL : https://www.cerema.fr/system/files/product/publication/2023/08/recyclage_agregats_dtrf_2.pdf (visité le 01/11/2024).

[117] Smail HAMLAT et al. « Optimisation de la méthode d'essai sur la résistance au polissage accéléré des matériaux de chaussées avec la machine Wehner et Schulze ». In : Aix en Provence, 9 mai 2012.

[118] M. GUIBERT et al. « A versatile flexure-based 6-axes force/torque sensor and its application to tribology ». In : *Review of Scientific Instruments* 92.8 (1er août 2021), p. 085002. ISSN : 0034-6748, 1089-7623. DOI : 10.1063/5.0057266.

[119] Raymond BRACH et Matthew BRACH. « The Tire-Force Ellipse (Friction Ellipse) and Tire Characteristics ». In : *SAE Technical Paper Series*. SAE 2011 World Congress & Exhibition. ISSN : 0148-7191. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States : SAE International, 12 avr. 2011, p. 10. DOI : 10.4271/2011-01-0094.

[120] G. FORTUNATO et al. *On the dependency of rubber friction on the normal force or load : theory and experiment*. 4 déc. 2015. DOI : 10.48550/arXiv.1512.01359. arXiv : 1512.01359[cond-mat].

[121] *Le déneigement chez ATMB*. Vidéo en ligne. 12 mai 2022. URL : https://www.youtube.com/watch?v=QvufOtL2ruA&ab_channel=ATMB-VivreenHaute-Savoie.

[122] ATMB. *Le service hivernal : une expertise ATMB*. ATMB - Autoroutes et Tunnel du Mont Blanc. URL : https://www.atmb.com/connaitre-atmb/service-hivernal-expertise-atmb/ (visité le 07/08/2024).

[123] AFNOR et BNTRA CN GRA. *NF EN 13043 : Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation*. Association française de normalisation, 1er août 2003.

[124] LCPC. *Méthode d'essai n°46 - Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques - Exécution et exploitation des relevés profilométriques*. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées 46. Juill. 2009. 84 p. ISBN : 1167-489X. URL : https://www.ifsttar.fr/

fileadmin/user_upload/editions/lcpc/MethodeDEssai/MethodeDEssai-LCPC-ME46_4.pdf (visité le 18/03/2025).

[125] Vectra Equipment. « APL - Mesure en continu de l'uni longitudinal ». URL : https://www.nextroad.com/wp-content/uploads/2021/11/VE19FMAT_APL_FR_VP2.pdf (visité le 18/03/2025).

[126] LCPC. *Méthode d'essai n°49 - Mesure et interprétation du profil en travers*. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées 49. Sept. 2001. 45 p. ISBN : 2-7208-3405-8.

[127] AFNOR. *NF P98-219-3 : Essais relatifs aux chaussées - Essais lies à l'uni transversal - Partie 3 : mesure dynamique discontinue du profil en travers*. Association française de normalisation, 1er août 1999.

[128] GNCDS – Sous-groupes Uni longitudinal, Adhérence et Bruit et al. *Méthodes de mesure des principales caractéristiques de surface des revêtements de chaussée*. 2 déc. 2009.

[129] AFNOR et UNM 454. *NF EN 15583-1 : Matériels de viabilité hivernale - Lames de déneigement - Partie 1 : description du produit et exigences*. Association française de normalisation, 1er mars 2010.

[130] Jean-Luc Gautier. « Vers une pérennité accrue des performances acoustiques des revêtements routiers ». In : *Acoustique & Technique* Spécial Bruit de roulement.32 (2003), p. 28-33.

[131] Veronique Cerezo. « Relation entre l'évolution de l'adhérence des revêtements routiers et l'accidentologie ». In : PRAC 2010 : Prévention des Risques et Aides à la Conduite (mai 2010). URL : https://www.researchgate.net/publication/48417168_Relation_entre_l'evolution_de_l'adherence_des_revetements_routiers_et_l'accidentologie.

[132] Julien Cesbron et Hai Ping Yin. « Contact analysis of road aggregate with friction using a direct numerical method ». In : *Wear* 268.5 (11 fév. 2010), p. 686-692. ISSN : 0043-1648. DOI : 10.1016/j.wear.2009.11.005.

[133] J. Cesbron et al. « Numerical and experimental study of multi-contact on an elastic half-space ». In : *International Journal of Mechanical Sciences* 51.1 (1er jan. 2009), p. 33-40. ISSN : 0020-7403. DOI : 10.1016/j.ijmecsci.2008.11.003. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740308001720 (visité le 25/08/2025).

[134] Haitao GE et al. « Multiscale analysis of tire and asphalt pavement interaction via coupling FEM–DEM simulation ». In : *Engineering Structures* 256 (1er avr. 2022), p. 113925. ISSN : 0141-0296. DOI : 10.1016/j.engstruct.2022.113925. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029622000827 (visité le 25/08/2025).

[135] Zakia BAZARI. « Modélisation du contact pneumatique/chaussée pour l'évaluation du bruit de roulement ». These de doctorat. Ecole Centrale de Lyon : Université de Lyon, 2018. 191 p.

[136] Alain LE BOT et al. « Statistical analysis of vibration in tyres ». In : *Journal of Sound and Vibration* 392 (mars 2017), p. 187-199. ISSN : 0022460X. DOI : 10.1016/j.jsv.2016.12.030.

[137] Antonio SIGNORINI. « Questioni di elasticità non lineare ». In : *Conferenze tenute presso*. Rome, 1959, p. 18. URL : http://www.scienzadellecostruzioni.co.uk/Documenti/Signorini-Prima.pdf (visité le 24/07/2025).

[138] Wolfgang KROPP et al. « On the sound radiation of a rolling tyre ». In : *Journal of Sound and Vibration* 331.8 (9 avr. 2012), p. 1789-1805. ISSN : 0022-460X. DOI : 10.1016/j.jsv.2011.11.031.

[139] Philippe COCHARD. *Cours sur la microscopie confocale*. 8 déc. 2020. URL : https://studylibfr.com/doc/2101711/la-microscopie-confocale---tri (visité le 08/12/2020).

[140] HIROX. *3D Imaging Solutions - The New Generation Digital Microscope - DIGITAL MICROSCOPE KH-7700*. URL : https://hirox-europe.com/wp-content/uploads/2019/09/Hirox-KH-7700-catalog.pdf (visité le 01/11/2024).

[141] MATLAB. *pwelch - Welch's power spectral density estimate - MATLAB*. URL : https://fr.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html (visité le 26/07/2025).

[142] MATLAB. *xcorr - Cross-correlation - MATLAB*. URL : https://fr.mathworks.com/help/matlab/ref/xcorr.html (visité le 26/07/2025).

Annexe A – Étude météorologique

Cette annexe présente les données météorologiques issues du réseau ATMB, utilisées pour définir les protocoles de sollicitations climatiques (cycles de gel-dégel et de hautes températures) appliqués dans la campagne en laboratoire.

Les stations météorologiques du réseau ATMB sélectionnées pour la conception des protocoles des sollicitations climatiques renseignent, toute l'année et à chaque heure :

— les températures de surface de chaussée et de l'air (°C),

— l'humidité relative (% HR),

— la présence de neige et divers autres facteurs.

Ces stations sont au nombre de 9 et sont choisies pour leur représentativité du climat sur l'ensemble du réseau ATMB. Elles sont localisées dans la figure A.1.

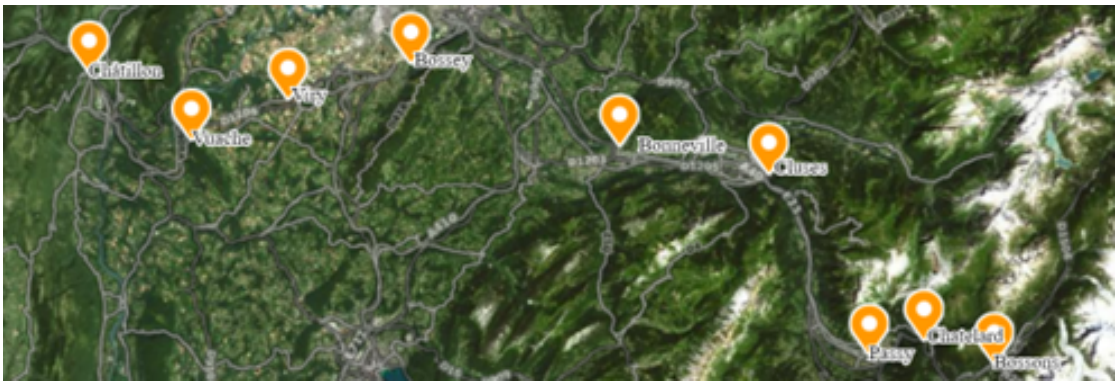


FIGURE A.1 – Localisation des 9 stations météorologique sur le réseau ATMB.

Cycles de gel-dégel - Climat hivernal

Les paramètres de configuration des cycles de gel-dégel se basent sur les données du réseau ATMB de 2013 à 2017 s'établissant entre **le 01 novembre et le 28**

février des stations météorologiques préalablement présentées. Dans le tableau A.1, plusieurs indicateurs sont relevés et mesurés comme :

— le nombre de jours moyen durant lesquels les températures de surfaces de chaussées varient entre -1°C et +1°C,

— les températures des chaussées et de l'air les plus faibles et les plus élevées ainsi que le pourcentage moyen d'humidité relative.

Dans ce travail, il est considéré une journée où les températures varient d'une valeur inférieure ou égale à -1°C à une valeur supérieure ou égale à +1°C comme un cycle de gel-dégel.

Tableau A.1 – Relevés climatologiques du réseau ATMB sur la période 2013-2017 entre le 01 novembre et le 28 février.

Jours de gel-dégel	Températures (°C)				Humidité relative (% HR)
	Chaussée		Air		
	Minimale	Maximale	Minimale	Maximale	
50	−11,92	24,32	−13,34	21,58	81,2

Cycles de hautes températures - Climat estival

Les paramètres de configuration des cycles de hautes températures se basent sur les données météorologiques de stations du réseau ATMB de 2013 à 2017 s'établissant entre **le 01 juin et le 31 août**. Dans le tableau A.2, plusieurs indicateurs sont relevés et mesurés comme :

— le nombre de jours moyen durant lesquels les températures de surfaces de chaussées dépassent les + 45 °C,

— les températures des chaussées et de l'air les plus faibles et les plus élevées ainsi que le pourcentage moyen d'humidité relative.

Dans ce travail, il est considéré qu'une journée durant laquelle les températures de surface de chaussées dépassent 40°C forme un cycle de hautes températures.

Tableau A.2 – Relevés climatologiques du réseau ATMB sur la période 2013-2017 entre le 01 juin et le 31 août.

Jour de hautes températures	Températures (°C)				Humidité relative (% HR)
	Chaussée		Air		
	Minimale	Maximale	Minimale	Maximale	
33	7,2	57,4	3,8	50	67,85

Annexe B – Microscope confocal

Cette annexe présente le microscope confocal utilisé pour la caractérisation des surfaces des éprouvettes de la campagne en laboratoire. Après un rappel du principe de fonctionnement de l'appareil, l'équipement employé ainsi que ses principales caractéristiques techniques sont détaillés.

Le microscope confocal est un instrument optique permettant de réaliser la visualisation en trois dimensions d'objets, ici de granulats. Le principe du microscope confocal est le suivant. Un faisceau laser est émis et réfléchi par un miroir dichroïque jusqu'à des miroirs galvanométriques qui permettent un balayage rapide de l'ensemble du champ d'observation par pivotement. La lumière atteint l'objet étudié qui la renvoie dans des miroirs de balayage, un miroir dichroïque et un diaphragme confocal jusqu'au tube photomultiplicateur. Ce dernier émet alors un signal électrique qui est amplifié puis envoyé à un ordinateur. Finalement, le signal digitalisé est affiché sur l'écran de l'ordinateur [139]. La figure B.1 schématise ce principe de fonctionnement.

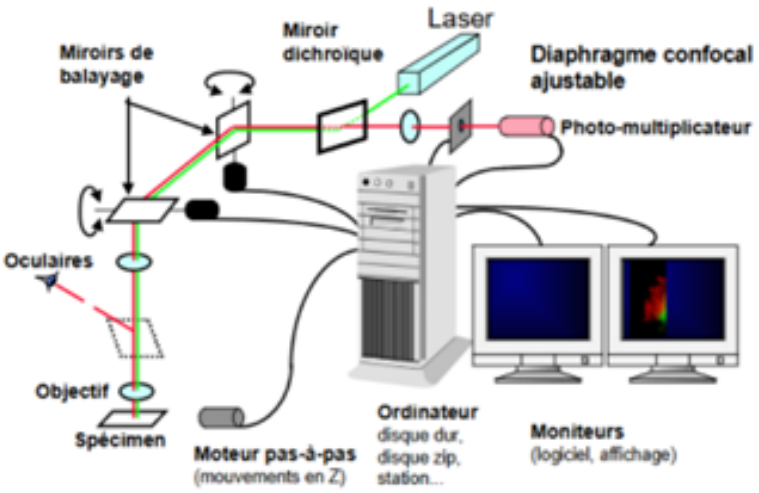
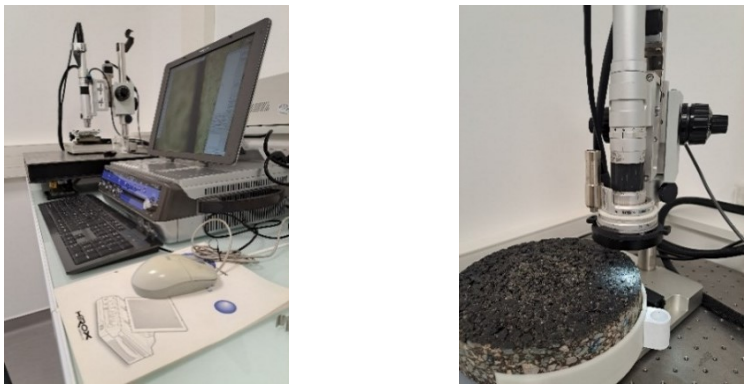


FIGURE B.1 – Fonctionnement du microscope confocal [139].

L'appareil utilisé dans ce travail de recherche est le Digital Microscope KH-7700 du fabricant Hirox équipé de l'objectif MXB-5040RZ et d'un système motorisé sur l'axe vertical [140]. Des photographies de l'appareillage sont présentées dans la figure B.2, et les principales caractéristiques de ce système sont indiquées dans le tableau B.1.



(a) (b)

FIGURE B.2 – Photographies du microscope confocal HIROX KH-770 utilisé durant la campagne en laboratoire (a) Dispositif complet du microscope confocal (b) Tête de mesure équipée de l'objectif MXB-5040RZ.

TABLEAU B.1 – Caractéristiques du microscope confocal Digital Microscope KH-7700 Hirox.

Résolution maximale	**Précision du système motorisé**	**Profondeur de champ**	**Champ de vision**	**Grossissement**	**Calibration**
30 mega pixel	0,05 μm	2,7 - 0,08 mm	6,1 - 0,78 mm	50 - 400	1 μm/pixel

Annexe C – Méthodologie de traitement des surfaces par le logiciel MountainsMap®

Cette annexe décrit la méthodologie de traitement des surfaces brutes issues du microscope confocal et du scanner laser, réalisée avec le logiciel MountainsMap®, afin de garantir l'obtention de surfaces normalisées et comparables pour l'analyse des indicateurs de rugosité dans le cadre de la campagne en laboratoire.

Le traitement des données issues du microscope confocal ainsi que du scanner laser est réalisé avec le logiciel MountainsMap®. Les différentes opérations de traitement appliquées aux surfaces sont résumées dans la figure ci-dessous.

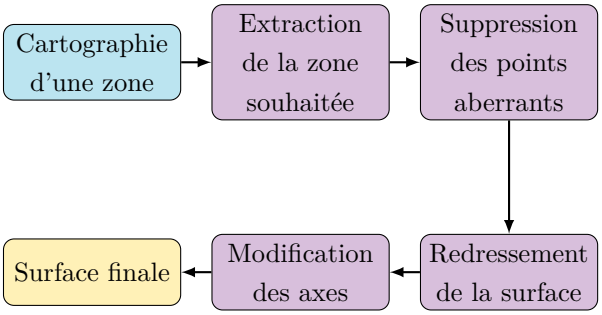


FIGURE C.1 – Différentes étapes de traitement d'une surface à l'aide du logiciel MountainsMap®.

La version du logiciel utilisée est : "MountainsMap® Imaging Topography" avec comme modules optionnels "Advanced Profile" et "Advanced Topography". Les étapes suivies pour chaque surface sont les suivantes.

1. **Cartographie initiale**

   Les données brutes du microscope confocal et du scanner laser sont importées dans le logiciel. Cela permet de visualiser directement la topographie complète de la surface analysée.

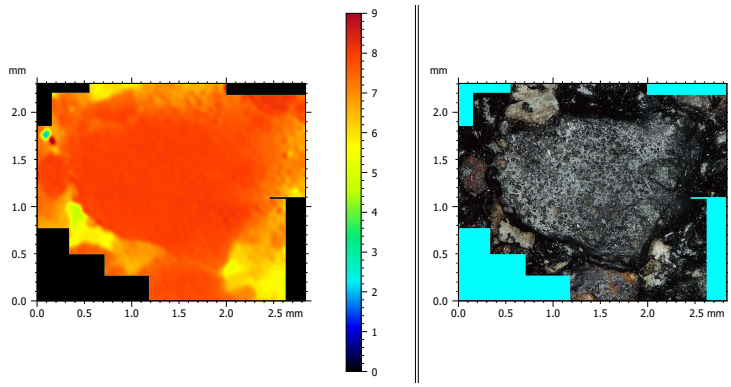


FIGURE C.2 – Données brutes d'un granulat reproduit par le microscope confocal : surface en deux dimensions indexée en hauteur et sa représentation.

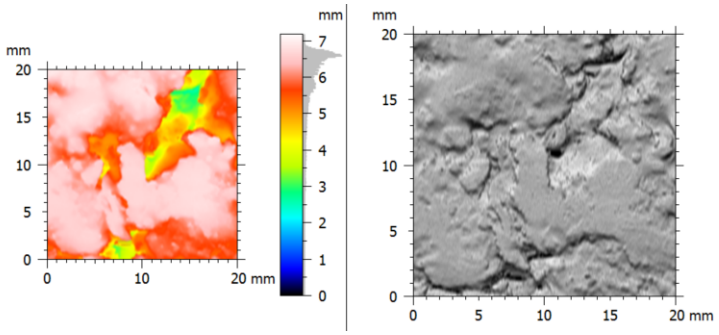


FIGURE C.3 – Données brutes d'une surface reproduite par le scanner laser : surface en deux dimensions indexée en hauteur et sa représentation en niveaux de gris.

2. **Délimitation de la zone d'étude**

   Dans le cas des données du microscope confocal, une extraction manuelle est réalisée afin d'isoler la partie utile (le granulat) de la surface acquise. Cette opération est nécessaire pour éviter les artefacts en bordure ou les zones non-représentatives de la surface de granulats. Cette étape est spécifique à chaque granulat, ce qui empêche toute automatisation (figure C.4). Afin de garantir la comparabilité des granulats étudiés durant la campagne en laboratoire, la même zone d'étude est systématiquement retenue pour un même granulat aux deux états considérés.

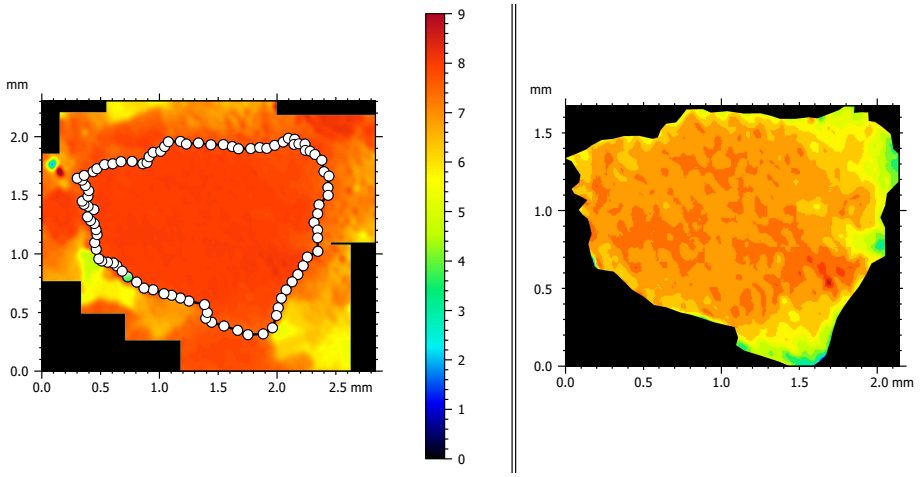


FIGURE C.4 – Délimitation manuelle de la zone d'étude d'un granulat reproduit par le microscope confocal.

Dans le cas des données issues du scanner laser, une étape de délimitation de la zone d'étude est également réalisée, de manière à assurer que la portion analysée reste identique entre les deux états successifs de la campagne d'essais.

3. **Suppression des points aberrants**
   Des points isolés ou extrêmes, liés à des erreurs de mesure ou à des pollutions locales, sont retirés. Le logiciel détecte automatiquement les valeurs très éloignées de la médiane locale.

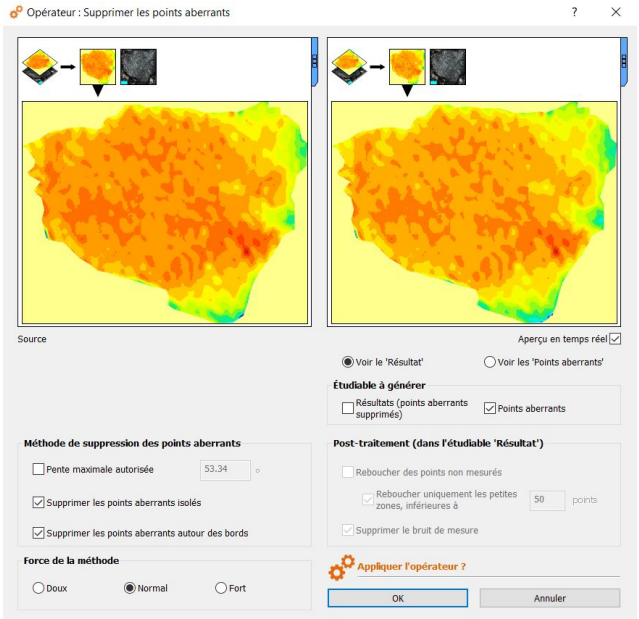


FIGURE C.5 – Étape de suppression de points aberrants d'une zone d'étude.

4. **Redressement de la surface (plan LSPL)**
   Un plan des moindres carrés est ajusté et soustrait à la surface pour éliminer toute pente ou inclinaison résiduelle. Cela garantit une analyse centrée sur les irrégularités propres à la texture de l'objet.

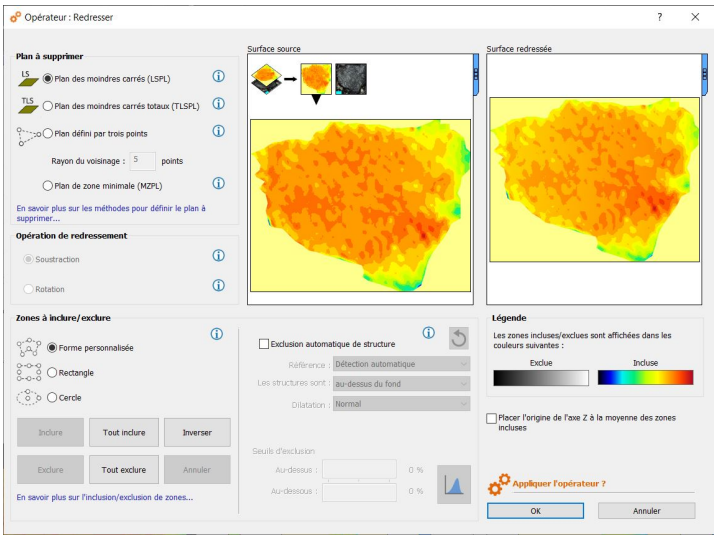


FIGURE C.6 – Étape de redressement de la surface d'une zone d'étude.

5. **Réajustement des axes**
   L'*offset* de l'axe vertical (z) est réinitialisé pour que l'origine soit commune à l'ensemble des surfaces. Cette homogénéisation est essentielle pour les comparaisons quantitatives entre différentes surfaces.

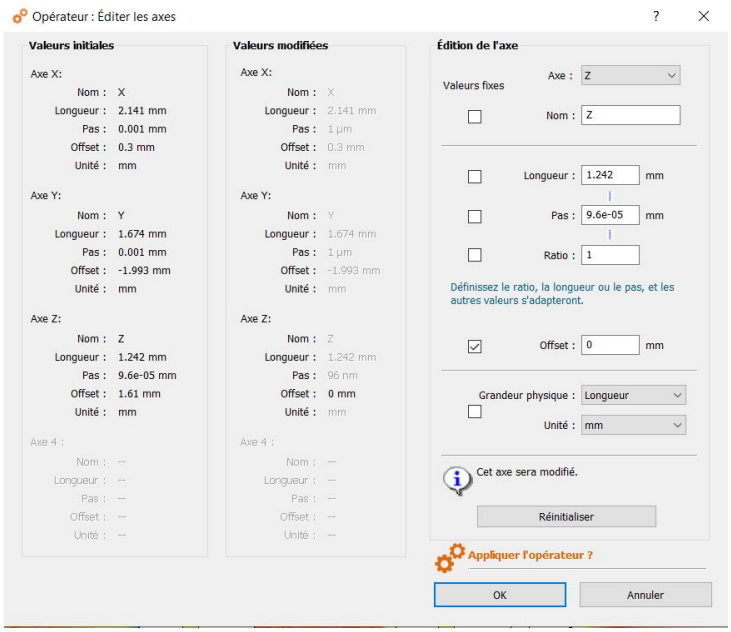


FIGURE C.7 – Étape d'ajustement des axes de la surface d'une zone d'étude.

6. **Surface finale**

   La surface obtenue après l'ensemble des traitements est considérée comme la surface finale. C'est sur cette version que sont calculés les différents indicateurs (S_a, S_q, S_{sk}, S_{ku}, etc.).

Ce processus, bien que semi-manuel, permet d'obtenir des surfaces normalisées et comparables, en limitant les biais liés aux conditions de mesure initiales. Il constitue une étape essentielle avant toute analyse quantitative ou représentation graphique des résultats.

Annexe D – Illustrations de l'évolution de granulats au microscope confocal

Cette annexe illustre, à l'aide du microscope confocal, l'évolution de la surface de différents granulats avant et après l'application des sollicitations durant la campagne en laboratoire.

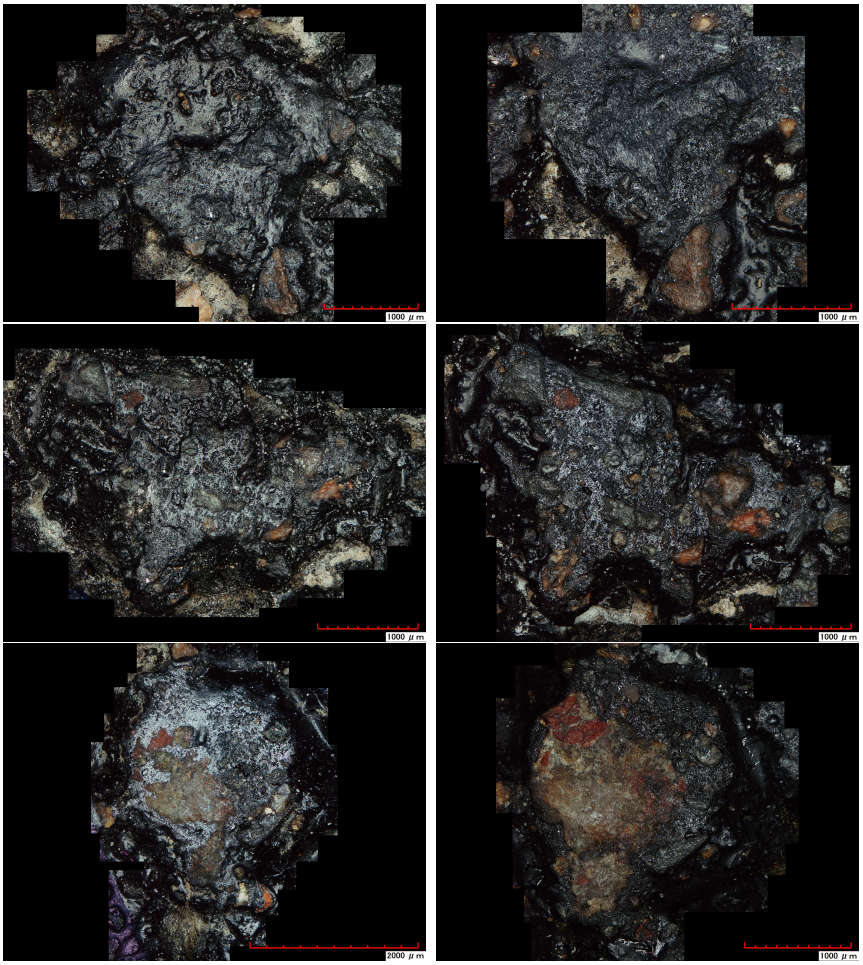


FIGURE D.1 – Observations au microscope confocal HIROX KH-7700 au grossissement 50 de son objectif MXB-5040RZ de la surface de granulats avant (gauche) et après (droite) l'application de sollicitations.

Annexe E – Calcul des indicateurs du banc LUG

Cette annexe présente les méthodes de calcul des différents indicateurs issus du banc LUG (valeurs efficaces, densités spectrales de puissance, autocorrélation et coordonnées des barycentres de contact), ainsi que les scripts MATLAB utilisés pour leur détermination.

• Détermination de la valeur efficace des forces normales et longitudinales

La valeur efficace, notée RMS, correspond à la valeur constante d'une force qui produirait le même effet énergétique que la force réelle variable au cours du temps. Elle se définit mathématiquement par la relation,

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left(F(t) - \overline{F}\right)^2 dt} \tag{F.1}$$

où T est la durée totale de l'essai, $F(t)$ représente la force instantanée (normale ou longitudinale, en N) à chaque instant t et $\overline{F}$ est la valeur moyenne de la force au cours de l'essai. Le calcul de cet indicateur s'effectue à l'aide du script MATLAB explicité dans le tableau E.1.

Tableau E.1 – Code MATLAB utilisé pour calculer les valeurs efficaces des forces, ici dans le cas de la force normale F_z.

X_{values} = [1 :16] ; *% Numéros des éprouvettes* Z_{values} = [0, 14, 33] ; *% Taux de glissement*
for X = X_{values} ; for Z = Z_{values}
var_{init} = sprintf('Ep%dE0C%d-Fz', X, Z) ; var_{final} = sprintf('Ep%dE39500C%d-Fz', X, Z) ;
var_{init-F_z} = evalin('base', var_{init}) ; $var_{final-F_z}$ = evalin('base', var_{final}) ;
var_{init-F_z} = var_{init-F_z} - mean(var_{init-F_z}) ; $var_{final-F_z}$ = $var_{final-F_z}$ - mean($var_{final-F_z}$) ;
% Calcul des valeurs RMS
$\mathrm{RMS}_{\mathrm{initial}}$ = std(var_{init-F_z}) ; $\mathrm{RMS}_{\mathrm{final}}$ = std($var_{final-F_z}$) ;
end ; end

• Détermination de la densité spectrale de puissance des forces normales et longitudinales

La densité spectrale de puissance, notée DSP, permet de quantifier la manière dont la puissance d'un signal (ici, la force mesurée au cours du temps) se répartit en fonction des fréquences. Elle fournit une description fréquentielle de la variabilité du signal et permet d'identifier les contributions dominantes dans certaines gammes de fréquence. Dans le cas d'une force $F(t)$ mesurée sur une durée T, la densité spectrale de puissance s'obtient par transformée de Fourier du signal centré, soit :

$$\mathrm{DSP}(f) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \left| \int_0^T \left(F(t) - \overline{F}\right) e^{-2\pi i f t} dt \right|^2 \tag{F.2}$$

où f est la fréquence (en Hz), $F(t)$ est la force mesurée (en N) et $\overline{F}$ est la valeur moyenne du signal sur la durée T. Le calcul de cet indicateur s'effectue à l'aide du script MATLAB explicité dans le tableau E.2. Dans ce code, la fonction "pwelch" est utilisée afin de calculer les densités spectrales de puissance des forces. Cette fonction est l'implémentation MATLAB de la méthode de Welch qui permet de calculer la DSP d'un signal de manière robuste. Elle consiste à diviser le signal en plusieurs segments qui se chevauchent, à appliquer une fenêtre de pondération sur chaque segment, puis à calculer le spectre de puissance de chacun. La moyenne de ces spectres fournit une estimation plus stable et moins bruitée de la DSP [141].

Tableau E.2 – Code MATLAB utilisé pour calculer et afficher les densités spectrales de puissance ici dans le cas de la force normale F_z.

```
% Données d'entrée
X_values = [1 :16] ; Z_values = [0, 14, 33] ; fs = 1000 ; % Fréquence d'échantillonnage (Hz)
for X = X_values ; for Z = Z_values
var_init = sprintf('Ep%dE0C%d-Fz', X, Z) ; var_final = sprintf('Ep%dE39500C%d-Fz', X, Z) ;
var_init-Fz = evalin('base', var_init) ; var_final-Fz = evalin('base', var_final) ;
% Calcul des DSP
[pxx1, f1] = pwelch(var_init-Fz, [], [], [], fs) ;
[pxx2, f2] = pwelch(var_final-Fz, [], [], [], fs) ;
figure ; plot(f1, pxx1, 'b', 'LineWidth', 1.5) ; hold on ;
plot(f2, pxx2, 'r', 'LineWidth', 1.5) ;
xlabel('Fréquence (Hz)') ;
ylabel('DSP - F_y (N^2/Hz)');
title(sprintf('Éprouvette %d - %d %% de glissement', X, Z)) ;
legend('État initial', 'État final') ;
```

• Détermination de l'autocorrélation des forces normales et longitudinales

La longueur d'autocorrélation permet de quantifier la persistance temporelle d'un signal, c'est-à-dire l'intervalle sur lequel les variations d'une force demeurent corrélées avec elles-mêmes. Elle fournit une indication sur la régularité ou la périodicité du signal dans le temps. Pour un signal de force $F(t)$ centré, la fonction d'autocorrélation $R(\tau)$ est définie comme,

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \left(F(t) - \overline{F}\right) \left(F(t+\tau) - \overline{F}\right) dt \tag{F.3}$$

où τ est le décalage temporel, T la durée totale d'observation et $\overline{F}$ la moyenne du signal. La longueur d'autocorrélation est définie comme la plus petite valeur de τ pour laquelle $R(\tau)$ décroît en dessous d'un seuil fixé. Dans cette étude, le seuil est fixé à 0,1, ce qui signifie que la longueur d'autocorrélation correspond à la première valeur de τ pour laquelle la fonction $R(\tau)$ devient inférieure à 10% de sa valeur maximale $R(0)$. Le calcul de cet indicateur est effectué à l'aide du script MATLAB présenté dans le tableau E.3. Celui-ci utilise la fonction "xcorr", qui permet de déterminer la fonction d'autocorrélation du signal. Le signal est préalablement centré et le profil d'autocorrélation obtenu est ensuite analysé pour extraire la longueur caractéristique correspondant à la perte de corrélation [142].

Tableau E.3 – Code MATLAB utilisé pour calculer les longueurs d'autocorrélation ici dans le cas de la force normale F_z.

% Définition des paramètres
X_{values} = [1 :16] ; Z_{values} = [0, 14, 33] ; $fs = 1000$; $dt = 1/fs$; $seuil = 0.1$; $vitesse = 0.47$;
for X = X_{values} ; for Z = Z_{values}
var_{init} = sprintf('Ep%dE0C%d-Fz', X, Z) ; var_{final} = sprintf('Ep%dE39500C%d-Fz', X, Z) ;
var_{init-F_z} = evalin('base', var_{init}) ; $var_{final-F_z}$ = evalin('base', var_{final}) ;
t1 = (0 :length(var_{init-F_z})-1) * dt ; t2 = (0 :length($var_{final-F_z}$)-1) * dt ;
figure ; correlation-signal(var_{init-F_z}, t1, seuil, vitesse, gcf, 1) ; correlation-signal($var_{final-F_z}$, t2, seuil, vitesse, gcf, 2) ; end ; end
function [lags, autocorr-vals, correlation-duration, correlation-length] = autocorrelation-signal(signal, time, threshold, speed, fig-handle, subplot-pos)
signal = signal - mean(signal) ; dt = mean(diff(time)) ;
$[acf, lag_{samples}]$ = xcorr(signal, 50, 'coeff') ; $lags = lag_{samples} \times dt$;
acf_{pos} = acf(lags >= 0) ; $lags_{pos}$ = lags(lags >= 0) ; idx = find(abs(acf_{pos}) < seuil, 1) ;
if ∼isempty(idx), $\tau_c = lags_{pos}(idx)$; else, τ_c = NaN ; end
if ∼isempty(vitesse) && ∼isnan(τ_c)
L_c = vitesse $\times \tau_c$; else, L_c = NaN ; end ; plot(lags, acf) ;

• **Détermination des coordonnées des barycentres de contact**

Il est statué que la zone de contact est faible, ce qui permet d'introduire le barycentre de centre de contact comme un point de coordonnées x et y où le moment est minimal. L'analyse des données issues du banc LUG permet de suivre l'évolution temporelle du point d'application des forces exercées dans la zone de contact entre le pneumatique et l'échantillon d'enrobé bitumineux. Étant donné la taille réduite de cette zone, il est pertinent de modéliser le contact par un point unique : le barycentre du contact. Celui-ci correspond au point où le moment résultant des forces est minimisé. Cette approche est inspirée des travaux présentés dans [118] et permet de déterminer les coordonnées (x, y) du à partir des composantes des forces (F_x, F_y, F_z) et des moments (M_x, M_y, M_z). Afin d'assurer l'uniformité des notations dans l'ensemble du manuscrit, la composante transversale de l'effort est notée F_y (notation F_x dans la formulation originale). La relation utilisée est alors,

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{R^2} \begin{pmatrix} F_x \cdot M_z - F_z \cdot M_x - (F_x \cdot M_x - F_x \cdot M_y) \cdot (F_y/F_z) \\ F_z \cdot M_y - F_y \cdot M_z - (F_y \cdot M_x - F_x \cdot M_y) \cdot (F_x/F_z) \end{pmatrix} \tag{F.4}$$

où R est le rayon entre le centre de l'hexapode et le centre de la roue miniature.

Annexe F – Écarts relatifs des valeurs efficaces entre les deux états de la campagne en laboratoire

Cette annexe présente les écarts relatifs des valeurs efficaces (RMS) des forces normales et longitudinales, calculés entre les états initial et final des éprouvettes de la campagne en laboratoire pour différents taux de glissement.

TABLEAU F.1 – Écarts relatifs moyens, en %, des valeurs efficaces des forces, mesurées à l'aide du banc LUG à 0 % de glissement pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final.

0 % glissement			
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Écart relatif des RMS (%)**	
		Force normale F_z	**Force longitudinale F_y**
T	01	↑ +65%	↑ +49%
T	02	↑ +116%	↑ +102%
T	03	↑ +7%	↑ +23%
S+T	04	↓ −21%	↓ −23%
H+T	05	↑ +53%	↑ +141%
H+T	06	↑ +236%	↑ +145%
E+T	07	↑ +122%	↑ +36%
E+T	08	↓ 29%	↓ −49%
S+H+T	09	↓ −35%	↓ −51%
S+H+T	10	↓ −25%	↓ −27%
S+E+T	11	↑ +13%	↓ −20%
S+E+T	12	↑ +45%	↓ −9%
H+E+T	13	↓ −74%	↓ −79%
H+E+T	14	↓ −62%	↓ −66%
S+H+E+T	15	↓ −22%	↑ +5%
S+H+E+T	16	↑ +95%	↑ +56%

TABLEAU F.2 – Écarts relatifs moyens, en %, des valeurs efficaces des forces, mesurées à l'aide du banc LUG à 14 % de glissement pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final.

14 % glissement			
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Écart relatif des RMS (%)**	
		Force normale F_z	**Force longitudinale F_y**
T	01	↑ +39%	↓ −15%
T	02	↑ +110%	↑ +14%
T	03	↓ −25%	↓ −19%
S+T	04	↑ +4%	↓ −68%
H+T	05	↓ 0%	↓ −67%
H+T	06	↑ +137%	↑ +223%
E+T	07	↑ +54%	↑ +188%
E+T	08	↓ −35%	↓ −71%
S+H+T	09	↓ −44%	↓ −75%
S+H+T	10	↓ −41%	↓ −80%
S+E+T	11	↓ −18%	↓ −66%
S+E+T	12	↑ +9%	↓ −64%
H+E+T	13	↓ −69%	↓ −89%
H+E+T	14	↓ −58%	↓ −80%
S+H+E+T	15	↓ −28%	↓ −80%
S+H+E+T	16	↑ +104%	↑ +12%

TABLEAU F.3 – Écarts relatifs moyens, en %, des valeurs efficaces des forces, mesurées à l'aide du banc LUG à 33 % de glissement pour chaque combinaison de sollicitations entre les deux états : initial et final.

33 % glissement			
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Écart relatif des RMS (%)**	
		Force normale F_z	**Force longitudinale F_y**
T	01	↓ −2%	↓ −28%
T	02	↑ +113%	↓ −10%
T	03	↓ −4%	↓ −13%
S+T	04	↓ −4%	↓ −54%
H+T	05	↓ −2%	↑ +6%
H+T	06	↑ +166%	↓ −3%
E+T	07	↑ +80%	↓ −35%
E+T	08	↓ −45%	↓ −71%
S+H+T	09	↓ −55%	↓ −70%
S+H+T	10	↓ −18%	↓ −58%
S+E+T	11	↓ −26%	↓ −54%
S+E+T	12	↓ −15%	↑ +24%
H+E+T	13	↓ −61%	↓ −91%
H+E+T	14	↓ −58%	↓ −79%
S+H+E+T	15	↓ −26%	↓ −69%
S+H+E+T	16	↑ +23%	↑ +64%

Annexe G – Densité spectrale de puissance

Cette annexe rassemble les graphiques de densité spectrale de puissance (DSP) des forces normales et longitudinales mesurées au banc LUG pour les différents taux de glissement des éprouvettes de la campagne en laboratoire.

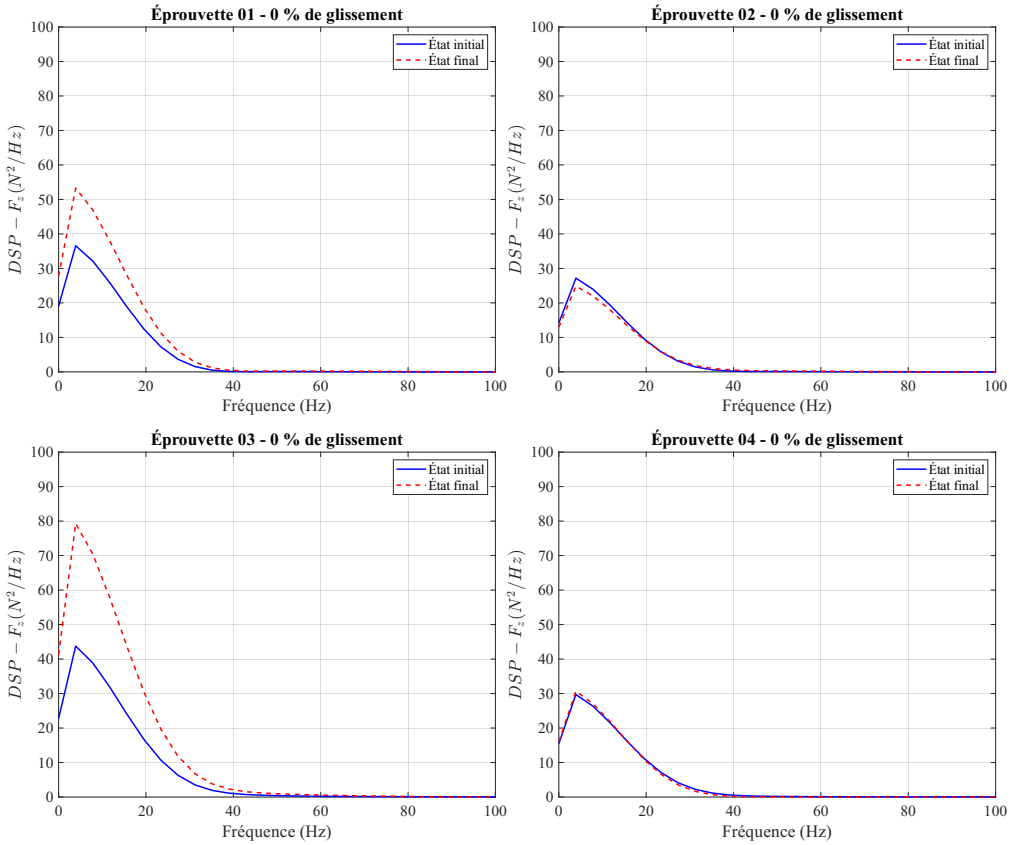


FIGURE G.1 – Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 01 à 04 pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. (1/3)

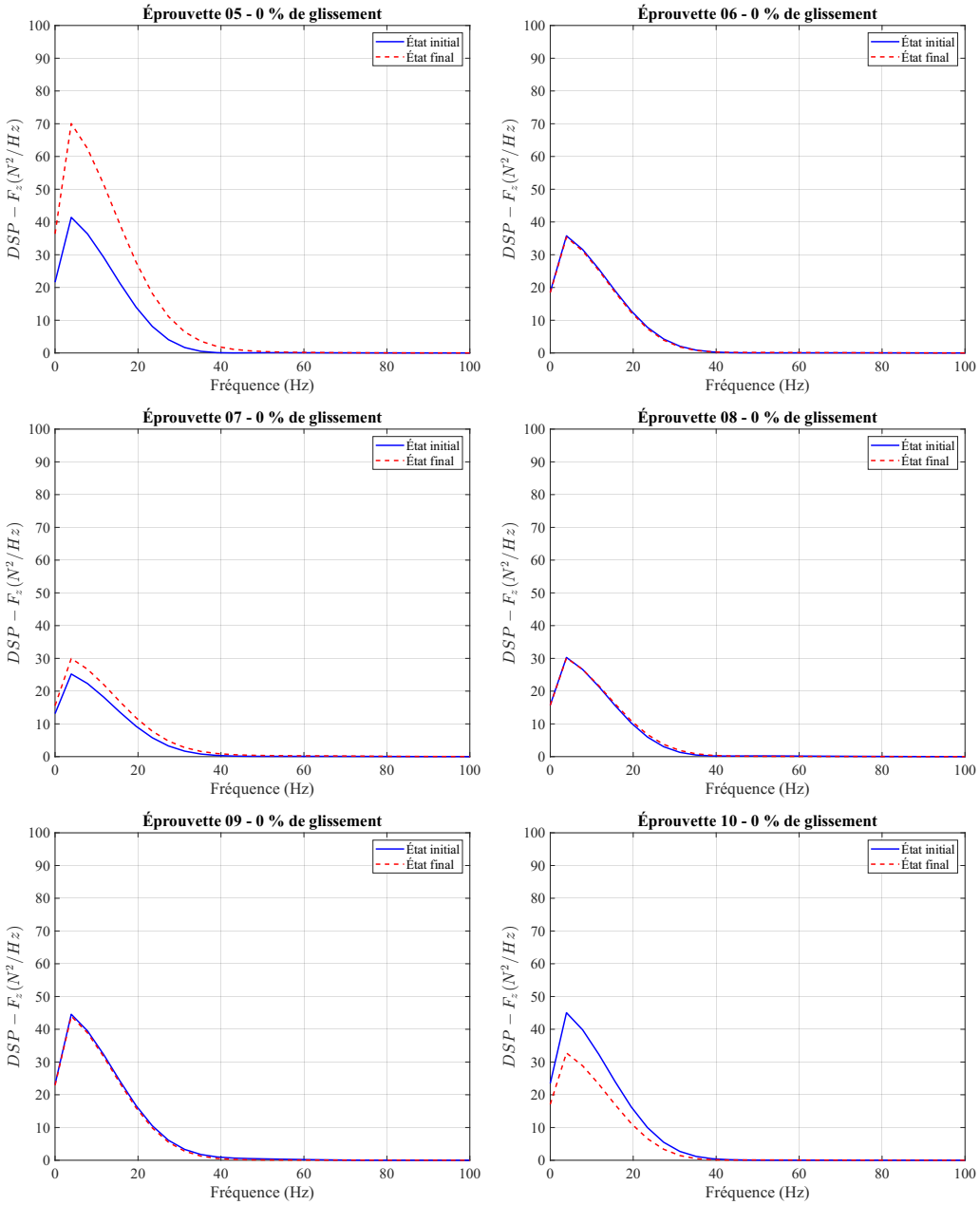


FIGURE G.2 – Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N^2/Hz, des éprouvettes 05 à 10 pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. (2/3)

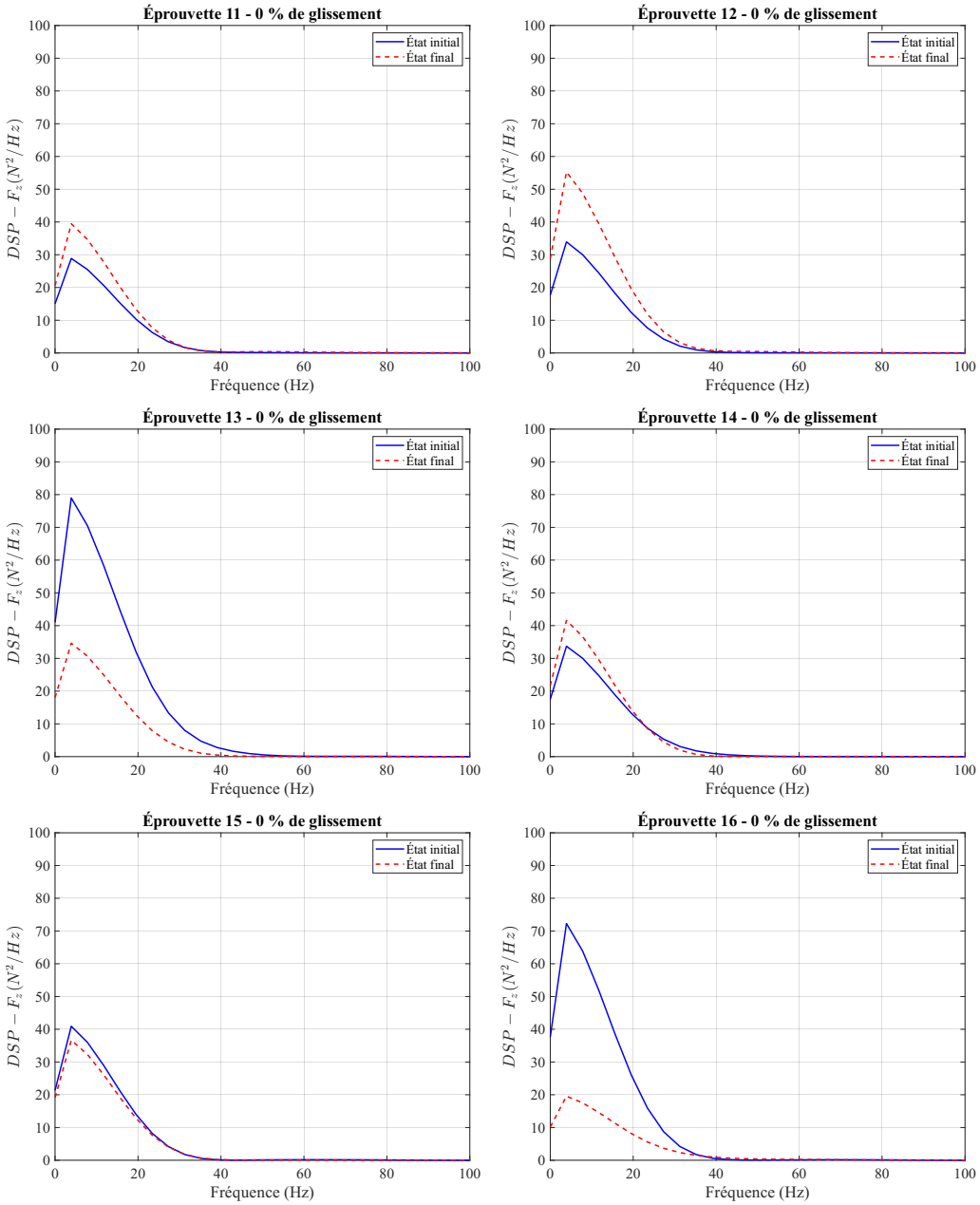


FIGURE G.3 – Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N^2/Hz, des éprouvettes 11 à 16 pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. (3/3)

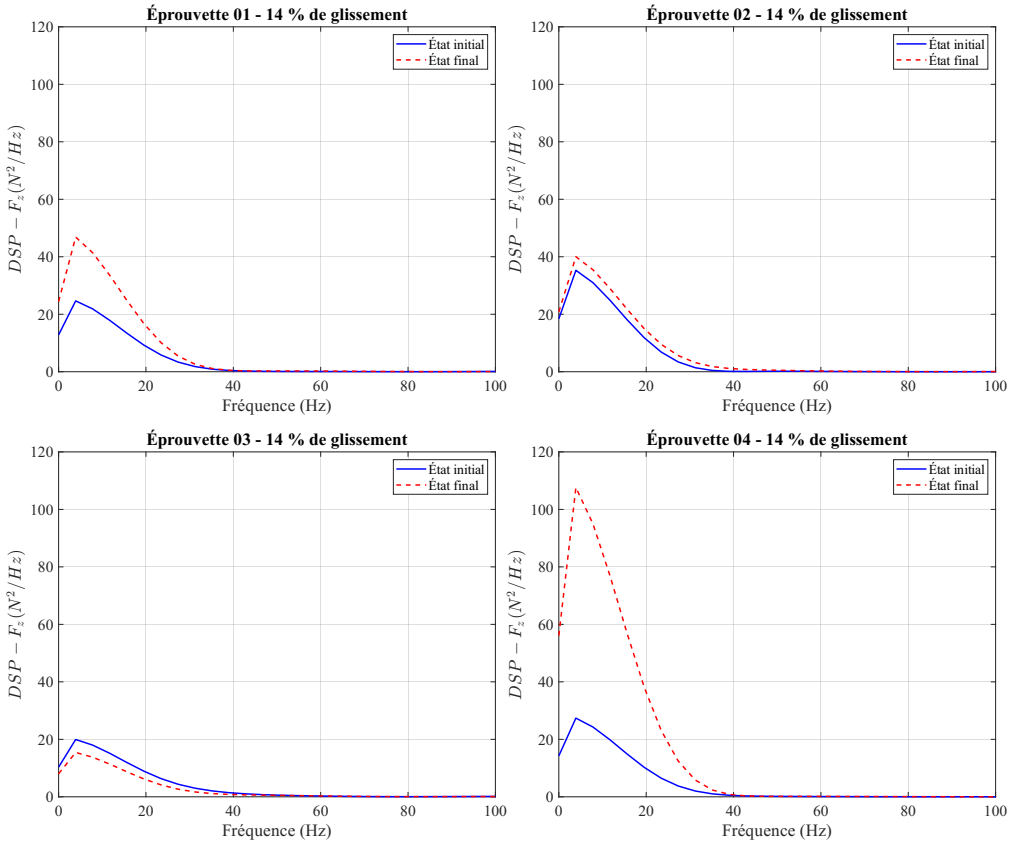


FIGURE G.4 – Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 01 à 04 pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG. (1/3)

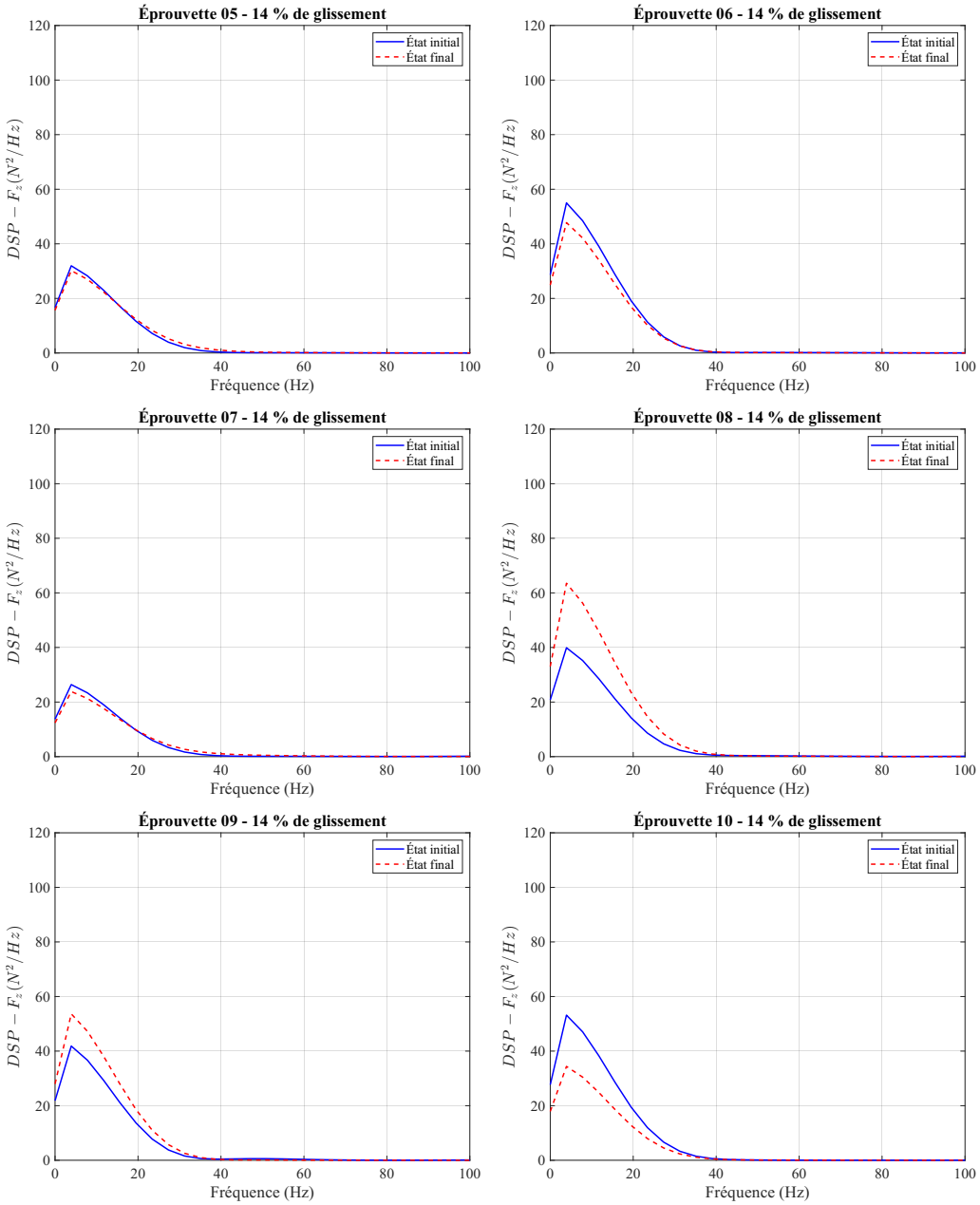


FIGURE G.5 – Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N^2/Hz, des éprouvettes 05 à 10 pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG. (2/3)

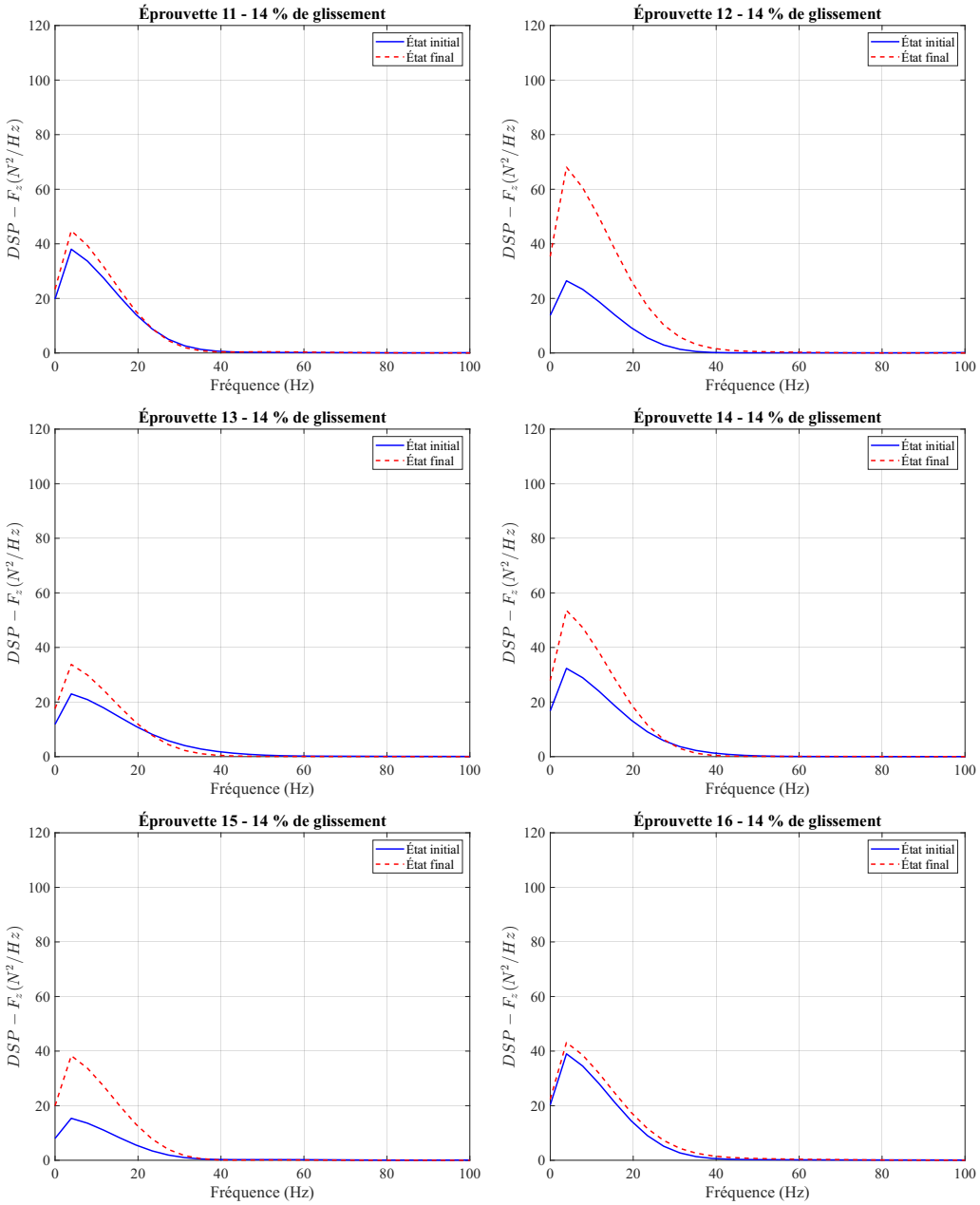


FIGURE G.6 – Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N^2/Hz, des éprouvettes 11 à 16 pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG. (3/3)

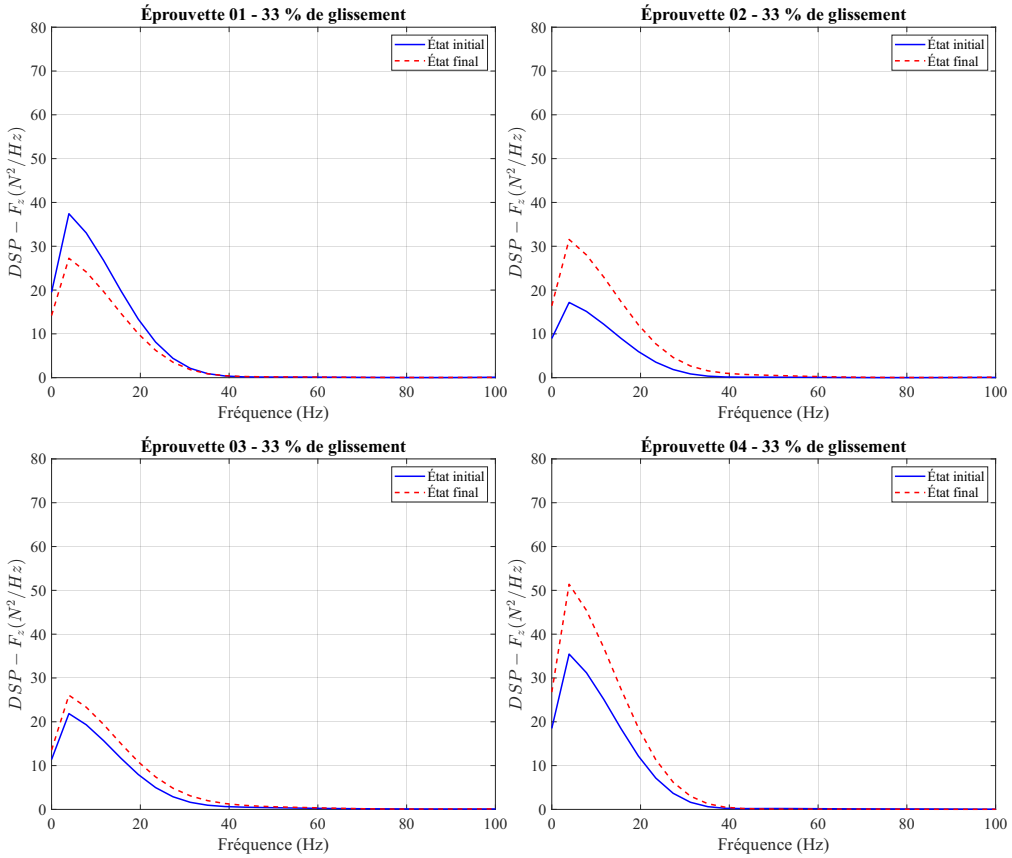


FIGURE G.7 – Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 01 à 04 pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG. (1/3)

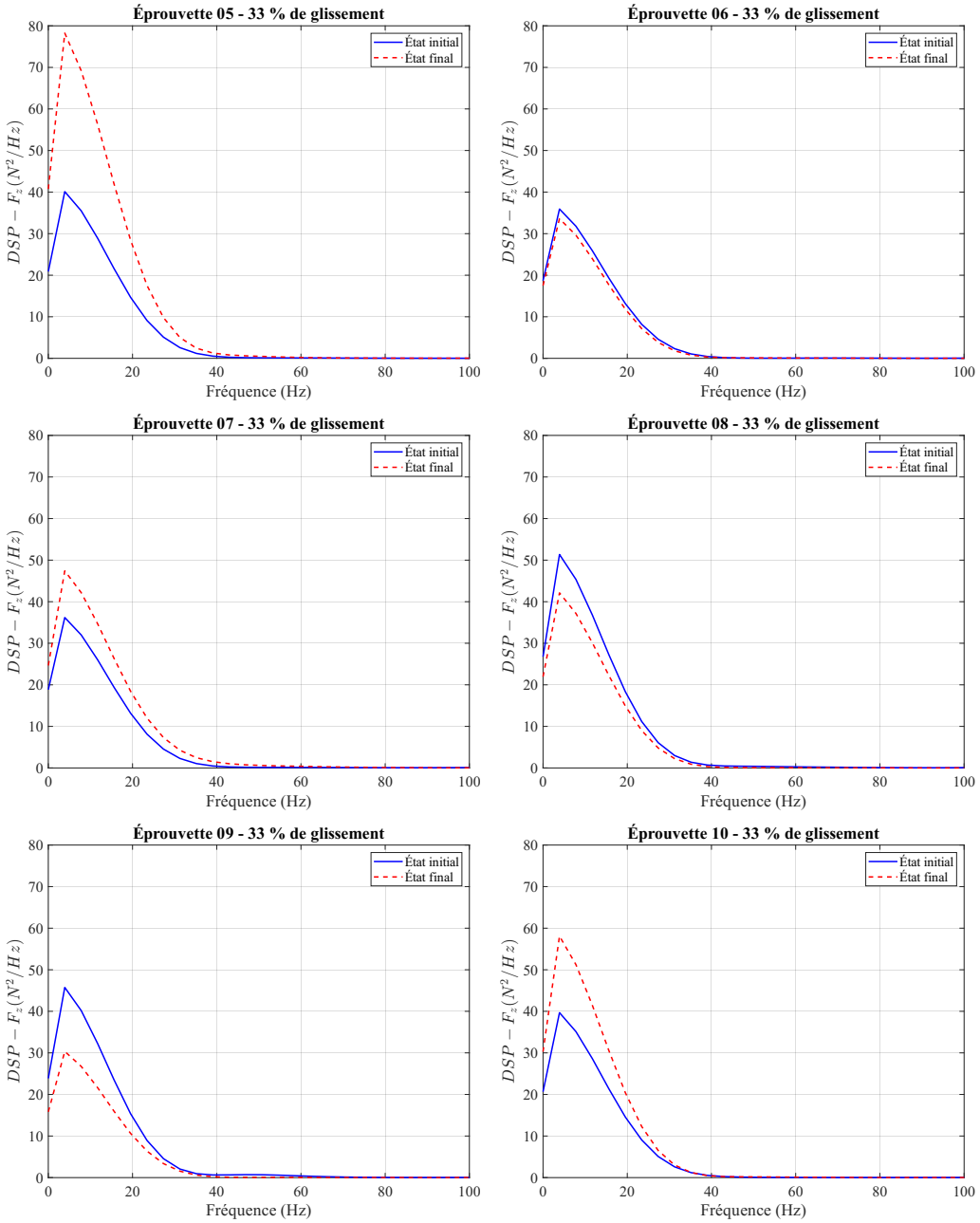


FIGURE G.8 – Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 05 à 10 pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG. (2/3)

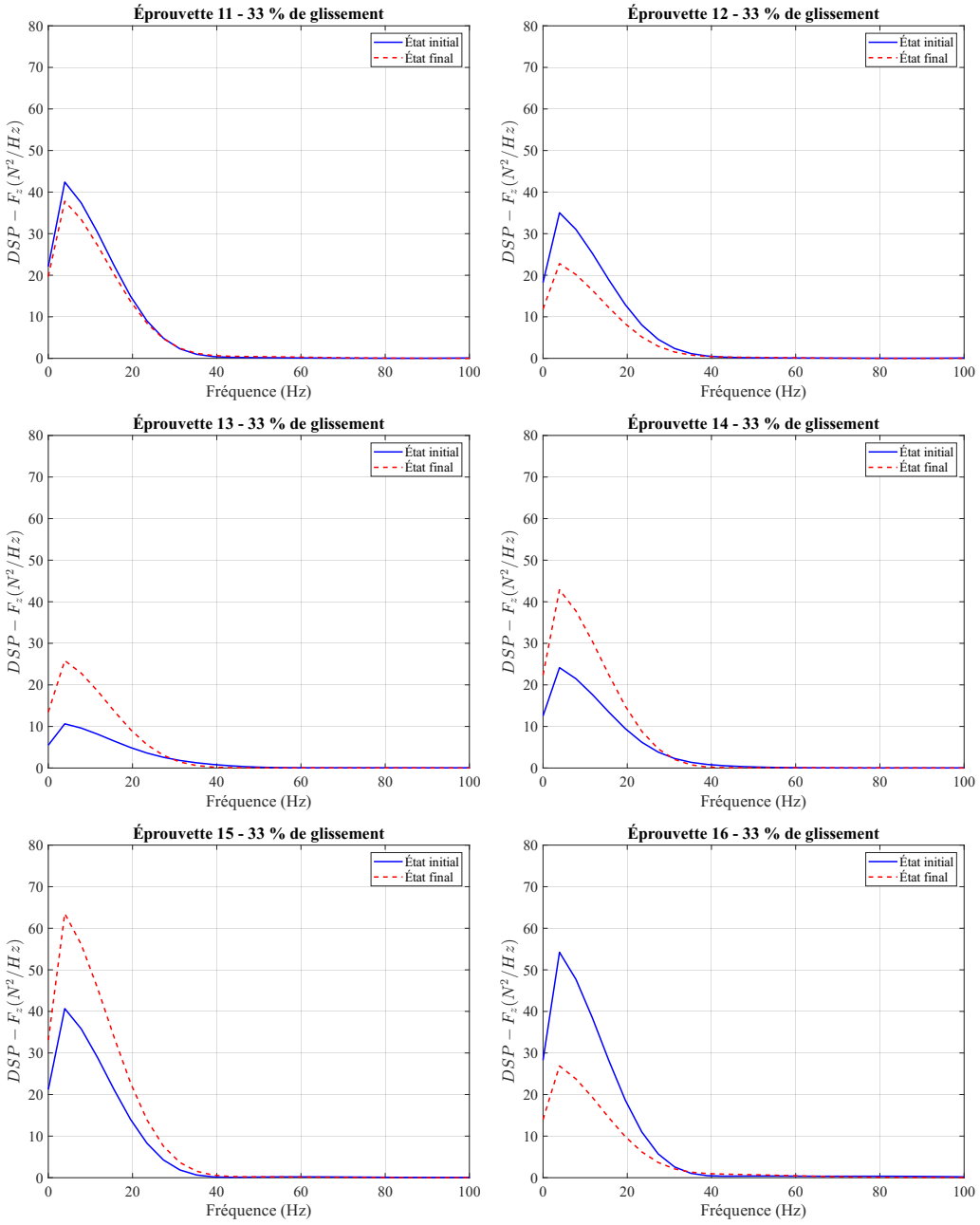


FIGURE G.9 – Densité spectrale de puissance des forces normales F_z, en N²/Hz, des éprouvettes 11 à 16 pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG. (3/3)

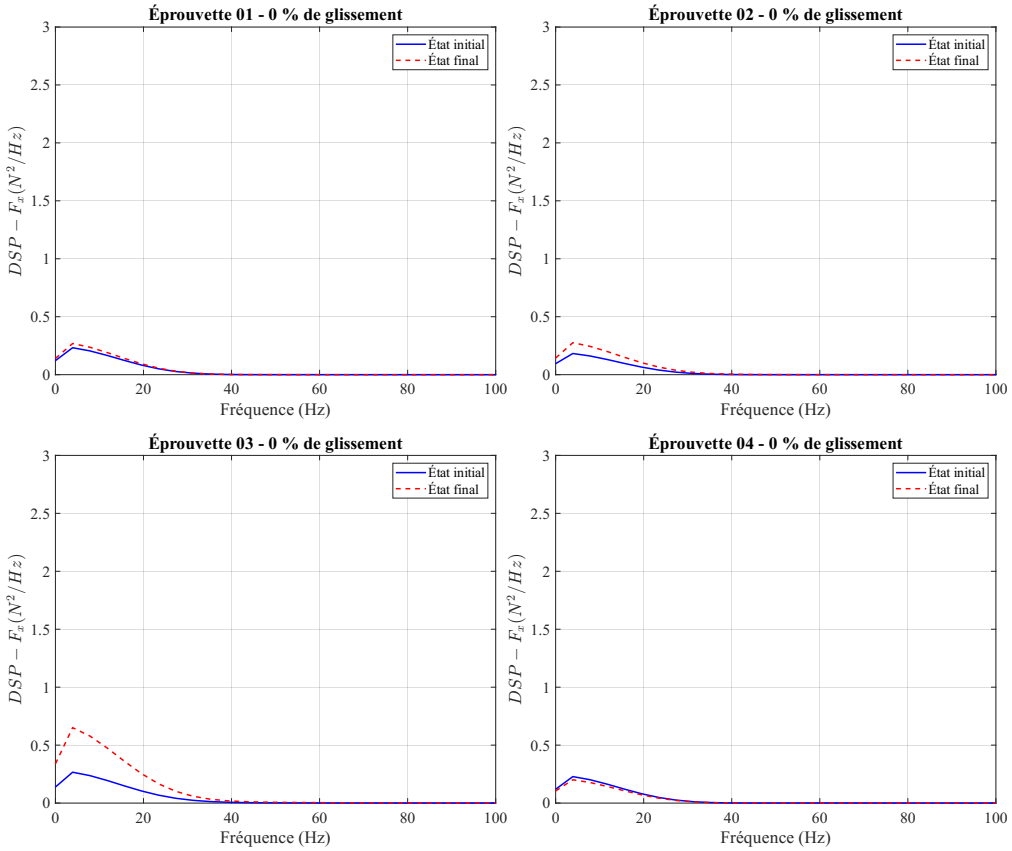


FIGURE G.10 – Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N^2/Hz, des éprouvettes 01 à 04 pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. (1/3)

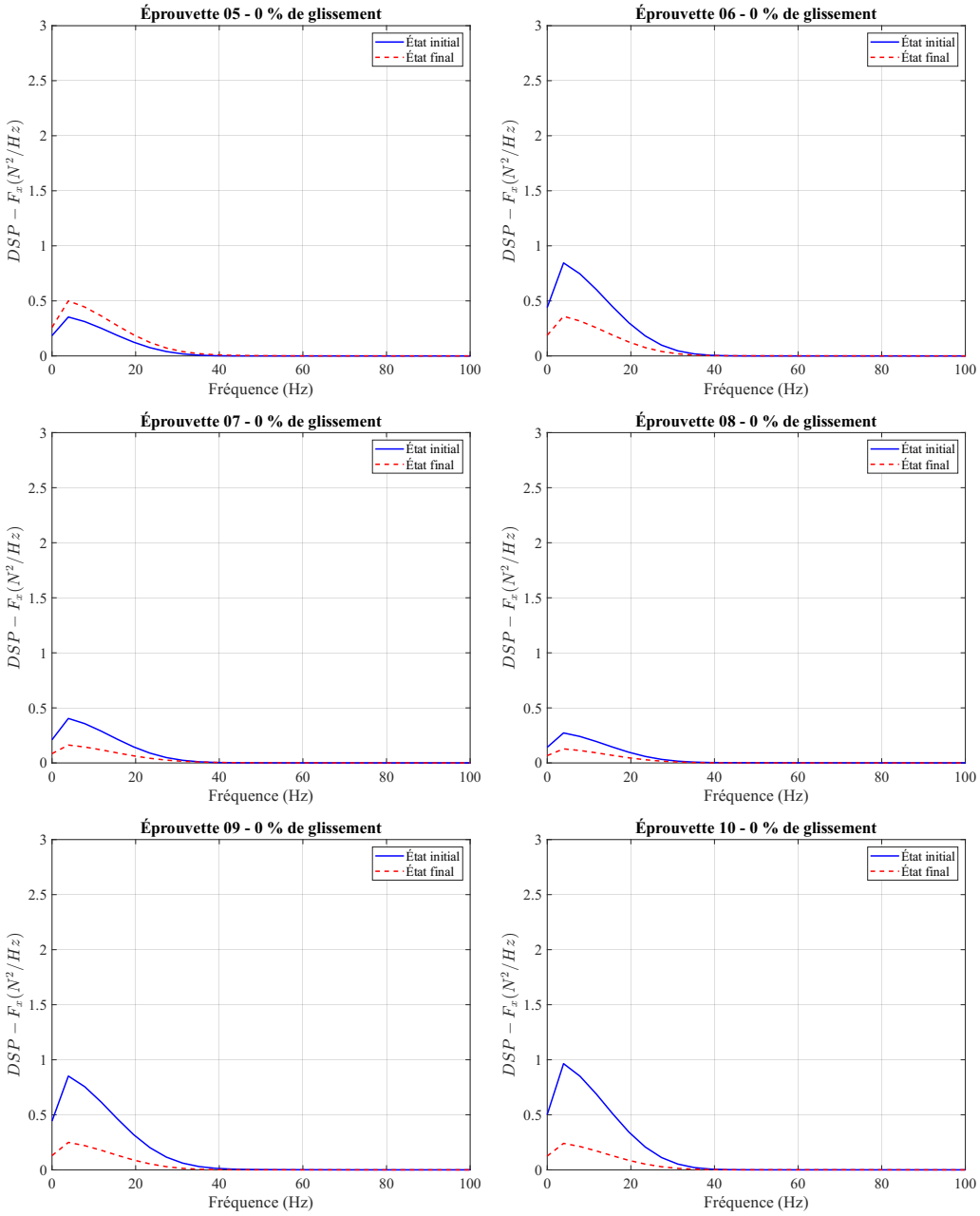


FIGURE G.11 – Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 05 à 10 pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. (2/3)

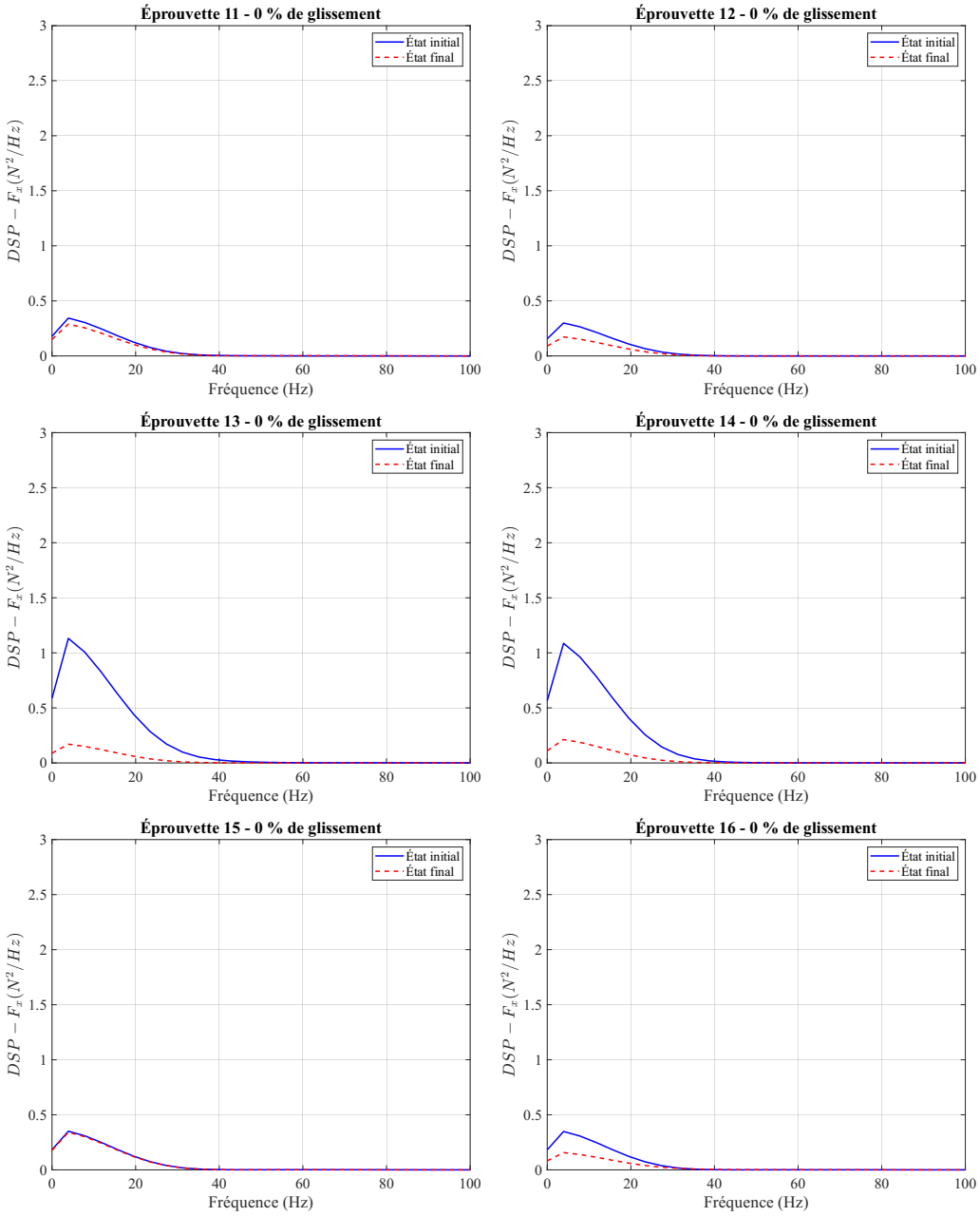


FIGURE G.12 – Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 11 à 16 pour les mesures réalisées avec 0 % de glissement au banc LUG. (3/3)

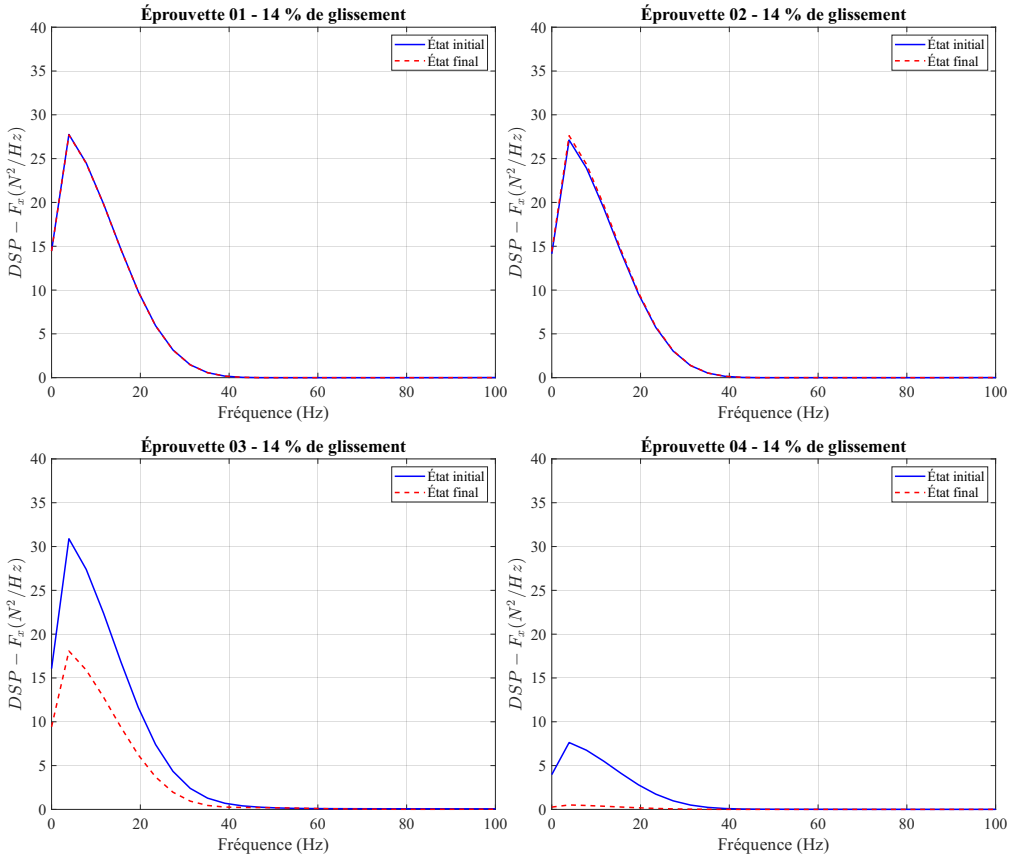


FIGURE G.13 – Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 01 à 04 pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG. (1/3)

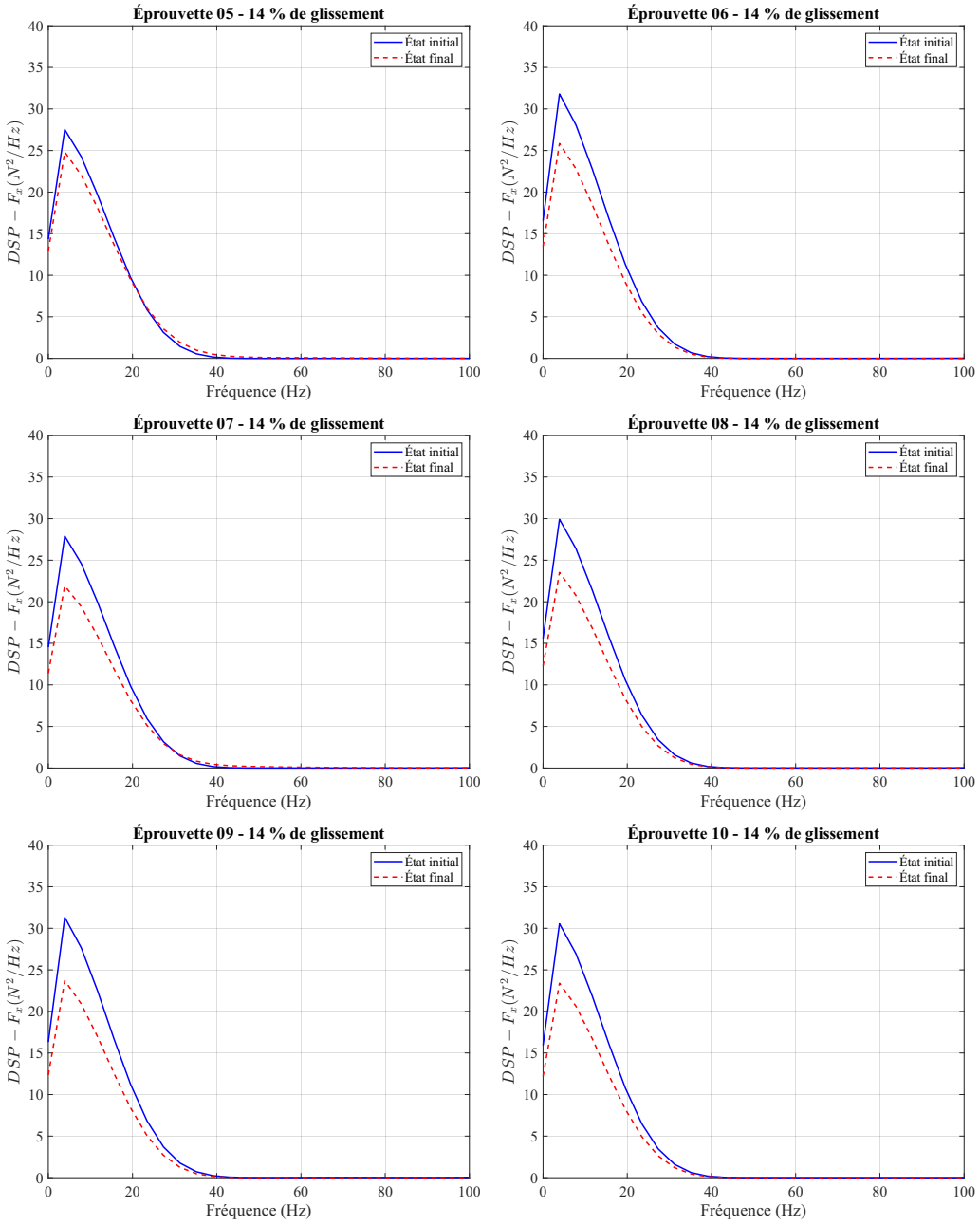


FIGURE G.14 – Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 05 à 10 pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG. (2/3)

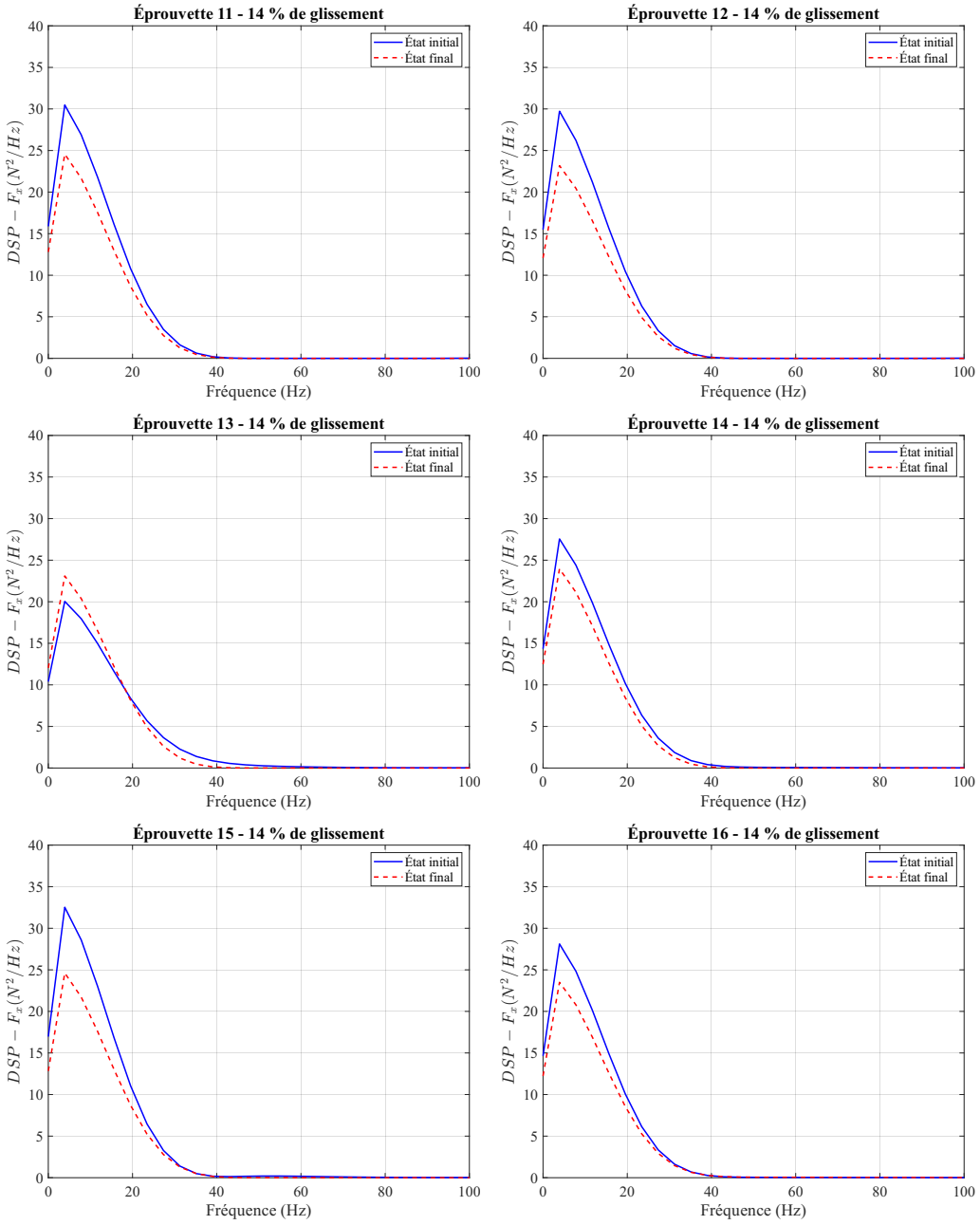


FIGURE G.15 – Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 11 à 16 pour les mesures réalisées avec 14 % de glissement au banc LUG. (3/3)

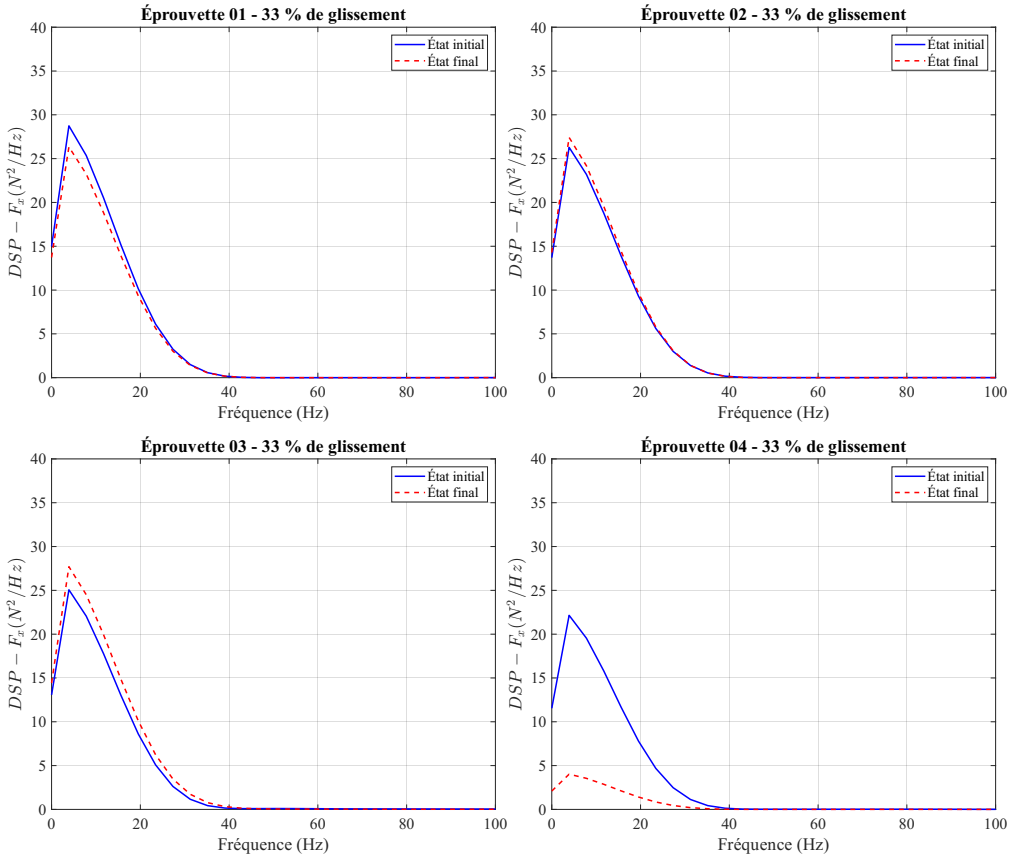


FIGURE G.16 – Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 01 à 04 pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG. (1/3)

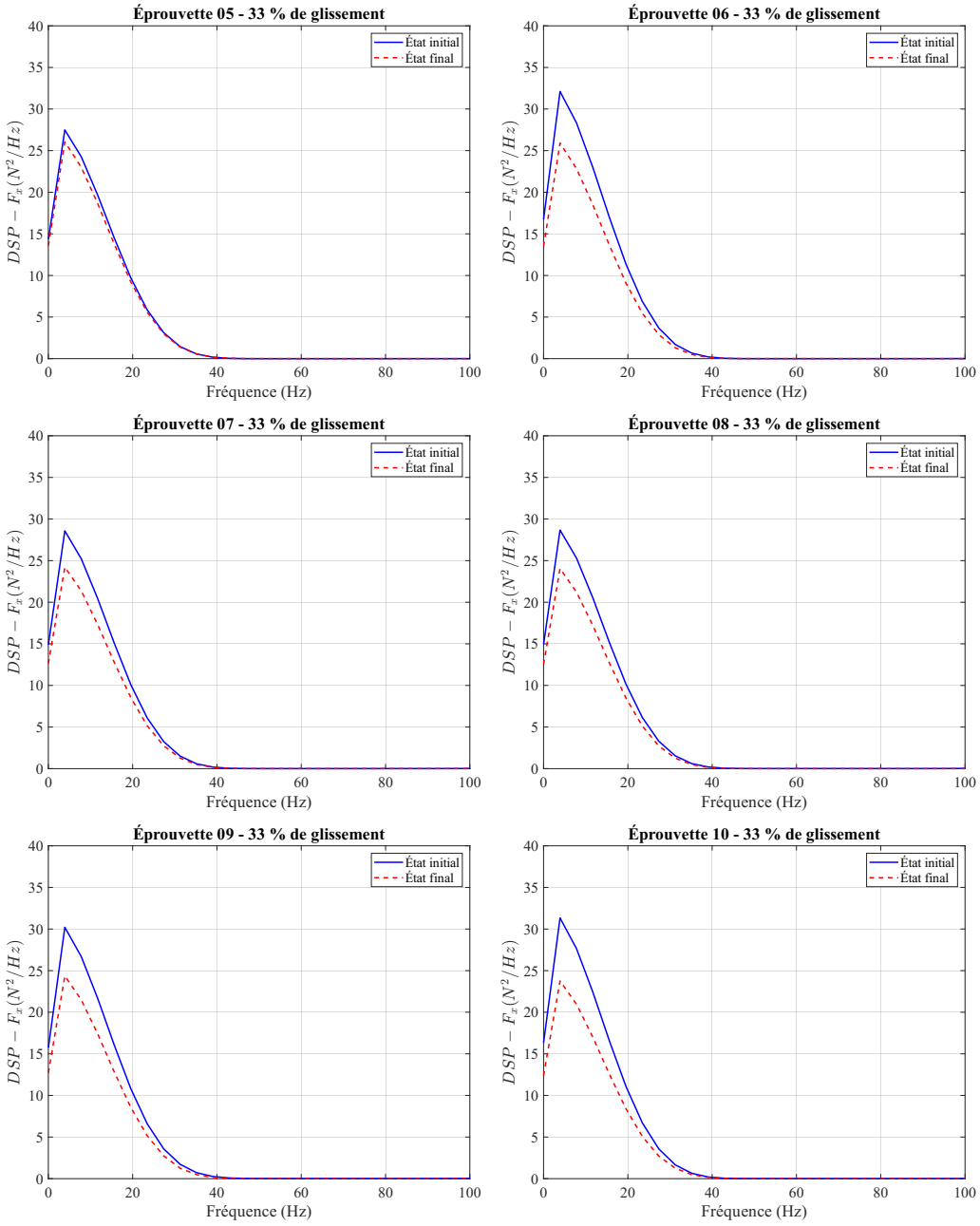


FIGURE G.17 – Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 05 à 10 pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG. (2/3)

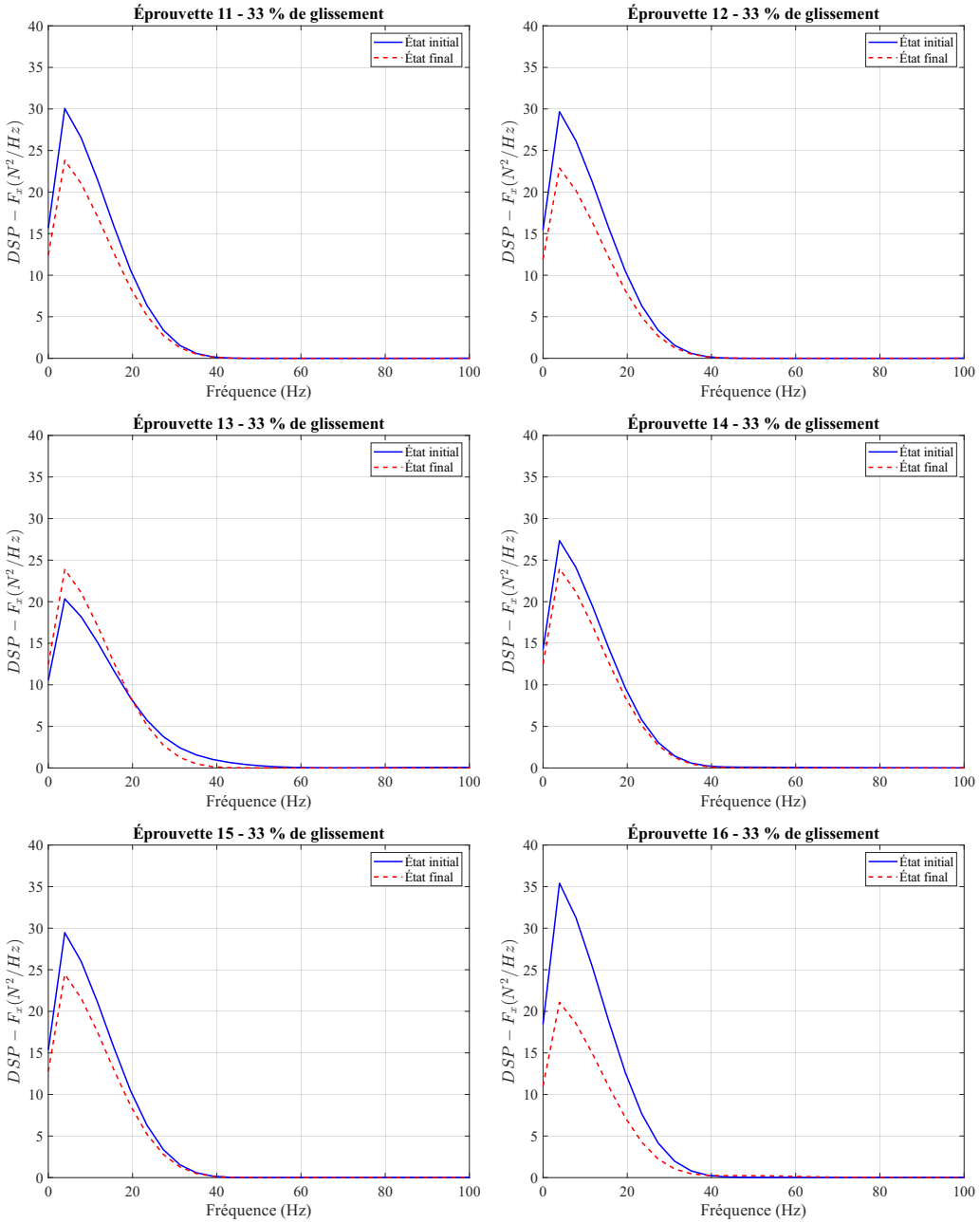


FIGURE G.18 – Densité spectrale de puissance des forces longitudinales F_x, en N²/Hz, des éprouvettes 11 à 16 pour les mesures réalisées avec 33 % de glissement au banc LUG. (3/3)

Annexe H – Écarts relatifs des longueurs de corrélation entre les deux états de la campagne en laboratoire

Cette annexe présente les écarts relatifs des longueurs de corrélation des forces normales et longitudinales, mesurés entre l'état initial et final des éprouvettes de la campagne en laboratoire pour différents taux de glissement.

TABLEAU H.1 – Écarts relatifs moyens, en %, des longueurs d'autocorrélation des forces normales F_z et longitudinales F_z des éprouvettes, mesurés par le banc LUG pour l'essai avec 0 % de glissement aux deux états : initial et final.

0 % glissement			
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Δ Longueur d'autocorrélation (mm)**	
		Force normale F_z	**Force longitudinale F_x**
T	01	→ 0%	↑ +43%
T	02	↑ +50%	↑ +150%
T	03	↓ −22%	↓ −11%
S+T	04	↑ +29%	↓ −86%
H+T	05	↑ +14%	↓ −20%
H+T	06	↑ +100%	↑ +200%
E+T	07	↑ +29%	↑ +11%
E+T	08	↑ +14%	↓ −33%
S+H+T	09	↑ +13%	↓ −33%
S+H+T	10	↓ −30%	↑ +10%
S+E+T	11	↓ −50%	↓ −50%
S+E+T	12	↓ −22%	→ 0%
H+E+T	13	↓ −20%	↓ −10%
H+E+T	14	↓ −50%	↓ −70%
S+H+E+T	15	↑ +50%	↑ +150%
S+H+E+T	16	↑ +80%	↑ +125%

Tableau H.2 – Écarts relatifs moyens, en %, des longueurs d'autocorrélation des forces normales F_z et longitudinales F_z des éprouvettes, mesurés par le banc LUG pour l'essai avec 14 % de glissement aux deux états : initial et final.

14 % glissement			
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Δ Longueur d'autocorrélation (mm)**	
		Force normale F_z	**Force longitudinale F_x**
T	01	↑ +200%	→ 0%
T	02	↑ +50%	↓ −93%
T	03	↓ −30%	↓ −20%
S+T	04	→ 0%	↓ −86%
H+T	05	↑ +50%	↓ −93%
H+T	06	↑ +80%	↓ −30%
E+T	07	↑ +200%	↓ −10%
E+T	08	↓ 50%	↓ −10%
S+H+T	09	↑ +29%	↑ +200%
S+H+T	10	↓ −30%	↑ +125%
S+E+T	11	↓ −50%	↓ −80%
S+E+T	12	↑ +75%	↓ −90%
H+E+T	13	↓ −19%	↓ −80%
H+E+T	14	↓ −50%	↓ −63%
S+H+E+T	15	↑ +100%	↓ −80%
S+H+E+T	16	↑ +125%	→ 0%

Tableau H.3 – Écarts relatifs moyens, en %, des longueurs d'autocorrélation des forces normales F_z et longitudinales F_z des éprouvettes, mesurés par le banc LUG pour l'essai avec 33 % de glissement aux deux états : initial et final.

33 % glissement			
Sollicitation(s) appliquée(s)	**Numéro d'éprouvette**	**Δ Longueur d'autocorrélation (mm)**	
		Force normale F_z	**Force longitudinale F_x**
T	01	↑ +100%	↓ −57%
T	02	↑ +67%	↓ −33%
T	03	↓ −22%	↑ +17%
S+T	04	↑ +29%	↑ +33%
H+T	05	↑ +80%	↓ −43%
H+T	06	↑ +100%	↓ −29%
E+T	07	↑ +100%	↓ −57%
E+T	08	→ 0%	↓ −93%
S+H+T	09	↑ +29%	↓ −50%
S+H+T	10	↓ −30%	↑ +125%
S+E+T	11	↑ +60%	↓ −67%
S+E+T	12	↑ +20%	↓ −60%
H+E+T	13	↓ −10%	↓ −80%
H+E+T	14	↓ −40%	↓ −86%
S+H+E+T	15	↑ +100%	↓ −93%
S+H+E+T	16	↑ +60%	↓ −70%

Annexe I – Position du barycentre des contacts de la campagne en laboratoire

Cette annexe présente les graphiques des positions des barycentres de contact mesurées au banc LUG pour les différents taux de glissement, ainsi que les positions moyennes et les écarts relatifs des coordonnées entre l'état initial et final de la campagne en laboratoire.

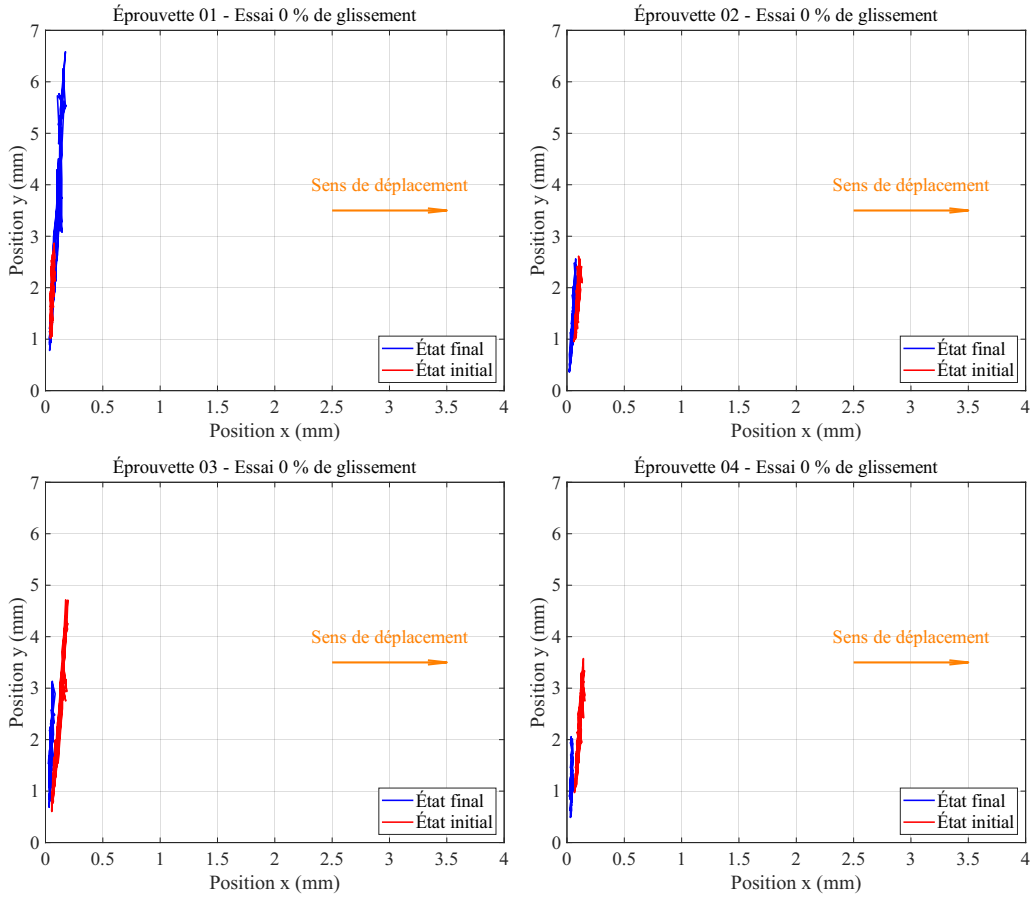


FIGURE I.1 – Positions au cours de l'essai réalisé avec 0 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 01 à 04 de la campagne en laboratoire. (1/3)

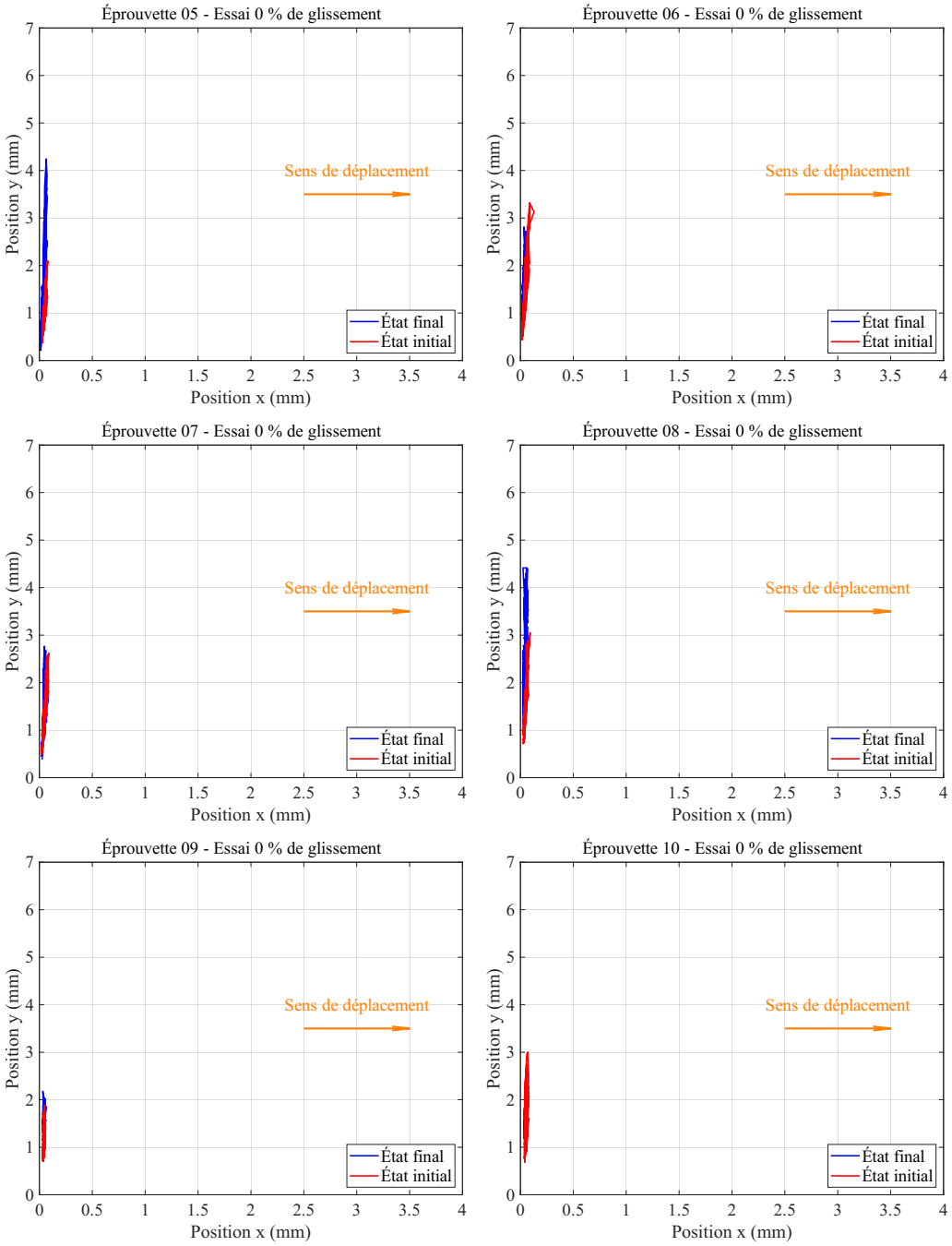


FIGURE I.2 – Positions au cours de l'essai réalisé avec 0 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 05 à 10 de la campagne en laboratoire. (2/3)

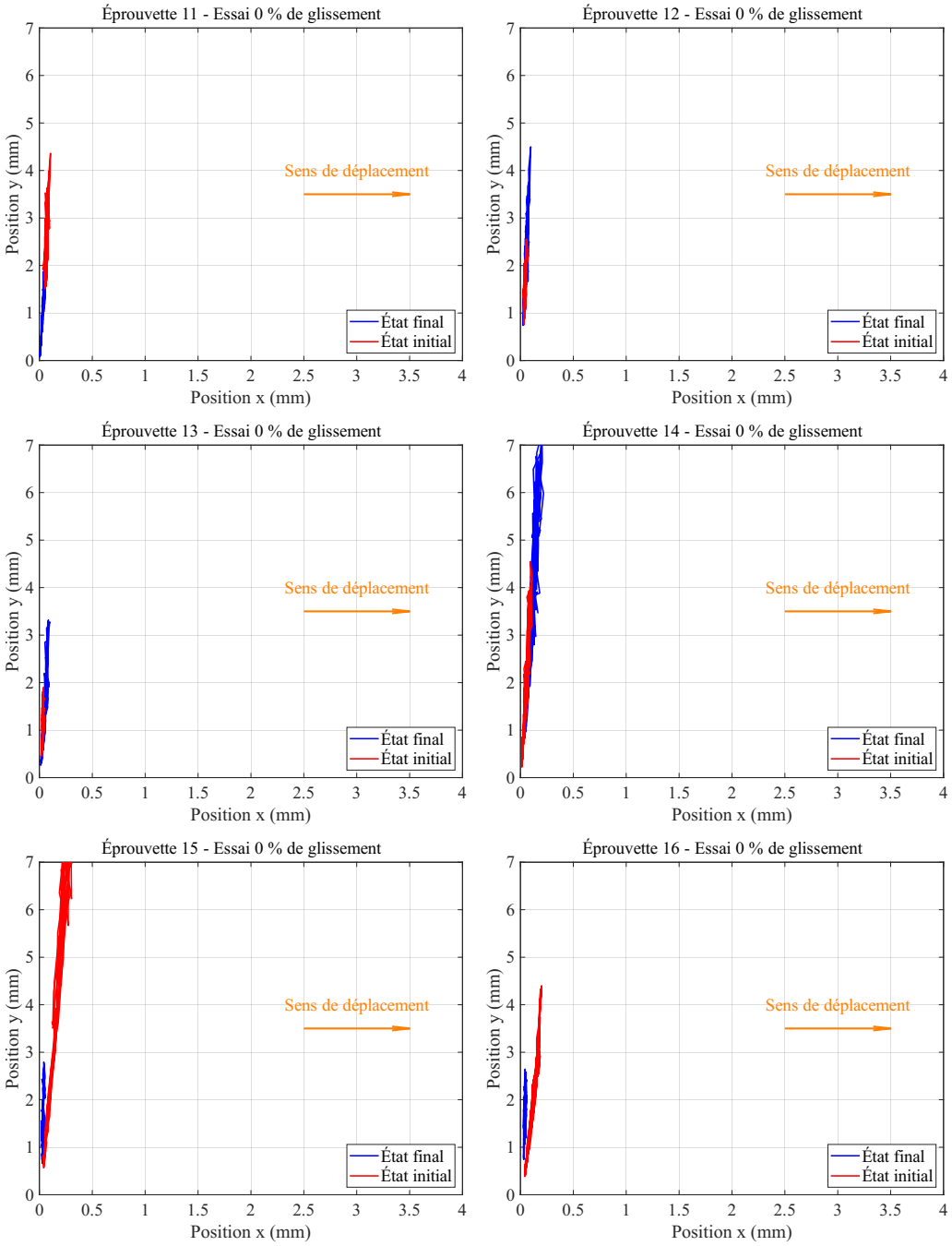


FIGURE I.3 – Positions au cours de l'essai réalisé avec 0 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 11 à 16 de la campagne en laboratoire. (3/3)

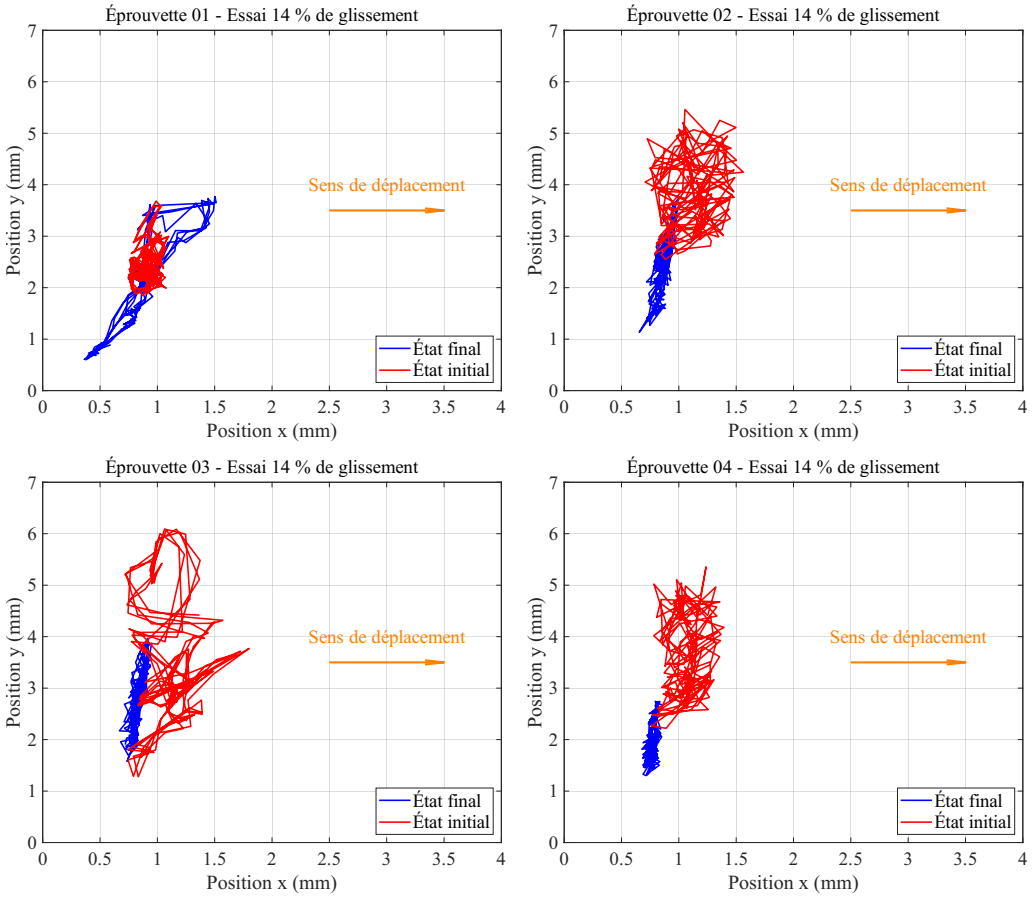


FIGURE I.4 – Positions au cours de l'essai réalisé avec 14 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 01 à 04 de la campagne en laboratoire. (1/3)

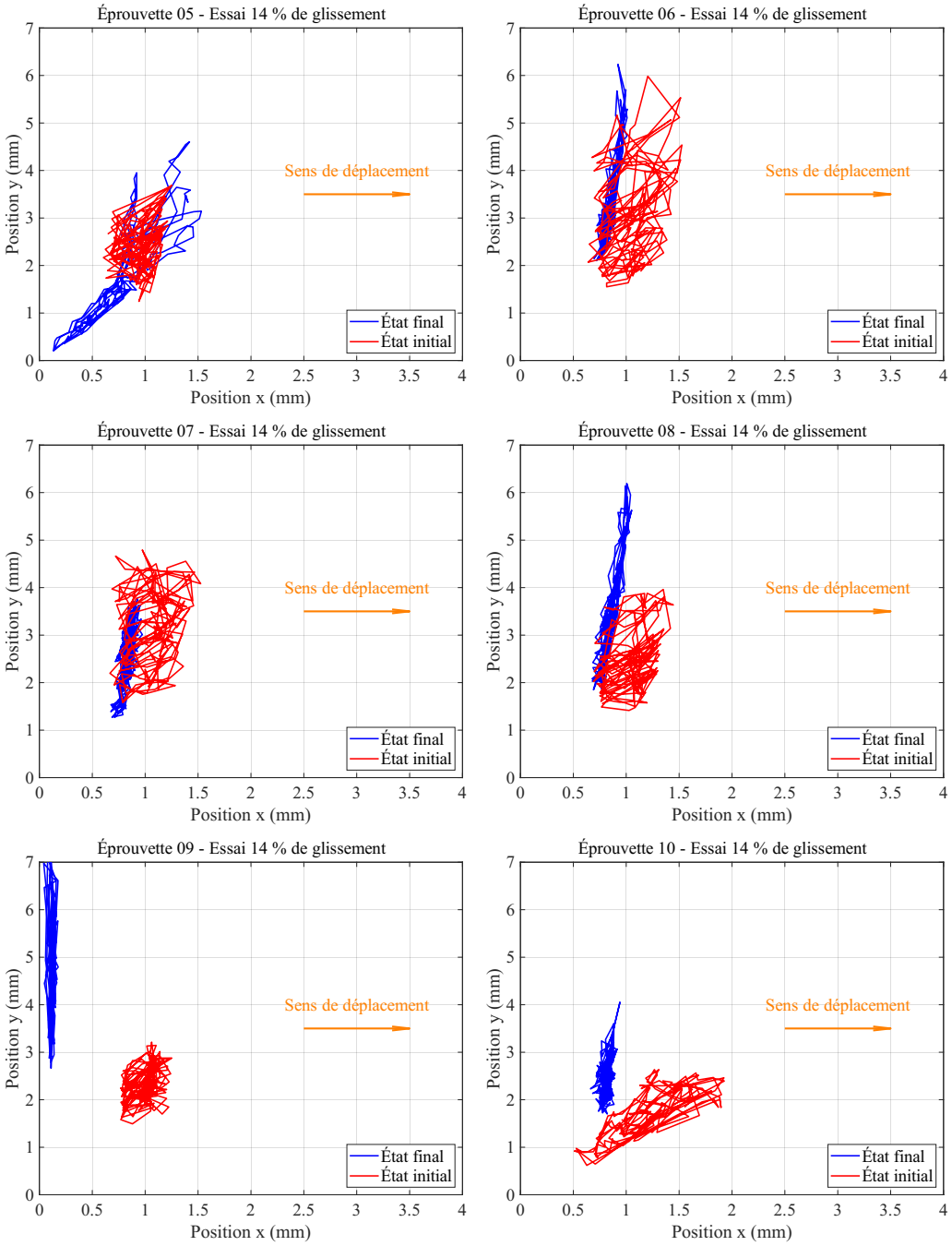


FIGURE I.5 – Positions au cours de l'essai réalisé avec 14 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 05 à 10 de la campagne en laboratoire. (2/3)

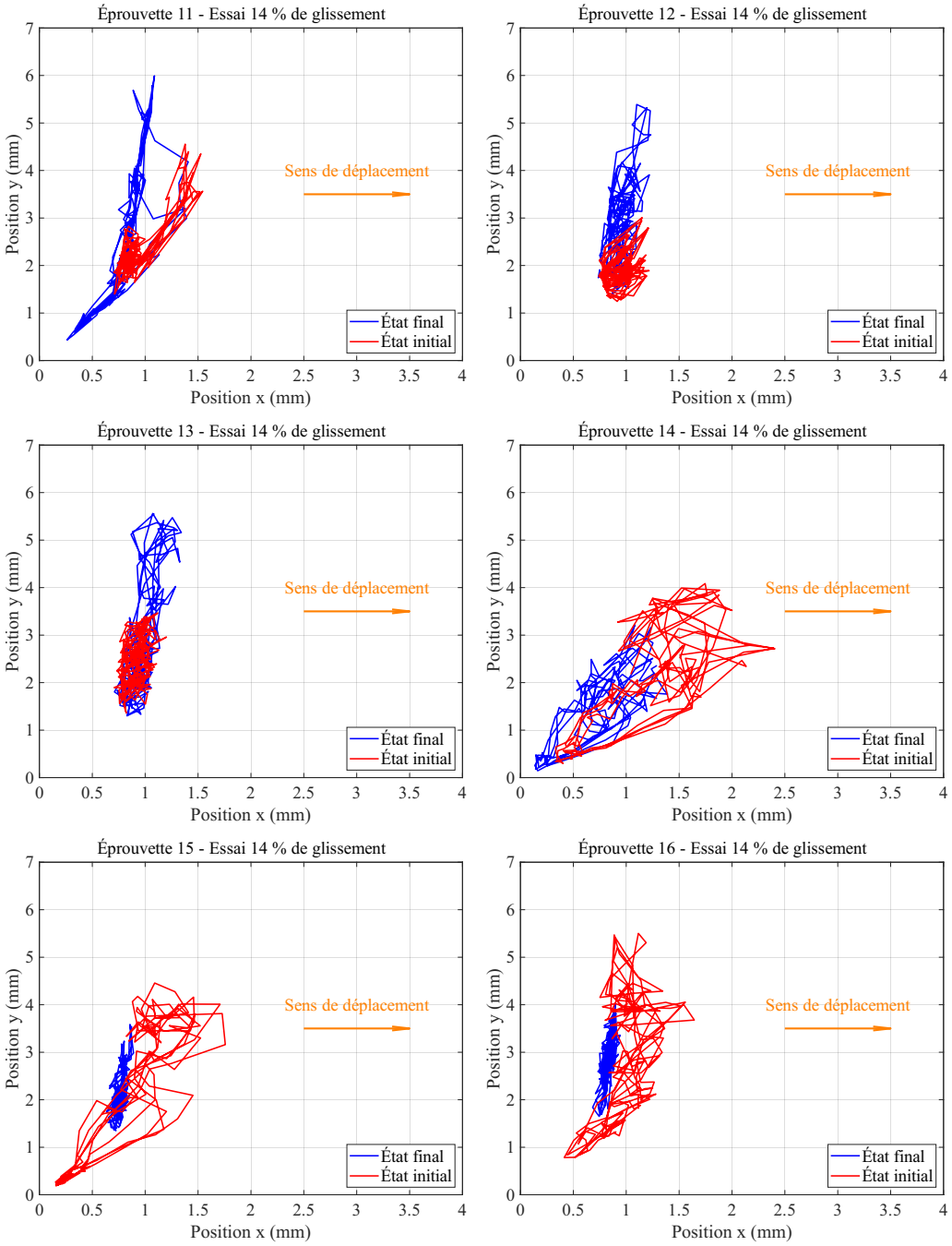


FIGURE I.6 – Positions au cours de l'essai réalisé avec 14 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 11 à 16 de la campagne en laboratoire. (3/3)

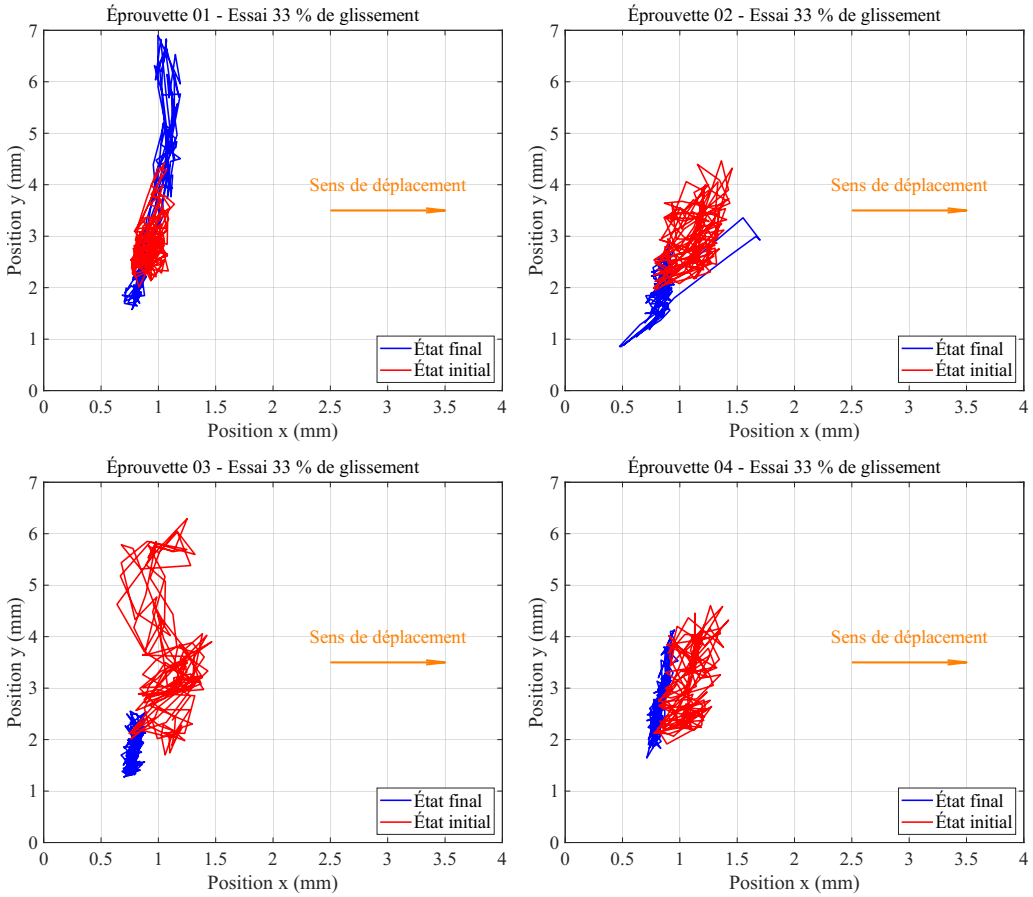


FIGURE I.7 – Positions au cours de l'essai réalisé avec 33 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 01 à 04 de la campagne en laboratoire. (1/3)

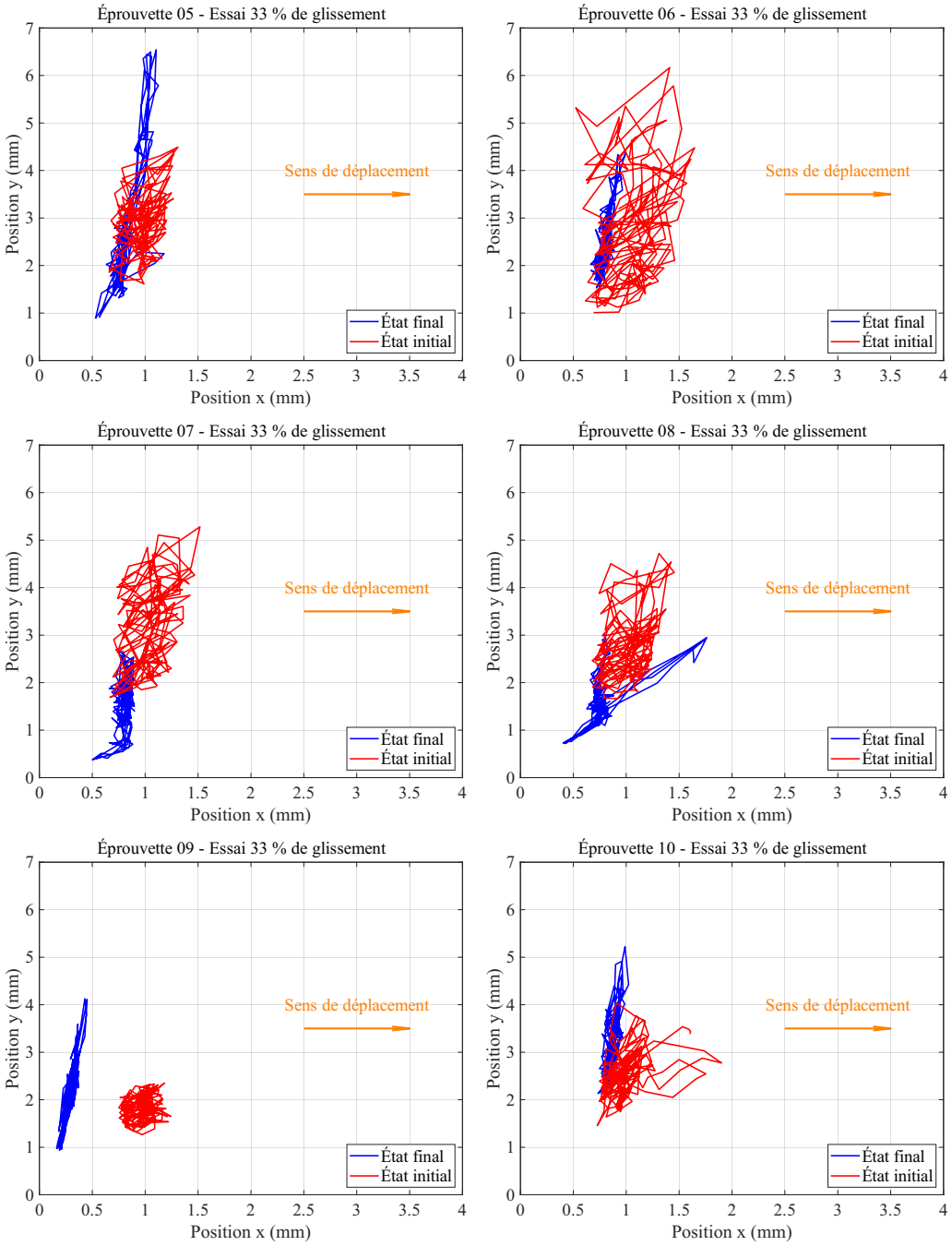


FIGURE I.8 – Positions au cours de l'essai réalisé avec 33 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 05 à 10 de la campagne en laboratoire. (2/3)

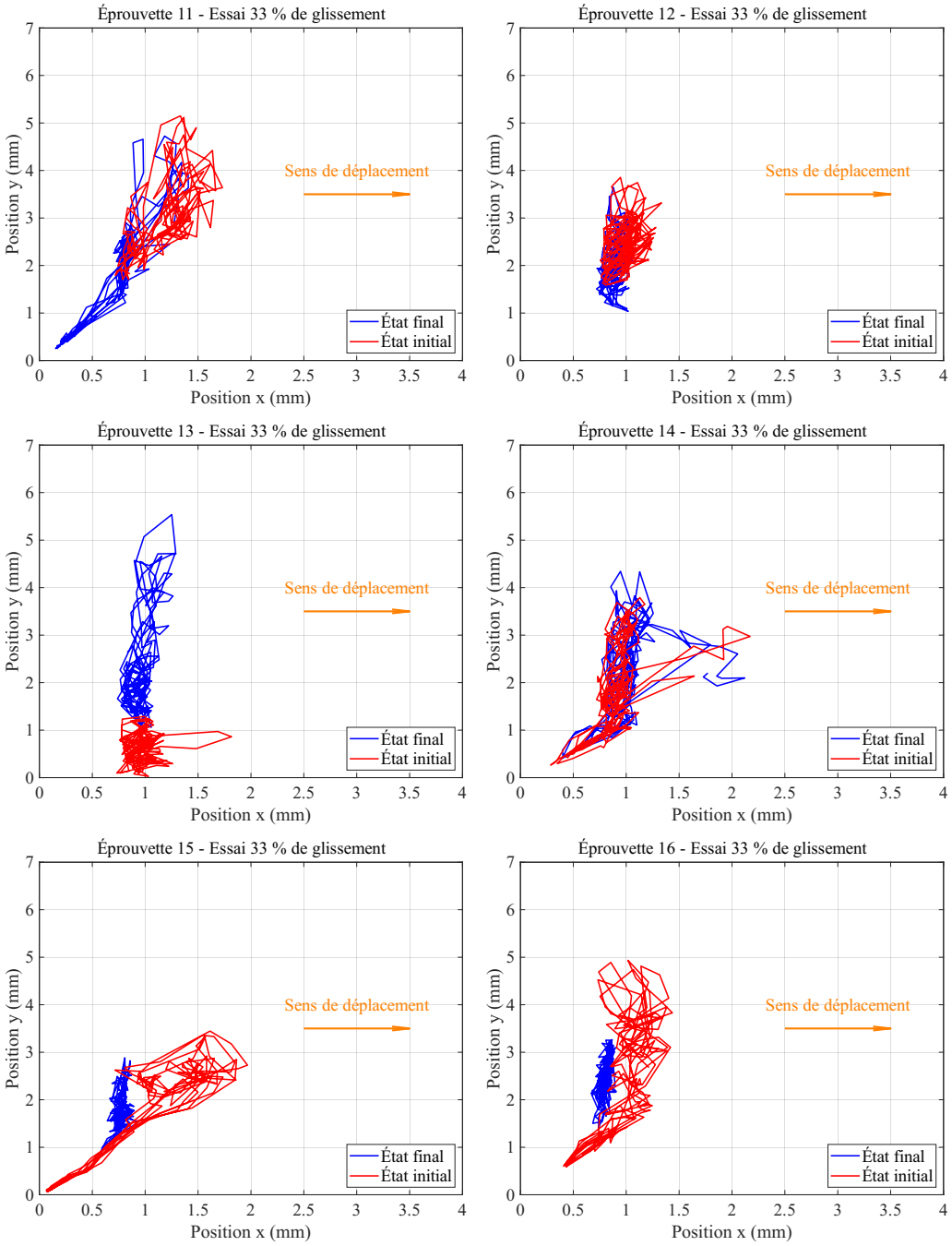
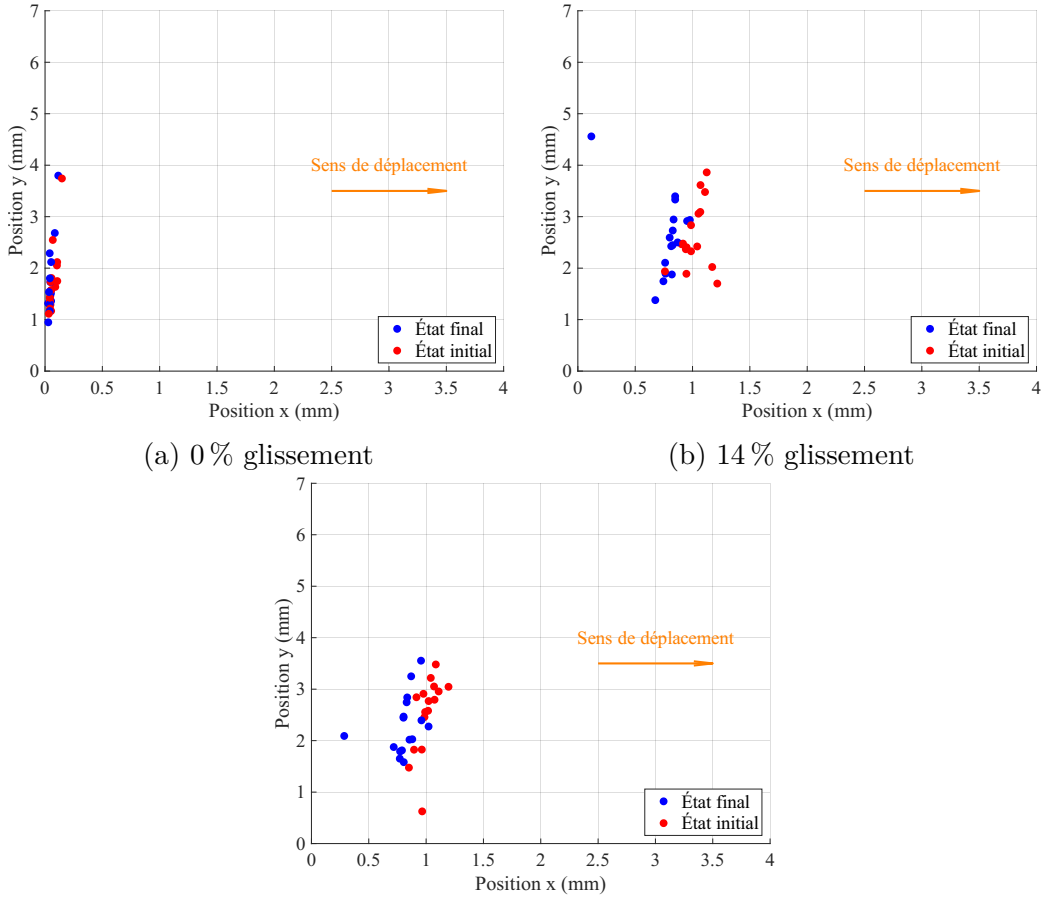


FIGURE I.9 – Positions au cours de l'essai réalisé avec 33 % de glissement au banc LUG du barycentre des contact entre un pneumatique et les éprouvettes 11 à 16 de la campagne en laboratoire. (3/3)

Les figures suivantes présentent les coordonnées moyennes des barycentres de contact, calculées à partir de l'ensemble des éprouvettes pour chacune des trois conditions d'essai.



(a) 0 % glissement (b) 14 % glissement

(c) 33 % glissement

FIGURE I.10 – Positions moyennes des barycentres de contact mesurées au banc LUG pour les trois conditions d'essai.

Le tableau I.1 synthétise les écarts relatifs des positions des barycentres de contact (coordonnées x et y), entre l'état initial et l'état final, pour l'ensemble des éprouvettes et pour les trois conditions de glissement étudiées.

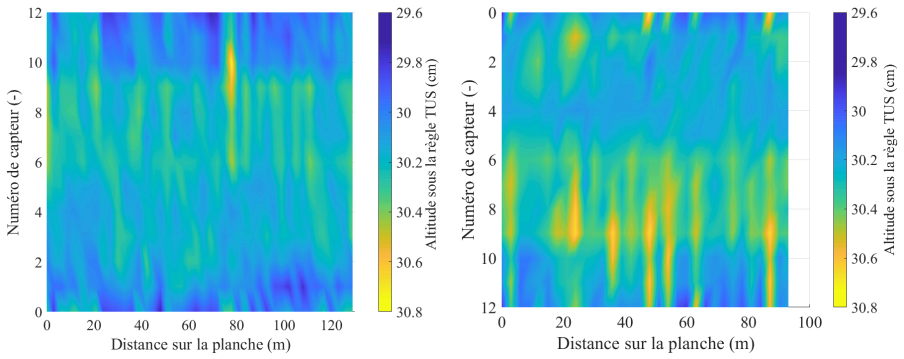
TABLEAU I.1 – Écarts relatifs, en %, des positions des coordonnées des barycentres des contacts pneumatiques/éprouvettes mesurées à l'aide du banc LUG pour les trois essais entre les deux états : initial et final.

Sollicitation(s) appliquée(s) Éprouvette	**Taux de glissement (%)**					
	0 %		**14 %**		**33 %**	
	Δ position longitudinale x et transversale y					
	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
T - 01	$\downarrow -3\%$	$\downarrow -87\%$	$\uparrow +9\%$	$\uparrow +59\%$	$\downarrow -4\%$	$\downarrow -71\%$
T - 02	$\uparrow +4\%$	$\uparrow 28\%$	$\uparrow +25\%$	$\uparrow +136\%$	$\uparrow +25\%$	$\uparrow +94\%$
T - 03	$\uparrow +6\%$	$\uparrow +32\%$	$\uparrow +28\%$	$\uparrow +75\%$	$\uparrow +30\%$	$\uparrow +167\%$
S+T - 04	$\uparrow +7\%$	$\uparrow +96\%$	$\uparrow +30\%$	$\uparrow +172\%$	$\uparrow +24\%$	$\uparrow +31\%$
H+T - 05	$\uparrow +2\%$	$\downarrow -15\%$	$\uparrow +20\%$	$\uparrow +66\%$	$\uparrow +14\%$	$\uparrow +7\%$
H+T - 06	$\uparrow +1\%$	$\uparrow +4\%$	$\uparrow +20\%$	$\downarrow -27\%$	$\uparrow +27\%$	$\uparrow +35\%$
E+T - 07	$\rightarrow 0\%$	$\downarrow -28\%$	$\uparrow +24\%$	$\uparrow +65\%$	$\uparrow +24\%$	$\uparrow +164\%$
E+T - 08	$\rightarrow 0\%$	$\downarrow -83\%$	$\uparrow +19\%$	$\downarrow -97\%$	$\uparrow +25\%$	$\uparrow +112\%$
S+H+T - 09	$\rightarrow 0\%$	$\downarrow -9\%$	$\uparrow +87\%$	$\downarrow -223\%$	$\uparrow +68\%$	$\downarrow -26\%$
S+H+T - 10	$\rightarrow 0\%$	$\uparrow +7\%$	$\uparrow +40\%$	$\downarrow -73\%$	$\uparrow +15\%$	$\downarrow -67\%$
S+E+T - 11	$\uparrow +4\%$	$\uparrow +160\%$	$\uparrow +14\%$	$\downarrow -23\%$	$\uparrow +48\%$	$\uparrow +117\%$
S+E+T - 12	$\downarrow -1\%$	$\downarrow -69\%$	$\downarrow -1\%$	$\downarrow -103\%$	$\uparrow +11\%$	$\uparrow +43\%$
H+E+T - 13	$\downarrow -1\%$	$\downarrow -5\%$	$\downarrow -6\%$	$\downarrow -46\%$	$\uparrow +1\%$	$\downarrow -177\%$
H+E+T - 14	$\downarrow -7\%$	$\downarrow -206\%$	$\uparrow +50\%$	$\uparrow +64\%$	$\downarrow -13\%$	$\downarrow -45\%$
S+H+E+T - 15	$\uparrow +11\%$	$\uparrow +221\%$	$\rightarrow 0\%$	$\downarrow -17\%$	$\uparrow +8\%$	$\downarrow -32\%$
S+H+E+T - 16	$\uparrow +6\%$	$\downarrow -5\%$	$\uparrow +15\%$	$\downarrow -11\%$	$\uparrow +19\%$	$\uparrow +9\%$

Annexe J – Étude de l'uniformité transversale - Appareil TUS

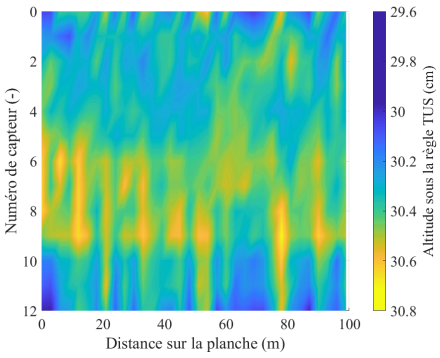
Cette annexe présente l'analyse de l'uniformité transversale des revêtements à partir des données de l'appareil TUS.

Le traitement des altitudes brutes mesurées par la règle TUS permet de reproduire des surfaces en 2 dimensions indexées par la hauteur. Les figures J.1 représentent ces surfaces pour les trois planches d'enrobé bitumineux étudiées durant la campagne terrain. Les altitudes sont mesurées sous la règle TUS de mesure. Cela signifie que plus la valeur mesurée est basse, plus le point se situe en hauteur et inversement.



(a) BBSG silico-calcaire

(b) BBM laitier



(c) BBM silico-calcaire

FIGURE J.1 – Représentations en 2D indexées des altitudes mesurées sous la règle TUS pour les 13 capteurs sur toute la longueur des trois différents revêtements.

Annexe K – Code ra3d - Algorithmes

Cette annexe regroupe les principaux algorithmes implémentés dans le code ra3d, incluant les étapes de composition et projection modales, d'interpolation, de pénalité ainsi que le schéma d'intégration temporelle.

Le tableau suivant K.1 permet de dresser la liste de toutes les dénominations utilisées dans les algorithmes du code ra3d.

Tableau K.1 – Récapitulatif des notations utilisées dans les algorithmes du code ra3d.

Notation	**Forme**	**Représentation**
U_n pour n=0,1,2	Tableau à un indice	Déformée modale $U_{\mathrm{n,k}}$
V_n pour n=0,1,2	Tableau à un indice	Vitesse modale $V_{\mathrm{n,k}}$
F_n pour n=0,1,2	Tableau à un indice	Force modale $F_{\mathrm{n,k}}$
u	Tableau à deux indices	Champ de déformation u_{i_x,i_y} avec i_x,i_y un nœud du maillage
f	Tableau à deux indices	Champ de force f_{i_x,i_y} avec i_x,i_y un nœud du maillage
h	Tableau à deux indices	Altitudes du profil de surface h_{i_x,i_y} avec i_x,i_y un nœud du maillage
$\psi_{i_x,i_y,k}$	Tableau à trois indices	Modes où avec i_x,i_y un nœud du maillage et k l'indice du mode
$N_{\mathrm{m,i}}$	Nombre	Nombre de modes du cylindre
N_x et N_y	Nombre	Nombre de nœuds dans les directions x et y
dx et dy	Nombre	Pas spatiaux dans les directions x et y
Z	Nombre	Écart entre les deux lignes moyennes des deux profils cylindre/texture
ζ, χ, j_x, j_y	Nombre	Coordonnées locales du nœud esclave dans le repère maître
τ	Nombre	Pas de temps

Algorithme général du code

L'algorithme suivant correspond à l'algorithme général du code ra3d.

Algorithme 1 : Code général de l'algorithme ra3d

Data : Déplacements, vitesses et forces initialisés
Result : Évolution temporelle des déplacements et forces
Initialisation :
for $k \leftarrow 0$ **to** N_m **do**
    $U_{0,k} \leftarrow 0$ `// Tout le tableau est mis à zéro`
    $U_{1,k} \leftarrow 0$
Boucle sur le temps :
for $i_t \leftarrow 0$ **to** $N_T - 1$ **do**
    $X \leftarrow V \times i_t \times \tau$ `// Position horizontale du cylindre`
    $u \leftarrow modalcomposition(U_1, \psi)$ `// Déformée dans l'espace physique`
    $f \leftarrow contactforce(X, u, h)$ `// Forces de contact dans l'espace physique`
    for $k \leftarrow 0$ **to** N_m **do**
        $F_{1,k} \leftarrow modalprojection(f, \psi_k)$ `// Forces dans l'espace modal`
        $(U_{2,k}, V_{1,k}) \leftarrow timeintegration(U_{1,k}, U_{0,k}, F_{1,k})$ `// Prédiction au pas suivant`
        $U_{0,k} \leftarrow U_{1,k}$ `// Translation du temps`
        $U_{1,k} \leftarrow U_{2,k}$

Algorithme de composition modale

L'algorithme de composition modale est basé sur l'équation 5.13 et $v = \dot{u}$. Il permet de calculer le champ de déplacement u_{i_x,i_y} au pas de temps courant connaissant la déformée modale $U_{i_t,k}$.

Algorithme 2 : Composition modale

Fonction $u = modalcomposition(U, \psi)$
for $i_x \leftarrow 0$ **to** N_x **do**
    for $i_y \leftarrow 0$ **to** N_y **do**
        $u_{i_x,i_y} \leftarrow 0$
        for $k \leftarrow 0$ **to** N_m **do**
            $u_{i_x,i_y} \leftarrow u_{i_x,i_y} + U_k \times \psi_{i_x,i_y,k}$
return u

Algorithme de pénalité

L'algorithme de pénalité permet de calculer la force de contact f_{i_x,i_y} à partir des champs de déformations u_{i_x,i_y}.

Algorithme 3 : Algorithme de pénalité

Fonction $f = penaltycontactforce(X, u, h)$
for $i_x \leftarrow 0$ **to** N_x **do**
  for $i_y \leftarrow 0$ **to** N_y **do**
    // Calcul des coordonnées locales χ, ζ, j_x, j_y du nœud esclave dans le repère maître
    $h_1 \leftarrow interpolation(\chi, \zeta, j_x, j_y, h)$
    // Altitude du profil maître sous le nœud esclave
    $g_{i_x,i_y} \leftarrow h_{i_x,i_y} + u_{i_x,i_y} + h_1 - Z$
    // Pénétration du nœud esclave
    if $g_{i_x,i_y} \geq 0$ **then**
      $f_{i_x,i_y} \leftarrow f_{i_x,i_y} - \kappa \times g_{i_x,i_y}$
      // Forces sur le nœud esclave
      for $r \leftarrow 0$ **to** 1 *(ou 3)* **do**
        for $p \leftarrow 0$ **to** 1 *(ou 3)* **do**
          $f_{j_x+r,j_y+p} \leftarrow f_{j_x+r,j_y+p} - réaction(\chi, \zeta, r, p) \times \kappa \times g_{i_x,i_y}$
          // Réactions sur les nœuds maîtres
return f

Algorithme d'interpolation linéaire

L'algorithme d'interpolation linéaire, dont le principe est explicité dans la section 5.1.4, calcule la déformée et la hauteur du profil du point de coordonnées ζ, χ dans le repère maître. Ce point se situe entre les nœuds d'indices j_x, j_y et $j_x + 1$, $j_x + 1$. Les coordonnées χ et ζ sont sans dimension c'est à dire $0 \leq \zeta \leq 1$, $0 \leq \chi \leq 1$. Lorsque $\zeta = 0$, le point est situé au nœud j_x et lorsque $\zeta = 1$ le point est sur le nœud $j_x + 1$ (idem pour χ).

Algorithme 4 : Interpolation linéaire

Fonction $f = linearinterpolation(\chi, \zeta, j_x, j_y, h)$
$P_0 \leftarrow 1 - \chi$
$P_1 \leftarrow \chi$
$R_0 \leftarrow 1 - \zeta$
$R_1 \leftarrow \zeta$
$linearinterpolation \leftarrow 0$
for $r \leftarrow 0$ **to** 1 **do**
  for $p \leftarrow 0$ **to** 1 **do**
    $linearinterpolation \leftarrow linearinterpolation + P_r \times R_p \times h_{j_x+r,j_y+p}$
return $linearinterpolation$

Algorithme des réactions des nœuds avec une interpolation linéaire

Comme explicité précédemment dans la section 5.1.5, des réactions entre tous les nœuds lors du contact apparaissent. Cet algorithme permet de calculer ces réactions à partir d'une interpolation linéaire.

Algorithme 5 : Réactions des nœuds avec interpolation linéaire

Fonction $linearreaction(\chi, \zeta, r, p)$
$P_0 \leftarrow 1 - \chi$
$P_1 \leftarrow \chi$
$R_0 \leftarrow 1 - \zeta$
$R_1 \leftarrow \zeta$
$linearreaction \leftarrow P_r \times R_p$
return $linearreaction$

Algorithme de projection modale

L'algorithme de projection modale est l'opération inverse de la composition modale décrite dans l'algorithme 2. Il permet de calculer la force modale $F_{i_t,k}$ au pas de temps courant τ connaissant le champ de force f_{i_x,i_y}.

Algorithme 6 : Projection modale

Fonction $F = modalprojection(f, \psi)$
for $k \leftarrow 0$ **to** N_m **do**
  $F_k \leftarrow 0$
  for $i_x \leftarrow 0$ **to** N_x **do**
    for $i_y \leftarrow 0$ **to** N_y **do**
      $F_k \leftarrow F_k + f_{i_x,i_y} \times \psi_{i_x,i_y,k}$
  $F_k \leftarrow F_k \times dx \times dy$
return F

Algorithme des différences centrées

L'équation générale du mouvement du cylindre est réduite à un système d'équations différentielles ordinaires de premier ordre (équations 5.19 et 5.20). Ce système résolu à l'aide d'un schéma d'intégration temporelle basé sur les différences finies. Les coefficients a_k, b_k et $c_{i,k}$ sont calculés par les équations (5.25, 5.26 et 5.27) avant d'entrer dans la boucle principale du temps. L'algorithme consiste à appliquer l'équation 5.24 à chaque pas de temps. La déformée $U_{i_{t+1},k}$ est calculée au pas de temps ultérieur tandis que la vitesse $V_{i_t,k}$ est calculée au pas de temps courant.

Algorithme 7 : Différences centrées

Fonction $(U_{2,k}, V_{1,k}) = timeintegration(U_{2,k}, V_{1,k}, F_{1,k})$
for $k \leftarrow 1$ **to** N_m **do**
  $U_{2,k} \leftarrow a_k \times U_{1,k} + b_k \times U_{0,k} + c_k \times F_{1,k}$
  $V_{1,k} \leftarrow \dfrac{U_{2,k} - U_{0,k}}{2 \times dt}$
return $(U_{2,k}, V_{1,k})$

Annexe L – Code ra3d - Cartographies de pression

Cette annexe présente les cartographies de pression calculées avec le code ra3d, en comparant les états initiaux et finaux des éprouvettes de la campagne en laboratoire.

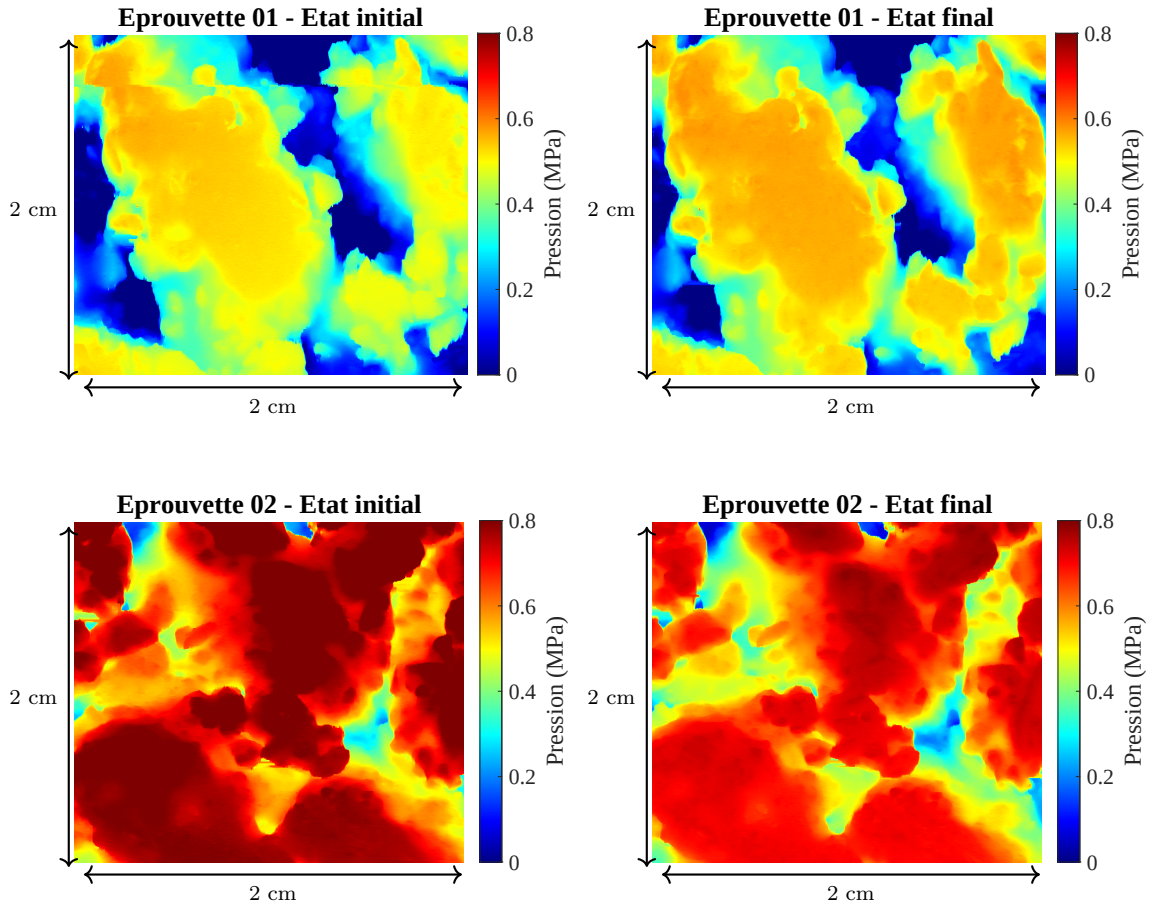


FIGURE L.1 – Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de la campagne en laboratoire des éprouvettes 01 et 02. (1/6)

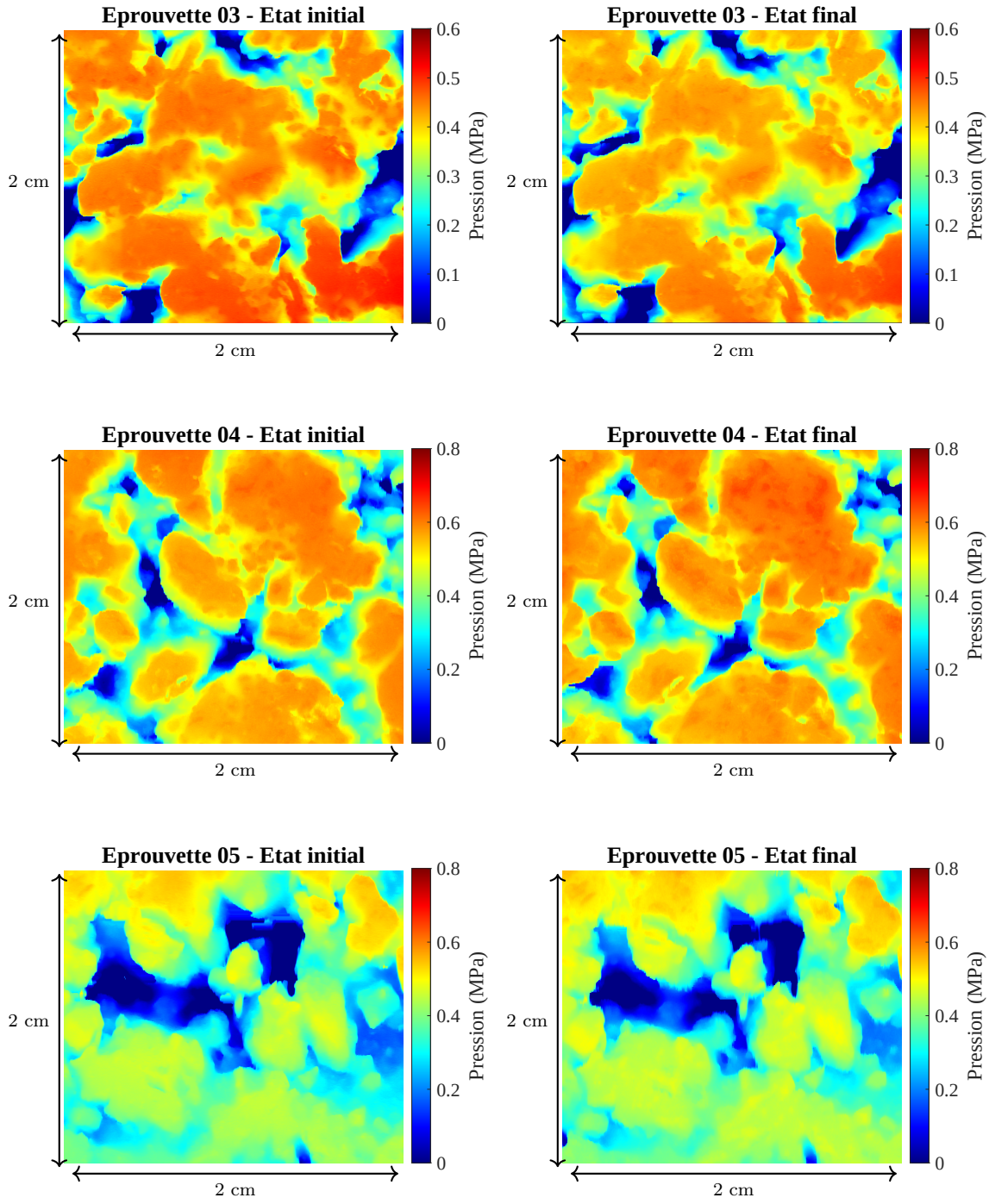


FIGURE L.2 – Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de la campagne en laboratoire des éprouvettes 03 à 05. (2/6)

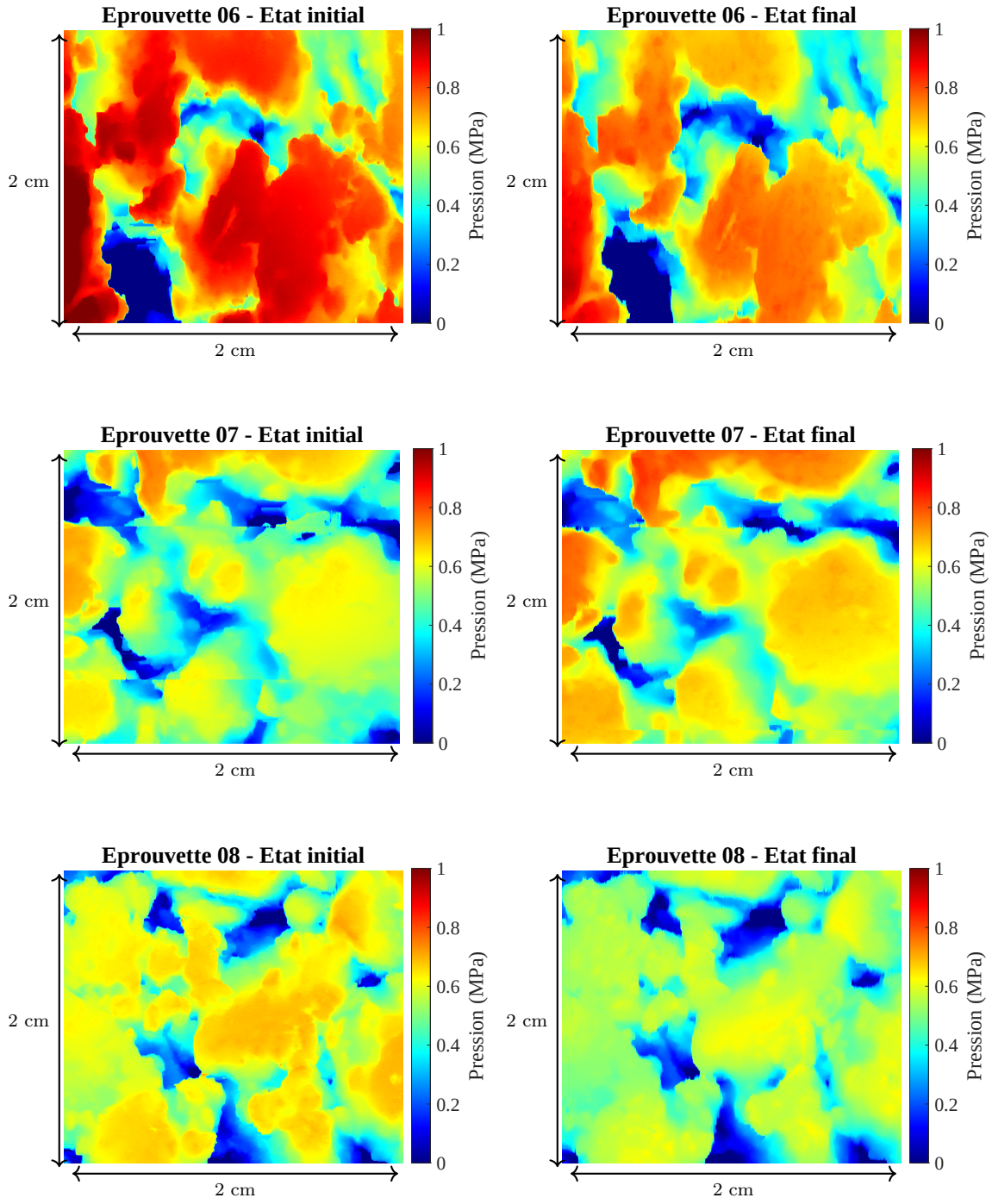


FIGURE L.3 – Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de la campagne en laboratoire des éprouvettes 06 à 08. (3/6)

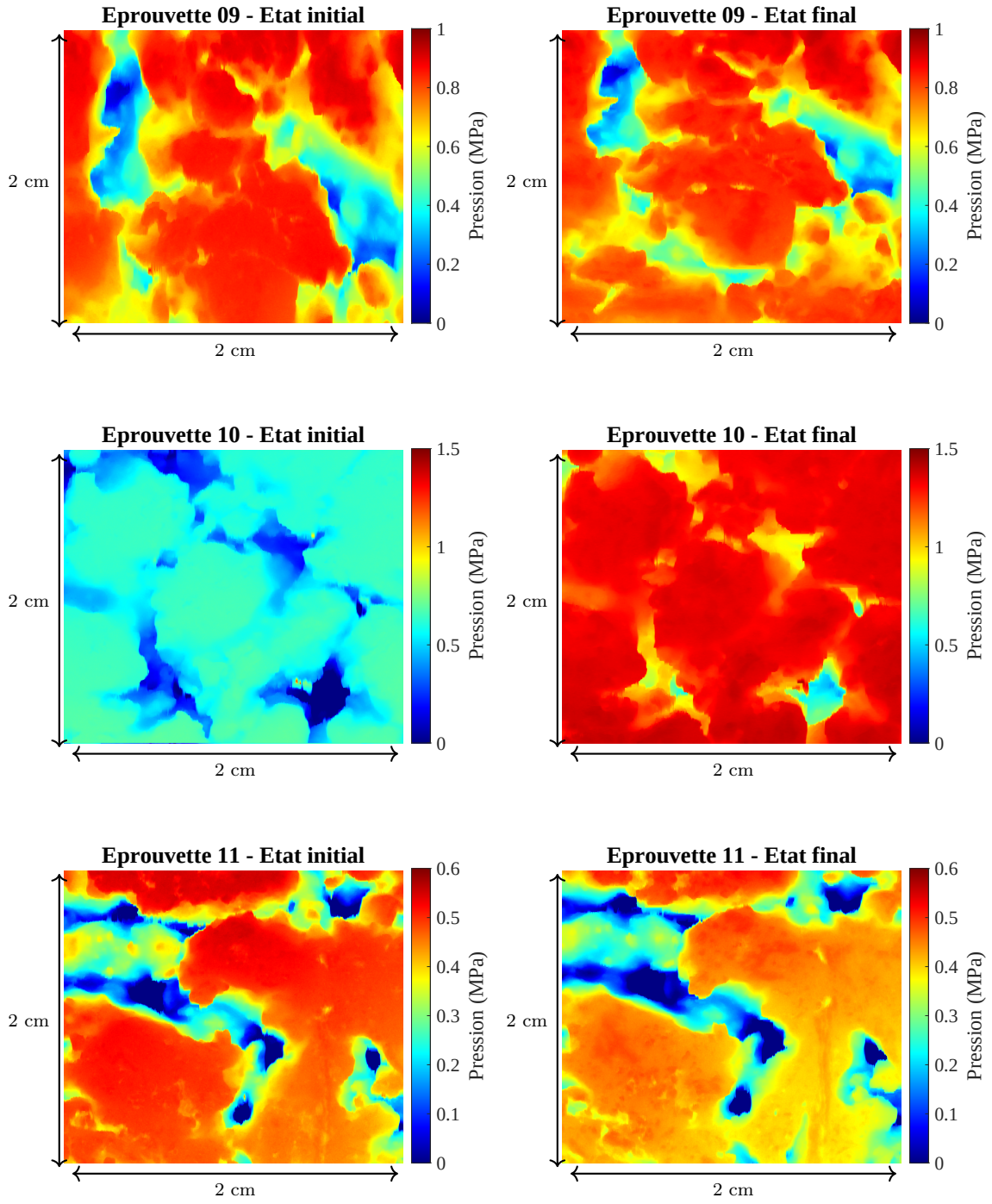


FIGURE L.4 – Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de la campagne en laboratoire des éprouvettes 09 à 11. (4/6)

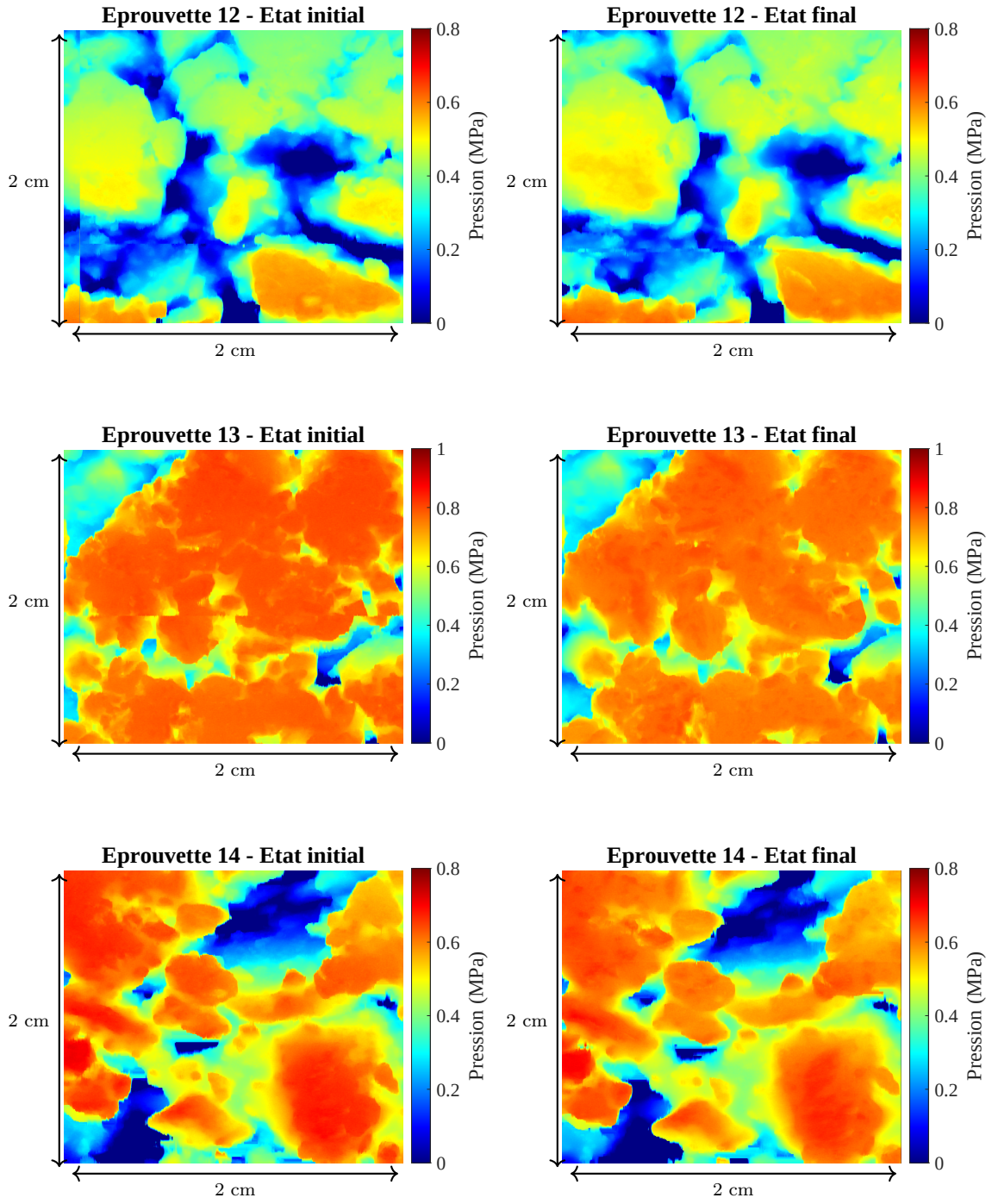


FIGURE L.5 – Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de la campagne en laboratoire des éprouvettes 12 à 14. (5/6)

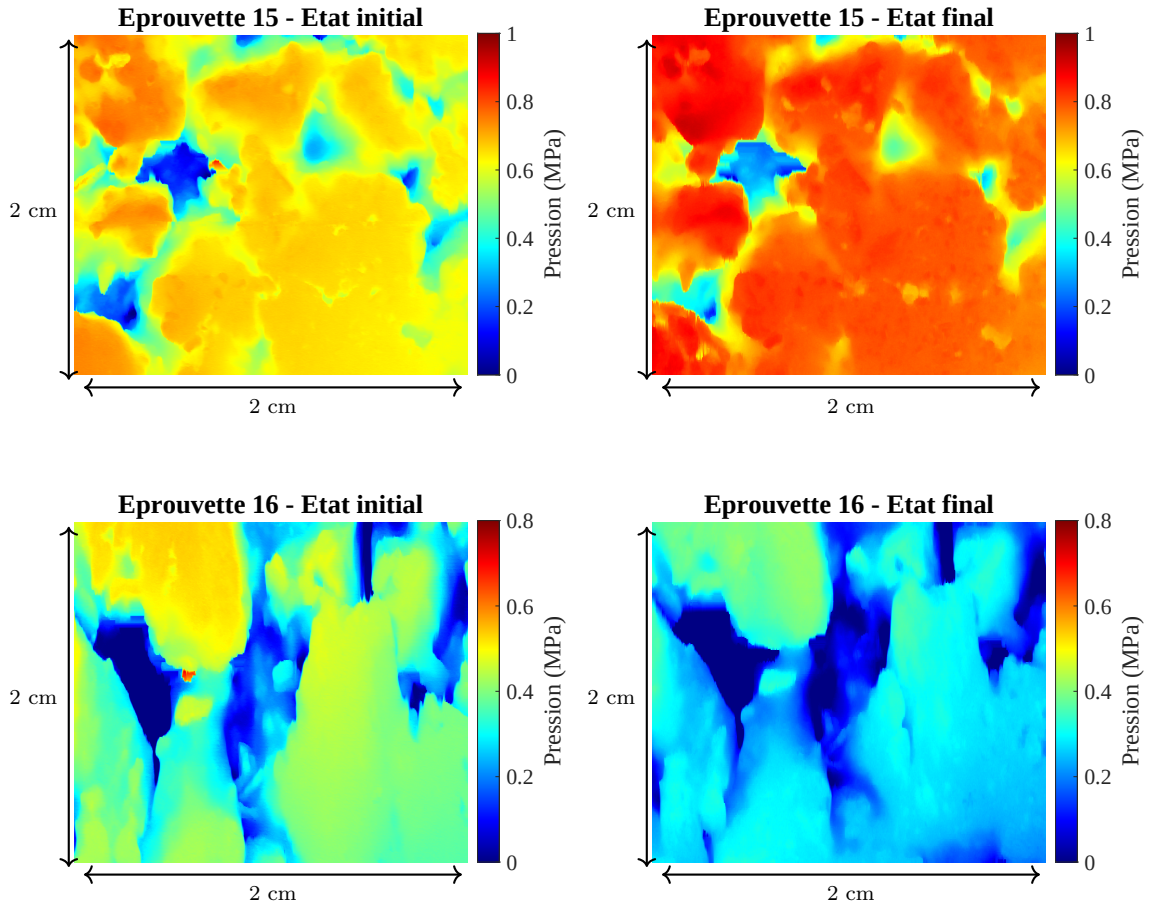


FIGURE L.6 – Comparaison des cartographies de pression entre l'état initial et final de la campagne en laboratoire des éprouvettes 15 à 16. (6/6)