HAL open science

# Polishing and skid-resistance of road surfaces

Zhenzhong Tang

## To cite this version:

Zhenzhong Tang. Polishing and skid-resistance of road surfaces. Engineering Sciences [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2007. English. NNT : . pastel-00003623

**HAL Id: pastel-00003623**

**https://pastel.hal.science/pastel-00003623**

Submitted on 10 Apr 2008

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

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

École Doctorale Matériaux, Ouvrages, Durabilité, Environnement et Structures

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

Spécialité : GÉNIE CIVIL

Zhenzhong TANG

# POLISSAGE ET ADHÉRENCE DES CHAUSSÉES ROUTIÈRES

soutenue le 17 Octobre 2007

devant la commission d'examen composée de :

| | |
|---|---|
| M. Yves Berthier (Directeur de Recherche, CNRS) | Président du jury |
| M. Siegfried Huschek (Professeur, Université de Berlin) | Rapporteur |
| M. Hassan Zahouani (Professeur, ENISE) | Rapporteur |
| M. Joël Conan (Directeur technique, Eurovia) | Examinateur |
| M. Gérard Delalande (Ingénieur, LRPC d'Angers) | Examinateur |
| M. Pascal Ehret (Ingénieur, Société Michelin) | Examinateur |
| M. Minh-Tân Do (Ingénieur, LCPC) | Co-encadrant |
| M. François de Larrard (Directeur de Recherche, LCPC) | Directeur de thèse |

Laboratoire d'accueil : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes
Route de Bouaye – BP 4129, 44341 Bouguenais cedex

献给亲爱的母亲和祖母，
愿你们分享到这一快乐的时刻，
你们永远活在我的心中，铭记在我的脑海里。

À la mémoire de ma mère,

À la mémoire de ma grand-mère,

À ma famille.

# Avant - propos

Ce travail de recherche a été réalisé au sein de la Division Entretien, Sécurité et Acoustique des Routes (ESAR), Section Infrastructure et Sécurité Routière (ISR), au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), pour l'obtention d'un diplôme de docteur à l'Ecole Doctorale Matériaux, Ouvrages, Durabilité, Environnement, Structures (MODES) de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC).

Je voudrais tout d'abord remercier monsieur François de Larrard, directeur de recherche du LCPC, d'avoir accepté d'assurer la direction de ma thèse avec beaucoup de disponibilité malgré sa lourde charge de travail. La complémentarité de sa compétence par rapport à celle des autres encadrants et son exigence m'ont beaucoup apporté.

Ce travail n'aurait jamais pu aboutir sans les précieux conseils et les nombreuses discussions avec mes conseillers d'études. Je tiens à remercier monsieur Minh-Tan Do, ingénieur des Travaux Publics de l'Etat au LCPC et responsable de la section ISR, qui a partagé avec moi ses connaissances scientifiques, et qui m'a suivi dans mes travaux avec sa sympathie et sa patience, pendant toute la durée de ma thèse.

Je tiens à remercier monsieur Yves Berthier, directeur de recherche du CNRS, d'avoir accepté de présider mon jury de thèse.

J'aimerais remercier également messieurs Hassan Zahouani, professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne (ENISE), et Siegfried Huschek, professeur à l'Université de Berlin, d'avoir accepté d'être rapporteur de mon mémoire de thèse. Mes remerciements vont particulièrement au professeur Siegfried Huschek, qui vient de très loin pour participer à mon jury.

Je souhaite aussi exprimer mes remerciements à messieurs Joël Conan, directeur technique régional Eurovia, et Gérard Delalande, LRPC d'Angers, pour le temps qu'ils m'ont consacré à me faire part de leurs expériences, pour leur participation au comité de suivi puis au jury. Merci également à monsieur Pascal Ehret, Société Michelin, d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

J'aimerais spécialement remercier monsieur Malal Kane, chargé de recherche au LCPC, qui m'a apporté beaucoup de conseils et m'a fait profiter avec enthousiasme de ses connaissances physiques.

J'adresse toute ma gratitude à monsieur Daniel Levacher, professeur à l'Université de Caen, qui m'a ouvert la porte de la Science Française, et qui m'a beaucoup assisté pendant mon séjour en France.

La grande quantité d'expérimentation relatée dans cette thèse ne doit pas être oubliée, et n'aurait pas été possible sans le soutien d'équipes techniques très compétentes. Je remercie notamment messieurs Paul Marsac et Patrick Maisonneuve pour leur expérience pratique et pour la réalisation d'essai. J'aimerais remercier aussi messieurs Valéry Le Turdu, Pierre Cailleau, et les autres collègues du LRPC d'Angers pour leur amicale collaboration.

Je souhaite inclure dans mes remerciements les personnes de la direction scientifique et technique du LCPC qui m'ont piloté et m'ont donné des conseils : Messieurs Rémi Pochat, Jean-Michel Piau, Michel Boulet, Christian Stéfani et Madame Marie-Line Gallenne. J'adresse mes remerciements à toutes les personnes avec qui j'ai pu avoir des échanges fructueux : Yves Delalande, Yves Brossaud, Emmanuel Chailleux, Jean-Pierre Kerzrého. Merci également à la Section LMR du LCPC de nous avoir aidé lors de la fabrication des échantillons.

Je voudrais remercier tous mes collègues de la section ISR du LCPC : Alexandra Mosset, Pierre-Olivier Vandanjon, Pierre Guillevic, Alex Coiret, Jean-Marie Prual, Patrice Bernier, Michel Le Cerf, Patrick Daburon, Olivier Orfila, Cédric Andrieux. Notamment, je remercie notre sympathique secrétaire Odile Dudouet, pour les corrections de mon rapport. Je garderai un bon souvenir d'eux durant ses trois ans.

Je tiens également à remercier monsieur Philippe Lepert de m'avoir accueilli dans la division ESAR. Je remercie tous les membres de la division d'ESAR qui contribuent à la bonne ambiance.

J'aimerais remercier Mesdames Nicole Tchang (LCPC), Marine Daniel (ENPC) et Monsieur René Bourrée (LCPC) qui s'occupent des doctorants et qui m'ont donné beaucoup de conseils sur la vie en France.

Je remercie tous ceux que j'ai rencontrés et toutes les personnes qui m'ont fait profiter de leur gentillesse pendant mon séjour.

Enfin, je tiens à exprimer ma grande gratitude à toute ma famille qui m'a soutenu et se soucie de moi dans ma vie. En particulier, je dois remercier ma mère et ma grande mère malgré notre obstacle insurmontable. Elles vivent toujours dans ma mémoire à tout jamais jusqu'à la fin des siècles.

**Polissage et adhérence des chaussées routières**

Résumé :

La présente thèse concerne l'adhérence des pneumatiques avec les chaussées routières, et la possibilité de prévoir son évolution à l'aide d'essais de laboratoire et de modélisations. Tout d'abord, une méthodologie originale de polissage et de mesure de l'adhérence en laboratoire est présentée ; elle s'appuie sur la machine de Wehner et Schulze, développée en Allemagne. Grâce à elle, on peut mesurer l'évolution du coefficient de frottement avec la durée du polissage. Des chantiers routiers sont suivis dans le temps, afin de comparer la simulation en laboratoire et l'évolution réelle de l'adhérence.

Parallèlement à la simulation expérimentale, des lois d'évolution sont établies. Un modèle à cinq paramètres est tout d'abord proposé, que l'on tente de relier aux caractéristiques des granulats (PSV, diamètre maximal, microtexture, etc.). Ensuite, un modèle plus physique est ébauché, explicitant les mécanismes de vieillissement et de décapage du bitume, et de polissage des granulats. Un coefficient d'équivalence entre le trafic poids lourd et le nombre de cycles d'usure en laboratoire est proposé, devant permettre à terme de choisir entre différents matériaux de couche de surface, et de prévoir l'évolution de l'adhérence d'une chaussée neuve. Enfin, les profils de surface sont examinés à différents états de polissage, dans le but de relier l'évolution de l'adhérence aux paramètres de rugosité, et aux caractéristiques des granulats (PSV, MDE, LA).

Mots-clés : adhérence, décapage, échelle, indenteur, LA, macrotexture, MDE, microtexture, modèles, polissage, PSV, revêtement, route, vieillissement, Wehner et Schulze.

**Polishing and skid-resistance of road surfaces**

Abstract :

The thesis deals with road skid resistance, and with the possibility to predict its evolution through laboratory tests and models. First an original laboratory method is presented to polish and to measure the friction coefficient, using the Wehner & Schulze machine, developed in Germany. This method allows the measurement of friction coefficient vs. polishing time. Road sites are monitored to compare laboratory results with actual skid resistance.

In parallel with experiments, mathematical models are built. A 5-parameter best fit model is first proposed, some parameters of which are related with aggregate characteristics, such as PSV, maximum size and microtexture. Then, a more physical model is described, which separates the three main mechanisms (ageing and wear of bitumen, polishing of aggregate particles). An equivalence coefficient is established between heavy lorry traffic and the number of wear cycles in laboratory. Such a model should allow in the future the rational choice of surface material, and the prediction of skid resistance of a new pavement wearing course. Finally, the surface profiles are examined at various polishing states, in order to link skid resistance with roughness parameters and aggregate properties (PSV, MDE, LA).

Keywords : ageing, bitumen removal, indentor, LA, macrotexture, MDE, microtexture, models, polishing, PSV, road, scale, skid resistance, wearing course, Wehner & Schulze.

# Table des matières

AVANT - PROPOS ..... 1

TABLE DES MATIERES ..... 4

ACRONYMES ..... 8

LISTE DES FIGURES ..... 13

LISTE DES TABLEAUX ..... 20

I INTRODUCTION GENERALE ..... 23

II REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET OBJECTIFS DE LA THESE ..... 26

II.1 Généralités sur l'adhérence des routes ..... 26

II.1.1 L'adhérence ..... 26

II.1.2 Les mécanismes à l'origine de l'adhérence ..... 27

II.1.3 Facteurs influençant l'adhérence ..... 30

II.1.4 Mesure de l'adhérence ..... 35

II.1.5 Mesure de la texture ..... 42

II.2 Évolution de l'adhérence des revêtements de chaussée ..... 49

II.2.1 Décapage du liant ..... 49

II.2.2 Polissage par le trafic ..... 49

II.2.3 Effet des variations saisonnières ..... 51

II.2.4 Effet du vieillissement ..... 52

II.2.5 Modèle de prédiction existant ..... 55

II.3 Essais de polissage ..... 57

II.3.1 Essais normalisés ..... 57

II.3.2 Présentation de la machine Wehner et Schulze (WS) ..... 59

II.3.3 Autres essais de polissage ..... 64

II.4 Essais normalisés sur les granulats ..... 66

II.4.1 Essai d'usure micro-Deval ..... 66

II.4.2 Essai Los Angeles ..... 66

II.5 Objectifs et démarche ..... 67

II.5.1 Objectifs de la thèse ....67
II.5.2 Démarche de travail ....68

III DEVELOPPEMENT D'UN ESSAI DE POLISSAGE ....70

III.1 Présentation de la procédure d'essai ....71
III.1.1 Procédure existante : l'essai TU Berlin [109] ....71
III.1.2 Nouvelle procédure : LCPC ....72
III.2 Descriptions des sites et échantillons expérimentaux ....78
III.2.1 Sites expérimentaux ....78
III.2.2 Échantillons confectionnés en laboratoire ....85
III.3 Validation de la procédure d'essai LCPC ....89
III.3.1 Comparaison des différentes évolutions de l'adhérence des échantillons d'enrobés ....89
III.3.2 Comparaison des frottements $\mu_{ws}/\mu_{SRT}$ ....90
III.3.3 Comparaison des frottements $\mu_{ws}/\mu_{RPA}$ ....91
III.3.4 Comparaison entre l'essai LCPC et l'évolution réelle du frottement ....91
III.4 Synthèse sur le développement d'un essai de polissage ....94

IV ÉTUDE DE L'EVOLUTION DE L'ADHERENCE EN FONCTION DE LA FORMULATION DES ENROBES BITUMINEUX ....95

IV.1 Rôle des granulats ....96
IV.2 Influence du PSV des granulats ....98
IV.3 Influence du calibre D des granulats ....104
IV.4 Influence croisée du PSV et de la granulométrie ....104
IV.5 Influence de la formulation des enrobés ....106
IV.6 Comparaisons des échantillons de laboratoire/de routes ....108
IV.7 Synthèse sur l'influence de la formulation ....109

V ÉTUDE DE LA MICROTEXTURE ....110

V.1 Procédure d'analyse ....110
V.1.1 Profil entier et profil seuillé ....110
V.1.2 Échelles de rugosité ....111
V.1.3 Paramètres de rugosité ....112
V.2 Analyses de profils ....115
V.2.1 Analyse visuelle ....115
V.2.2 Étude de l'effet du polissage sur les paramètres de rugosité comparé au frottement ....117
V.2.3 Étude de l'effet du polissage sur les paramètres de rugosité par rapport aux caractéristiques des granulats ....140

V.3 Synthèse sur l'analyse de la microtexture ..... 147

VI LOIS D'EVOLUTION ..... 149

VI.1 Modèles d'ajustement ..... 149

VI.1.1 Modèles existants ..... 149

VI.1.2 Proposition d'un nouveau modèle : le modèle LCPC ..... 150

VI.2 Vers une modélisation physique ..... 151

VI.2.1 Description du modèle ..... 151

VI.2.2 Identification des fonctions élémentaires ..... 153

VI.2.3 Validation du modèle ..... 158

VI.3 Relation entre la durée de polissage et le trafic ..... 160

VI.3.1 Démarche ..... 160

VI.3.2 Relation avec le paramètre « k » variable ..... 163

VI.3.3 Relation avec le paramètre « k » constant ..... 168

VI.4 Applications ..... 173

VI.5 Synthèse sur la loi d'évolution ..... 176

VII CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES ..... 178

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 182

VIII ANNEXES ..... 189

ANNEXE A – PHOTOS DES GRANULATS AU COURS DU POLISSAGE ..... 189

ANNEXE B – RECALAGE DU PROFIL ..... 191

ANNEXE C – COMPARAISON DES PARAMETRES DE RUGOSITE (CAS DES GRANULATS) 193

ANNEXE D – COMPARAISONS DES PARAMETRES DE RUGOSITE (CAS DES ENROBES) 201

ANNEXE E – DISTRIBUTION DES PARAMETRES D'INDENTEUR EN FONCTION DU NOMBRE DE ROTATIONS ..... 209

ANNEXE F – MODELE D'AJUSTEMENT A 5 PARAMETRES ..... 225

ANNEXE G – MODELE DE HUSCHEK ..... 234

ANNEXE H – MODELE SIMPLIFIE A 4 PARAMETRES ..... 242

ANNEXE I – ÉTUDE DES PARAMETRES DU MODELE PROPOSE SIMPLIFIE EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX .....252

ANNEXE J – VALIDATION DE LA RELATION CFL80/$\mu_{WS}$ .....266

ANNEXE K – COEFFICIENTS DE FROTTEMENT MESURES ET AJUSTES.....268

# Acronymes

ORGANISME

| | |
|---|---|
| AIPCR | Association Internationale Permanente des Congrès de la Route |
| AFNOR | Association Française de NORmalisation, France |
| ASTM | American Society for Testing of Materials, USA |
| CFTR | Comité Français pour les Techniques Routières, France |
| FHWA | Federal Highway Administration, USA |
| ISO | International Standardization Organization |
| LCPC | Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France |
| LRPC | Laboratoire Régional des Pontes et Chaussées, France |
| MDOT | Michgan Department Of Transportation, USA |
| MICHELIN | Société française de pneumatique, France |
| N.A.S.A. | National Aeronautic and Space Administration, USA |
| NCSU | North Carolina State University, USA |
| PIARC | Permanent International Association Road Congres |
| PMS | Pavement Management Service, USA |
| SETRA | Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, France |
| SIC | Laboratoire « Signal, Image et Communications », France |
| STAC | Service Technique de l'Aviation Civile, France |
| STBA | Service Technique des Basses Aériennes, France |
| TRB | Transportation Research Board, USA |
| TRL | Transportation Road Laboratory, Grande Bretagne |
| TRRL | Transport and Road Research Laboratory, Grande Bretagne |
| TU Berlin | Technology University of Berlin, Allemagne |
| UBM | Entreprise de capteur, USA |

## ABRÉVIATION

| | |
|---|---|
| AADT | Nombre moyen de véhicules poids lourds (>3,5 tonnes) par voie et par jour |
| A.I. | Ageing Index |
| AP | Nombre cumulé de véhicules |
| BBDr | Béton Bitumineux Drainant |
| BBTM | Béton Bitumineux Très Mince |
| BBSG | Béton Bitumineux Semi-Grenu |
| CD | Coefficient Drainoroute |
| CFL (BFC) | Coefficient de Frottement Longitudinal (Braking Friction Coefficient) |
| $CFT_0$ | Coefficient de frottement transversal initial, en fonction du type d'enrobé |
| CFT (SFC) | Coefficient de Frottement Transversal (Skidding Friction Coefficient) |
| CPA | Essai de polissage accéléré, France |
| CTMeter | Circular Texture Meter |
| CVD | Nombre de véhicules légers par voie et par jour |
| DFTester | Dynamic Friction Tester |
| FN | Friction Number |
| GN | Grip Number |
| GRAP | Essai de polissage par projection, France |
| Grip Tester | Appareil de la mesure de coefficient de frottement longitudinal |
| HSc | Hauteur au sable calculée, en mm |
| HSTM | High-Speed Texture Meter |
| HSv | Hauteur au Sable vraie, en mm |
| IMAG | Instrument de Mesure Automatique de Glissance |
| IO | Imagine Optique |
| JDAY | Julian Day, date sur le calendrier Julien, exprimé en jours |
| MEB | Microscope Electronique Balayage |
| MTM | Mini Texture Meter |
| NF | Norme Française |
| PAV | Pressure Ageing Vessel |
| PFT | Pavement Friction Tester |
| PMP | Profondeur Moyenne du Profil, en mm |
| PMT | Profondeur Moyenne de Texture, en mm |
| PMV | Polished Mortar Value |
| PSV | Polish Stone Value |
| PV | Polish Value |
| RCAT | Rotating Cylinder Ageing Test |
| RN | Route Nationale |
| RTFOT | Rolling Thin Film Oven Test |
| SCRIM | Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine |
| SMTD | Sensor Measured Texture Depth (mesurée avec le MTM), Grande Bretagne |
| SN | Skid Number, USA |
| SN40 | Coefficient de frottement, à 64kph (40mph) |
| SRT | Skid Resistance Tester |
| STIL | Relevé laser de la microtexture, entreprise française |

| | |
|---|---|
| TCPL | Trafic Cumulé de véhicules Poids Lourds |
| TFOT | Thin Film Oven Test |
| VST | Variable-speed Friction Tester |
| WS | Wehner et Schulze |

## SYMBOLES

| | |
|---|---|
| a | Hauteur des aspérités, en mm |
| b | Hauteur des aspérités, en mm |
| c | Hauteur des aspérités, en mm |
| D | Calibre, *i.e.* diamètre maximal des grains, en mm |
| | Densité d'indenteurs sur une longueur de profil donnée, $mm^{-1}$ |
| $D_{ondulation}$ | Densité d'indenteurs sur une longueur de profil donnée avec échelle d'ondulation, $mm^{-1}$ |
| $D_{rugosité}$ | Densité d'indenteurs sur une longueur de profil donnée avec échelle de rugosité, $mm^{-1}$ |
| d | Diamètre répandue sur la surface de chaussées, en $mm^2$ |
| F | Réaction longitudinale, *i.e.* la force de frottement longitudinal, en daN |
| $F_v$ | Force verticale, en daN |
| $F_h$ | Force horizontale |
| G | Taux de glissement |
| L | Longueur d'un profil, en mm |
| LA | Coefficient Los Angeles |
| l | Longueur du profil, en mm |
| M | Masse sèche de l'échantillon pour essai (500 ou 10000 g) |
| MDE | Coefficient Micro-Deval en présence d'Eau |
| m | Masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm |
| m' | Masse sèche de la fraction du matériau refusant après l'essai au tamis de 1,6 mm |
| N | Réaction transversale, *i.e.* la force de frottement transversal, en daN |
| | Nombre de rotations de la machine Wehner et Schulze |
| Nb | Nombre d'indenteurs sur une longueur de profil donnée |
| n | Nombre de points de mesure en BDR |
| $n_i$ | Nombre de tronçons trouvés sur le profil n°(i) |
| R | Réaction verticale, *i.e.* la charge appliquée par le véhicule sur le sol, en daN |
| $R_a$ | Moyenne arithmétique des aspérités, en mm |
| $R_q$ | Moyenne quadratique des aspérités, en mm |
| $R^2$ | Coefficient de détermination |
| r | Rayon de roulement des roues, en cm |
| T | Trafic cumulé de véhicules poids lourds équivalent |
| $SP_m$ | Taille moyenne des grains |
| $SP_{mx}$ | Taille moyenne des grains dans la direction X |
| $SP_{my}$ | Taille moyenne des grains dans la direction Y |
| $S_i$ | Distance du point de mesure en BDR à la courbe de simulation |
| $S_{ij}$ | Taille élémentaire du profil n°(i) au tronçon n°(j) |
| $S^2$ | Somme des carrés des résidus $S_i$ |
| t | Temps, en année |
| $t_0$ | Coefficient de corrélation |
| V | Volume de billes verre (ou sable), en $mm^3$ |
| v | Vitesse du véhicule, en km/h |
| $X_k$ | Abscisse du $k^{ème}$ sommet, en mm |
| $X_m$ | Abscisse du $m^{ème}$ extremum, en mm |

| | |
|---|---|
| $z(x)$ | Hauteur du profil au point d'abscisse x, en mm |
| $Z_k$ | Altitude du $k^{ème}$ sommet, en mm |
| $Z_m$ | Altitude du $m^{ème}$ extremum, en mm |
| $\alpha$ | Périodicité des variations étant annuelle |
| | Angle au sommet des indenteurs, en radian |
| $\alpha_1$ | Angle formé par le segment reliant deux extrema et la verticale dans la partie gauche d'un indenteur |
| $\alpha_2$ | Angle formé par le segment reliant deux extrema et la verticale dans la partie droite d'un indenteur |
| $k$ | Paramètre à déterminer par ajustement présentant la relation entre la durée de polissage et le trafic |
| $\mu$ | Coefficient de frottement |
| $\mu_i^m(t)$ | Coefficient de frottement mesuré au $i^{ème}$ point, mesuré sur la carotte prélevée en BDR après un nombre de trafic |
| $\mu_i^c(t)$ | Coefficient de frottement corrigé au $i^{ème}$ point, correspondant à la valeur mesurée sur la courbe de simulation |
| $\mu_{min}$ | Coefficient de frottement minimal |
| $\mu_{ws}$ | Coefficient de frottement Wehner et Schulze |
| $\omega$ | Vitesse angulaire des roues, en degrés/seconde |
| $\theta$ | Température |
| | Relief d'indenteur, *i.e.* angle formé par le segment reliant les sommets de deux indenteurs consécutifs et l'horizontale |
| $\eta_0$ | Viscosité du zéro cisaillement à 60°C |

# Liste des figures

Figure II.1 : Mécanismes d'indentation et d'adhésion ..... 28
Figure II.2 : Description de l'aire de contact pneumatique/chaussée ..... 29
Figure II.3 : Illustration de la microtexture et macrotexture ..... 30
Figure II.4 : Définition des descriptions de taille, forme et densité ..... 32
Figure II.5 : Illustration de la profondeur moyenne du profil ..... 32
Figure II.6 : Le pendule SRT ..... 36
Figure II.7 : Principe de calcul du coefficient de frottement longitudinal ..... 37
Figure II.8 : L'appareil ADHERA ..... 38
Figure II.9 : Les appareils des mesures de frottement longitudinal dans le monde ..... 39
Figure II.10 : Principe de calcul du coefficient de frottement transversal ..... 41
Figure II.11 : L'appareil SCRIM ..... 42
Figure II.12 : Mesure de la macrotexture PMT ..... 43
Figure II.13 : Méthode profilométrique : le RUGOLASER ..... 44
Figure II.14 : Fonctionnement du MEB ..... 47
Figure II.15 : Deux appareils de mesure du profil ..... 48
Figure II.16 : Schéma de l'évolution de l'adhérence pour un enrobé neuf ..... 55
Figure II.17 : Effet du paramètre « b » dans le modèle Huschek ..... 57
Figure II.18 : Essai de polissage accéléré et un exemple d'échantillon ..... 58
Figure II.19 : Essai de polissage par projection et un exemple d'échantillon ..... 58
Figure II.20 : Machine Wehner et Schulze du LCPC au Centre de Nantes ..... 60
Figure II.21 : Schéma du système de polissage ..... 61
Figure II.22 : Dimensions de galet conique de polissage et patin de mesure ..... 62
Figure II.23 : Exemple de courbe de freinage obtenue avec la machine de Wehner et Schulze ..... 63
Figure II.24 : Méthodologie de thèse ..... 68
Figure III.1 : Calibration de la mesure de frottement sur la machine WS (180 mesures pour les différentes carottes à différents stades de polissage avec quatre patins) ..... 71
Figure III.2 : Démarche de la procédure LCPC ..... 73
Figure III.3 : Capteur confocal en champ étendu pour la mesure de la microtexture ..... 74
Figure III.4 : Illustration des zones mesurées de la microtexture ..... 75
Figure III.5 : Capteur à front d'onde pour la mesure de la macrotexture ..... 76
Figure III.6 : Illustration d'une zone mesurée de la macrotexture ..... 77
Figure III.7 : Protocole des prélèvements in situ ..... 78
Figure III.8 : Carottage in situ (matériel du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers) ..... 79
Figure III.9 : Les différents sites expérimentaux ..... 81
Figure III.10 : Compactage en laboratoire, matériel du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Centre de Nantes ..... 87
Figure III.11 : Échantillons de diamètre de 22,5 cm pour la machine Wehner et Schulze ..... 88
Figure III.12 : Processus de la fabrication d'un échantillon de gravillons ..... 88
Figure III.13 : Évolutions de l'adhérence des échantillons d'enrobés ..... 90
Figure III.14 : Relation entre les frottements $\mu_{ws}$ et $\mu_{SRT}$ ..... 90
Figure III.15 : Relation entre les frottements $\mu_{ws}$ et $\mu_{RPA}$ ..... 91
Figure III.16 : Évolutions de frottement des chaussées par le trafic – comparaison avec les simulations ..... 93
Figure IV.1 : Répartition des revêtements [155] ..... 95
Figure IV.2 : Évolutions de l'adhérence des échantillons d'enrobés prélevés in situ et de gravillons ..... 96

Figure IV.3 : Évolutions de l'adhérence des échantillons d'enrobés fabriqués en laboratoire et de gravillons .... 98
Figure IV.4 : Évolutions de l'adhérence des six galettes de fraction 7,2/10 fabriquées en laboratoire : effet du PSV ..... 99
Figure IV.5 : Relation entre le coefficient de frottement Wehner et Schulze des échantillons de gravillons et le PSV à 90 000 et 180 000 rotations..... 100
Figure IV.6 : Évolutions de l'adhérence des cinq bétons bitumineux BBTM 0/10 (échantillons N°14, N°17 – 20) fabriqués en laboratoire : effet du PSV ..... 101
Figure IV.7 : Relation entre le coefficient de frottement $\mu_{WS}$ des échantillons d'enrobés et le PSV à 90 000 et 180 000 rotations ..... 101
Figure IV.8 : Différence d'adhérence entre les échantillons d'enrobés avec des granulats à fort PSV (Garenne) et des granulats à PSV moyen (Mouzinière) ..... 102
Figure IV.9 : Évolutions de l'adhérence d'un BBTM 0/6 (N°15) et 0/10 (N°14) fabriqués en laboratoire : effet de la dimension de D ..... 104
Figure IV.10 : Schéma des compositions sur le site de Saint-Fulgent (sections F4 à F8 notés respectivement N°4 à 8 dans le Tableau III.14)..... 105
Figure IV.11 : Évolutions de l'adhérence des échantillons N°4 – 8 (sections F4 à F8) du site de Saint-Fulgent 106
Figure IV.12 : Évolutions de l'adhérence en laboratoire du BBTM 0/10 (N°2) et BBSG 0/10 (N°1) prélevés in situ : effet de la formulation ..... 107
Figure IV.13 : Évolutions de l'adhérence des échantillons d'enrobés N° 9 – 13 (section B, D – G) du site de Fontenay..... 107
Figure IV.14 : Évolutions de l'adhérence du BBSG 0/10 prélevé in situ (N°1) et fabriqué en laboratoire (N°16) ..... 108
Figure IV.15 : Évolutions de l'adhérence du BBTM 0/10 et BBTM 0/6 prélevés in situ et fabriqués en laboratoire ..... 109
Figure V.1 : Profil entier et seuillé..... 111
Figure V.2 : Echelles de texture..... 112
Figure V.3 : Représentation d'un indenteur et de ces caractéristiques ..... 113
Figure V.4 : Évolution de la texture, cas du granulat A (PSV = 56) ..... 115
Figure V.5 : Évolution de la texture, cas du granulat B (PSV = 55) ..... 115
Figure V.6 : Évolution de la texture, cas du granulat C (PSV = 53) ..... 115
Figure V.7 : Évolution de la texture, cas du granulat D (PSV = 51) ..... 115
Figure V.8 : Évolution de la texture, cas du granulat E (PSV = 50) ..... 116
Figure V.9 : Évolution de la texture, cas du granulat F (PSV = 49)..... 116
Figure V.10 : Évolution de la texture, cas du granulat G (PSV = 41) ..... 116
Figure V.11 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un granulat A ..... 118
Figure V.12 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle de rugosité) ..... 118
Figure V.13 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle de rugosité) ..... 119
Figure V.14 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle de rugosité) ..... 119
Figure V.15 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un granulat A ..... 120
Figure V.16 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle d'ondulation)..... 121
Figure V.17 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle d'ondulation) ..... 121
Figure V.18 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle d'ondulation)..... 122
Figure V.19 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un granulat A ..... 123

Figure V.20 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle de rugosité) ..... 123
Figure V.21 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle de rugosité) ..... 124
Figure V.22 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle de rugosité) ..... 124
Figure V.23 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un granulat A ..... 125
Figure V.24 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle d'ondulation) ..... 126
Figure V.25 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle d'ondulation) ..... 126
Figure V.26 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle d'ondulation) ..... 127
Figure V.27 : Évolutions des paramètres d'indenteur et du frottement dans le cas d'un enrobé A ..... 128
Figure V.28 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un enrobé A ..... 128
Figure V.29 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle de rugosité) ..... 129
Figure V.30 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle de rugosité) ..... 129
Figure V.31 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle de rugosité) ..... 130
Figure V.32 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un enrobé A ..... 130
Figure V.33 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés, (Profil entier, Échelle d'ondulation) ..... 131
Figure V.34 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle d'ondulation) ..... 131
Figure V.35 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle d'ondulation) ..... 132
Figure V.36 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un enrobé A ..... 133
Figure V.37 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle de rugosité) ..... 133
Figure V.38 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle de rugosité) ..... 134
Figure V.39 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle de rugosité) ..... 134
Figure V.40 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement pour le cas d'un enrobé A ..... 135
Figure V.41 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle d'ondulation) ..... 135
Figure V.42 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle d'ondulation) ..... 136
Figure V.43 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle d'ondulation) ..... 136
Figure V.44 : Comparaisons des évolutions du paramètre θ et du frottement WS (Profil entier, Échelles de rugosité et d'ondulation, Granulat B et Enrobé B après décapage) ..... 137
Figure V.45 : Comparaisons des évolutions du paramètre θ et du frottement WS (Profil seuillé, Échelles de rugosité et d'ondulation, Granulat B et Enrobé B après décapage) ..... 138
Figure V.46 : Évolutions des paramètres de la microtexture (cas du granulat A) ..... 139
Figure V.47 : Évolutions des paramètres de la microtexture (cas du granulat G) ..... 140
Figure V.48 : Schématisation des courbes avec une pente à l'origine ..... 141

Figure V.49 : Évolutions du paramètre de hauteur $R_q$ en fonction de MDE et LA pour le cas de l'ensemble des granulats ..... 141
Figure V.50 : Évolution du paramètre de hauteur $R_q$ en fonction de (MDE + LA) pour le cas de l'ensemble des granulats ..... 142
Figure V.51 : Évolution du paramètre de hauteur $R_q$ en fonction de PSV pour le cas de l'ensemble des granulats ..... 143
Figure V.52 : Évolutions du paramètre de relief θ en fonction du PSV pour le cas de six granulats, excepté le granulat F ..... 144
Figure V.53 : Évolutions du paramètre de relief θ en fonction du MDE et LA pour le cas de six granulats, excepté le granulat F ..... 144
Figure V.54 : Évolution du paramètre de relief θ en fonction du (MDE + LA) pour le cas de six granulats, excepté le granulat F ..... 145
Figure V.55 : Évolutions du paramètre de forme Cot α en fonction du PSV pour le cas de six granulats, excepté le granulat F ..... 145
Figure V.56 : Évolutions du paramètre de forme Cot α en fonction du MDE et LA pour le cas de six granulats, excepté le granulat F ..... 146
Figure V.57 : Évolution du paramètre de forme Cot α en fonction du (MDE + LA) pour le cas de six granulats, excepté le granulat F ..... 146
Figure V.58 : Évolutions du paramètre Densité en fonction des caractéristiques des matériaux pour le cas de granulats ..... 147
Figure VI.1 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC » ..... 150
Figure VI.2 : Corrélation entre les valeurs mesurées et ajustées à partir du modèle complet ..... 151
Figure VI.3 : Processus de décapage ..... 152
Figure VI.4 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek modifié ..... 153
Figure VI.5 : Évolution du frottement en rive sur la route ..... 154
Figure VI.6 : Évolution du frottement sur la piste de glissance du LCPC Nantes ..... 155
Figure VI.7 : Comparaison entre les courbes d'évolution du frottement sur la piste de glissance du LCPC Nantes et en rive sur la route ..... 155
Figure VI.8 : Expression de la fonction du bitume $\mu_B$ tenant compte du vieillissement ..... 156
Figure VI.9 : Expression de la fonction « d » ..... 158
Figure VI.10 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle physique ..... 159
Figure VI.11 : Schéma de superposition ..... 161
Figure VI.12 : Validation de la relation CFL80/$\mu_{ws}$ ..... 163
Figure VI.13 : Comparaisons entre les évolutions réelles et simulées des sites d'Angers, Clisson et Coëx avec les paramètres « k » variables ..... 164
Figure VI.14 : Comparaisons entre les évolutions réelles et simulées du site de Saint-Fulgent avec les paramètres « k » variables ..... 165
Figure VI.15 : Comparaisons entre les évolutions réelles et simulées du site de Fontenay avec les paramètres « k » variables ..... 167
Figure VI.16 : Distribution du paramètre (k) ..... 168
Figure VI.17 : Comparaisons entre les évolutions réelles et simulées des sites d'Angers, Clisson et Coëx avec un paramètre constant k=0,024 ..... 169
Figure VI.18 : Comparaisons entre les évolutions réelles et simulées du site de Saint-Fulgent avec un paramètre constant k=0,024 ..... 170
Figure VI.19 : Comparaisons entre les évolutions réelles et simulées du site de Fontenay avec k=0,024 ..... 172
Figure VI.20 : Prédiction de l'évolution de l'adhérence à partir de l'essai en laboratoire ..... 174
Figure VI.21 : Prédiction de l'évolution de l'adhérence à partir du modèle physique ..... 175
Figure VIII.1 : Les photos prises à différentes étapes de polissage d'un enrobé D ..... 189
Figure VIII.2 : Les états naturels et polis d'un granulat ..... 190
Figure VIII.3 : Profils à différents stades de polissage avant recalage ..... 191

Figure VIII.4 : Démarche pour l'analyse du profil ..... 192
Figure VIII.5 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil entier, Échelle de rugosité, Granulat B - G)..... 193
Figure VIII.6 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil entier, Échelle d'ondulation, Granulat B - G)..... 195
Figure VIII.7 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil seuillé, Échelle de rugosité, Granulat B - G)..... 197
Figure VIII.8 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B - G)..... 199
Figure VIII.9 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil entier, Échelle de rugosité, Enrobé B - G)..... 201
Figure VIII.10 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil entier, Échelle d'ondulation, Enrobé B - G)..... 203
Figure VIII.11 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil seuillé, Échelle de rugosité, Enrobé B - G)..... 205
Figure VIII.12 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Enrobé B - G)..... 207
Figure VIII.13 : Distributions du paramètre Cot α dans le cas d'un granulat A et d'un Profil entier..... 209
Figure VIII.14 : Distributions du paramètre θ dans le cas d'un granulat A et d'un Profil entier ..... 210
Figure VIII.15 : Distributions du paramètre Cot α dans le cas d'un granulat A et d'un Profil seuillé ..... 210
Figure VIII.16 : Distributions du paramètre θ dans le cas d'un granulat A et d'un Profil seuillé ..... 211
Figure VIII.17 : Distributions du paramètre Cot α dans le cas d'un enrobé A d'un Profil entier..... 212
Figure VIII.18 : Distributions du paramètre θ dans le cas d'un enrobé A et d'un Profil entier ..... 212
Figure VIII.19 : Distributions du paramètre Cot α dans le cas d'un enrobé A et d'un Profil seuillé..... 213
Figure VIII.20 : Distributions du paramètre θ dans le cas d'un enrobé A et d'un Profil seuillé ..... 213
Figure VIII.21 : Comparaisons des distributions du paramètre Cot α (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B et Enrobé B après décapage)..... 214
Figure VIII.22 : Comparaisons des distributions du paramètre θ (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B et Enrobé B après décapage) ..... 215
Figure VIII.23 : Évolutions des distributions du paramètre Cot α à différents stades polissage (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B et Enrobé B après décapage) ..... 216
Figure VIII.24 : Évolutions des distributions du paramètre θ à différents stades polissage (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B et Enrobé B après décapage) ..... 216
Figure VIII.25 : Distribution du paramètre « cot α » (Profil entier, Échelle de rugosité, Granulat B - G) ..... 217
Figure VIII.26 : Distribution du paramètre « cot α » (Profil entier, Échelle d'ondulation, Granulat B - G)..... 218
Figure VIII.27 : Distribution du paramètre « θ » (Profil entier, Échelle de rugosité, Granulat B - G)..... 219
Figure VIII.28 : Distribution du paramètre « θ » (Profil entier, Échelle d'ondulation, Granulat B - G) ..... 220
Figure VIII.29 : Distribution du paramètre « cot α » (Profil seuillé, Échelle de rugosité, Granulat B - G)..... 221
Figure VIII.30 : Distribution du paramètre « cot α » (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B - G) ..... 222
Figure VIII.31 : Distribution du paramètre « θ » (Profil seuillé, Échelle de rugosité, Granulat B - G)..... 223
Figure VIII.32 : Distribution du paramètre « θ » (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B - G) ..... 224
Figure VIII.33 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »..... 225
Figure VIII.34 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »..... 225
Figure VIII.35 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC » (cas du BBTM0/10, site de Saint-Fulgent, PSV=51, 61)..... 226
Figure VIII.36 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC » (site de Fontenay, PSV=50)..... 227
Figure VIII.37 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »..... 228
Figure VIII.38 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »..... 228
Figure VIII.39 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »..... 229

Figure VIII.40 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC » ..... 229
Figure VIII.41 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC » ..... 230
Figure VIII.42 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC » ..... 230
Figure VIII.43 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC » ..... 231
Figure VIII.44 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek ..... 234
Figure VIII.45 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek ..... 234
Figure VIII.46 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek (cas du BBTM0/10, site de Saint-Fulgent, PSV=51, 61) ..... 235
Figure VIII.47 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek (site de Fontenay, PSV=50) ... 236
Figure VIII.48 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek ..... 237
Figure VIII.49 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek ..... 237
Figure VIII.50 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek ..... 238
Figure VIII.51 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek ..... 238
Figure VIII.52 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek ..... 239
Figure VIII.53 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek ..... 239
Figure VIII.54 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek ..... 240
Figure VIII.55 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » ..... 242
Figure VIII.56 : Corrélation entre les valeurs mesurées et ajustées à partir du modèle simplifié (285 points de mesure, $R^2$ = 0,99) ..... 243
Figure VIII.57 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » ..... 243
Figure VIII.58 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » ..... 244
Figure VIII.59 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » (cas du BBTM0/10, site de Saint-Fulgent, PSV = 51, 61) ..... 245
Figure VIII.60 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » (site de Fontenay, PSV = 50) ..... 246
Figure VIII.61 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » ..... 247
Figure VIII.62 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » ..... 247
Figure VIII.63 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » ..... 248
Figure VIII.64 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » ..... 248
Figure VIII.65 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » ..... 249
Figure VIII.66 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » ..... 249
Figure VIII.67 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » ..... 250
Figure VIII.68 : Représentation des paramètres de la formule ..... 252
Figure VIII.69 : Évolutions de l'adhérence de sept granulats (deux classes granulaires : 4/6,3, 7,2/10) ..... 253
Figure VIII.70 : Calcul de la macrorugosité moyenne ..... 254
Figure VIII.71 : Relation entre le coefficient de frottement initial et la taille des grains pour le cas des granulats ..... 254
Figure VIII.72 : Relation entre le coefficient de frottement maximal et la taille des grains pour le cas des enrobés ..... 255
Figure VIII.73 : Relation entre le coefficient de frottement maximal et la taille des grains ..... 255
Figure VIII.74 : Relation entre le coefficient de frottement maximal et PSV ..... 256
Figure VIII.75 : Relations entre le coefficient de frottement maximal et le paramètre de forme et relief ..... 256
Figure VIII.76 : Relations entre le coefficient de frottement maximal et les valeurs LA et MDE ..... 257
Figure VIII.77 : Relation entre la pente à l'origine et PSV dans le cas des granulats (sauf calcaire) ..... 258
Figure VIII.78 : Relation entre la pente à l'origine et PSV ..... 258
Figure VIII.79 : Relation entre la pente à l'origine et la taille des grains $SP_m$ ..... 259
Figure VIII.80 : Relations entre la pente à l'origine et la forme et le relief ..... 259
Figure VIII.81 : Relations entre la pente à l'origine et les valeurs de LA et de MDE ..... 259
Figure VIII.82 : Relation entre le paramètre (b) et PSV (sauf calcaire) ..... 260
Figure VIII.83 : Relation entre le paramètre (b) et PSV ..... 260

Figure VIII.84 : Relation entre le paramètre (b) et la taille des grains $SP_m$ ..... 261
Figure VIII.85 : Relations entre le paramètre (b) et la forme et le relief ..... 261
Figure VIII.86 : Relations entre le paramètre (b) et les valeurs de LA et de MDE ..... 262
Figure VIII.87 : Relation entre le paramètre (d) et PSV dans le cas des granulats ..... 262
Figure VIII.88 : Relation entre le paramètre (d) et PSV ..... 263
Figure VIII.89 : Relation entre le paramètre (d) et le relief θ à 180 000 rotations pour le cas des granulats ..... 263
Figure VIII.90 : Relation entre le paramètre (d) et la taille des grains $SP_m$ ..... 264
Figure VIII.91 : Relations entre le paramètre (d) et la forme (et le relief) à 180 000 rotations ..... 264
Figure VIII.92 : Relations entre le paramètre (d) et les valeurs de LA et de MDE ..... 264
Figure VIII.93 : Validation de la relation CFL80/$\mu_{ws}$, site de Saint-Fulgent ..... 266
Figure VIII.94 : Validation de la relation CFL80/$\mu_{ws}$, site de Fontenay ..... 267

# Liste des tableaux

Tableau II.1 : Comparaison pneumatiques/appareils conventionnels de frottement en France, [88] modifié..... 42
Tableau II.2 : Appareils de mesure de la macrotexture en France ..... 46
Tableau II.3 : Méthodes de mesure de la microtexture ..... 48
Tableau II.4 : Modèles de prédiction des variations saisonnières ..... 52
Tableau II.5 : Modèles de prédiction existants ..... 56
Tableau II.6 : Comparaison des conditions d'essai de polissage entre l'essai CPA et l'essai par projection (d'après [110])..... 59
Tableau III.1 : Niveaux de sollicitation (programme type pour la prédiction de l'adhérence) [109] ..... 71
Tableau III.2 : Caractéristiques des systèmes de mesure de texture [99] ..... 77
Tableau III.3 : Description des sites et matériaux utilisés ..... 79
Tableau III.4 : Composition de l'enrobé du site d'Angers ..... 80
Tableau III.5 : Composition de l'enrobé du site de Clisson..... 80
Tableau III.6 : Composition de l'enrobé du site de Coëx ..... 80
Tableau III.7 : Description du site supplémentaire de Saint-Fulgent et matériaux utilisés..... 81
Tableau III.8 : Composition de l'enrobé de site de Saint-Fulgent (BBTM 0/10 dont 0/2 Garenne) ..... 81
Tableau III.9 : Composition de l'enrobé de site de Saint-Fulgent (BBTM 0/10 dont 2/6 Garenne) ..... 82
Tableau III.10 : Composition de l'enrobé de site de Saint-Fulgent (BBTM 0/10 dont 6/10 Garenne)..... 82
Tableau III.11 : Composition de l'enrobé de site de Saint-Fulgent (BBTM 0/10 tout Mouzinière)..... 82
Tableau III.12 : Composition de l'enrobé de site de Saint-Fulgent (BBTM 0/10 tout Garenne) ..... 82
Tableau III.13 : Description du site supplémentaire de Fontenay et matériaux utilisés ..... 83
Tableau III.14 : Caractéristiques des enrobés utilisés ..... 84
Tableau III.15 : Caractéristiques des granulats utilisés en laboratoire ..... 85
Tableau III.16 : Composition de l'enrobé (échantillon d'enrobé N°14, granulat A)..... 86
Tableau III.17 : Composition de l'enrobé (échantillon d'enrobé N°18, granulat E) ..... 86
Tableau III.18 : Composition de l'enrobé (échantillon d'enrobé N°19, granulat F) ..... 86
Tableau III.19 : Composition de l'enrobé (échantillon d'enrobé N°19, granulat G)..... 86
Tableau IV.1 : Effet sur l'adhérence de l'apport d'un granulat à fort PSV dans les différentes fractions granulométriques d'un BBTM 0/10 (planche du site de Saint-Fulgent, mesures en laboratoire)..... 103
Tableau IV.2 : Effet sur l'adhérence de l'apport d'un granulat à fort PSV dans les différentes fractions granulométriques d'un BBTM 0/10 (planche du site de Saint-Fulgent), mesures in situ [110]..... 103
Tableau VI.1 : Paramètres $\mu_1$ et $\alpha$ de la fonction d'évolution du bitume..... 157
Tableau VI.2 : Comparaison de l'écart-type..... 171
Tableau VI.3 : Paramètres dans le modèle physique..... 176
Tableau VIII.1 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle de rugosité) ..... 194
Tableau VIII.2 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle d'ondulation) ..... 196
Tableau VIII.3 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle de rugosité)..... 198
Tableau VIII.4 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle d'ondulation) ..... 200
Tableau VIII.5 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle de rugosité) ..... 202

Tableau VIII.6 : Valeurs de paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle d'ondulation) ..... 204
Tableau VIII.7 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle de rugosité) ..... 206
Tableau VIII.8 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle d'ondulation) ..... 208
Tableau VIII.9 : Coefficients de la formule du modèle complet, sites d'Angers, Clisson et Coëx ..... 232
Tableau VIII.10 : Coefficients de la formule du modèle complet, enrobés fabriqués en laboratoire de A à G... 232
Tableau VIII.11 : Coefficients de la formule du modèle complet, site de Saint-Fulgent..... 232
Tableau VIII.12 : Coefficients de la formule du modèle complet, site de Fontenay ..... 233
Tableau VIII.13 : Coefficients de la formule du modèle complet, granulats de A à G ..... 233
Tableau VIII.14 : Coefficients de la formule du modèle Huschek, sites d'Angers, Clisson et Coëx ..... 241
Tableau VIII.15 : Coefficients de la formule du modèle Huschek, enrobés fabriqués en laboratoire de A à G.. 241
Tableau VIII.16 : Coefficients de la formule du modèle Huschek, site de Saint-Fulgent ..... 241
Tableau VIII.17 : Coefficients de la formule du modèle Huschek, site de Fontenay ..... 241
Tableau VIII.18 : Coefficients de la formule du modèle Huschek, granulats de A à G ..... 241
Tableau VIII.19 : Coefficients de la formule du modèle simplifié, sites d'Angers, Clisson et Coëx ..... 251
Tableau VIII.20 : Coefficients de la formule du modèle simplifié, enrobés fabriqués en laboratoire de A à G . 251
Tableau VIII.21 : Coefficients de la formule du modèle simplifié, site de Saint-Fulgent ..... 251
Tableau VIII.22 : Coefficients de la formule du modèle simplifié, site de Fontenay ..... 251
Tableau VIII.23 : Coefficients de la formule du modèle simplifié, granulats de A à G ..... 251
Tableau VIII.24 : Caractéristiques des granulats utilisés en laboratoire..... 252
Tableau VIII.25 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site d'Angers, N=0,019×TCPL..... 268
Tableau VIII.26 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Clisson, N=0,018×TCPL..... 268
Tableau VIII.27 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Coëx, N=0,493×TCPL ..... 268
Tableau VIII.28 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F4, N=0,105×TCPL ..... 269
Tableau VIII.29 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F5, N=0,145×TCPL ..... 269
Tableau VIII.30 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F6, N=0,199×TCPL ..... 269
Tableau VIII.31 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F7, N=0,122×TCPL ..... 270
Tableau VIII.32 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F8, N=0,175×TCPL ..... 270
Tableau VIII.33 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section B, BBDr0/10, N=0,001×TCPL ..... 270
Tableau VIII.34 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section D, BBTM0/10 type2, N=0,001×TCPL ..... 271
Tableau VIII.35 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section E, BBTM0/10 type1, N=0,017×TCPL ..... 271
Tableau VIII.36 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section F, BBTM0/10 continu, N=0,013×TCPL ..... 271
Tableau VIII.37 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section G, BBSG0/10, N=0,047×TCPL ..... 272
Tableau VIII.38 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site d'Angers, N=0,024×TCPL..... 273
Tableau VIII.39 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Clisson, N=0,024×TCPL..... 273
Tableau VIII.40 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Coëx, N=0,024×TCPL ..... 273
Tableau VIII.41 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F4, N=0,024×TCPL ..... 273

Tableau VIII.42 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F5, N=0,024×TCPL ..... 274
Tableau VIII.43 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F6, N=0,024×TCPL ..... 274
Tableau VIII.44 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F7, N=0,024×TCPL ..... 274
Tableau VIII.45 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F8, N=0,024×TCPL ..... 275
Tableau VIII.46 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section B, BBDr0/10, N=0,024×TCPL ..... 275
Tableau VIII.47 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section D, BBTM0/10 type2, N=0,024×TCPL ..... 275
Tableau VIII.48 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section E, BBTM0/10 type1, N=0,024×TCPL ..... 276
Tableau VIII.49 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section F, BBTM0/10 continu, N=0,024×TCPL ..... 276
Tableau VIII.50 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section G, BBSG0/10, N=0,024×TCPL ..... 276

# I Introduction générale

Une des conséquences de la hausse du trafic routier est le polissage de plus en plus précoce des revêtements de chaussée. Ce polissage conduit à une diminution du potentiel d'adhérence des pneumatiques avec la chaussée. Les variations climatiques et le vieillissement naturel des chaussées participent aussi, en grande partie, à l'évolution de ce potentiel d'adhérence. Cette baisse du potentiel d'adhérence a des conséquences sur la sécurité des usagers de la route en temps de pluie ou en présence de polluant sur la chaussée. Les chaussées polies s'avèrent dangereuses, car elles peuvent conduire à une absence de pouvoir de contrôle du véhicule en situation d'urgence.

Pour l'ingénieur routier et le gestionnaire de l'infrastructure, il serait souhaitable de disposer d'outils permettant de prévoir ces variations avant même la construction d'une route. Il s'avère donc nécessaire d'avoir la possibilité de prévoir l'évolution de l'adhérence pendant toute la durée de service de la chaussée. L'optimisation du choix des matériaux et de la formulation du revêtement, vis-à-vis de la maîtrise de l'évolution de l'adhérence, permettrait d'anticiper l'entretien des couches de surfaces des chaussées.

Actuellement, l'adhérence à long terme d'une chaussée est évaluée à travers la résistance au polissage des gravillons, qui peut être mesurée par des essais normalisés. Cette approche est basée sur des résultats empiriques selon lesquels l'utilisation des granulats à « résistance au polissage » élevée induit une bonne adhérence, même après des années de trafic. Ces résultats incitent donc à l'emploi des granulats à résistance au polissage élevée. Cependant, cette solution n'est pas toujours économique, car toutes les carrières ne peuvent pas fournir des granulats de cette qualité. En l'absence d'une méthode de laboratoire appropriée pour des mélanges bitumineux, des expérimentations en vraie grandeur sont conduites pour évaluer des solutions alternatives, notamment pour voir comment l'utilisation des granulats de qualité moyenne, voire faible, peut être compensée par un choix approprié de formulation. Dans ce contexte, il s'avère nécessaire de mettre en place un essai pouvant simuler de manière assez réaliste l'évolution réelle de l'adhérence des revêtements de chaussées soumis au trafic. L'essai en question doit pouvoir simuler le décapage et le polissage d'une manière réaliste. Cet essai en laboratoire doit être validé par la mise en place de planches expérimentales soumises à un trafic réel. Ces planches expérimentales doivent être suivies régulièrement pour une durée de six à huit ans.

Le trafic de poids lourds est identifié comme étant le principal facteur mécanique à l'origine du polissage des revêtements. L'objectif de ce travail est de lier ce trafic de poids lourds prévu sur un nouveau revêtement de chaussée et l'évolution future du potentiel d'adhérence. Donc, dans ce rapport, les deux besoins principaux seront :

- une méthode d'essai rapide, pour évaluer la résistance au polissage des mélanges bitumineux et des granulats ;
- un modèle de prédiction de l'évolution de l'adhérence avec le temps, prenant en compte les caractéristiques importantes des matériaux utilisés.

La première partie va être consacrée à une revue bibliographique résumant quelques travaux effectués dans le domaine de l'adhérence des revêtements de chaussée et rappelant quelques notions physiques liées à cette dernière. Nous préciserons les notions de contact mécanique et les définitions des frottements (longitudinal et transversal). Les différents mécanismes au niveau du contact pneu/chaussée pour les différentes conditions seront introduits. Puis, nous expliciterons les facteurs influençant l'évolution de l'adhérence. Les différentes techniques d'essai pour la mesure de l'adhérence et de la texture des chaussées seront présentées. Enfin, nous terminerons par l'exposé des essais normalisés en laboratoire visant à simuler le polissage *in situ*.

La seconde partie nous permettra d'exposer notre travail dans le domaine de l'évolution de l'adhérence des chaussées par le polissage, via l'utilisation d'un nouvel outil qu'est la machine Wehner et Schulze. Cette machine est utilisée pour la première fois en France pour ce type d'application. Elle permet de réaliser le polissage et la mesure de frottement avec le même dispositif. Pour obtenir la courbe d'évolution en laboratoire, une méthode d'essai sera développée, consistant à travailler directement sur les enrobés, ce qui doit être plus représentatif de l'évolution de l'adhérence *in situ*.

Une fois la méthode d'essai mise en place, les essais sur des différents revêtements et les différents granulats seront effectués dans la troisième partie. Nous tenterons de voir l'influence d'un certain nombre de paramètres, tels que le type d'enrobés, sa composition (dimension supérieure et nature des granulats, courbe granulométrique, teneur en liant, compactage etc.), dans l'évolution du potentiel d'adhérence des chaussées. Nous comparerons les évolutions de l'adhérence sur les échantillons d'enrobé prélevés *in situ* et fabriqués en laboratoire. Ceci permettra d'analyser l'influence de la méthode de mise en œuvre. Ainsi, le rôle des granulats dans la courbe d'évolution de l'adhérence sera montré à partir d'essais sur les échantillons de gravillons et d'enrobés.

Nous étudierons ensuite l'effet de la microtexture sur l'adhérence, signalé dans les revues bibliographiques. Dans un premier temps, nous essayerons d'établir les relations entre l'évolution de la microtexture et celle de l'adhérence. Pour cela, les échelles d'analyse et les paramètres de la texture seront introduits. Dans un deuxième temps, nous analyserons l'évolution de ces paramètres avec l'adhérence et les liaisons entre ces paramètres et les caractéristiques des granulats.

Dans la dernière partie, nous tenterons de proposer une loi d'évolution empirique issue de l'observation des résultats de campagne d'essais. On cherchera à relier les coefficients de cette loi d'évolution aux paramètres de formulation des enrobés (PSV, granulométrie, pourcentage de liant…). Ainsi, connaissant les paramètres de formulation d'une chaussée

donnée, il devrait être possible, grâce à ces résultats, de prédire l'évolution de son potentiel d'adhérence. Pour prédire l'évolution de l'adhérence *in situ*, nous chercherons la relation entre la durée de polissage de la machine WS et le trafic. Ceci permettra, à terme, de simuler l'évolution de l'adhérence en laboratoire et de prédire son évolution à l'aide de ce modèle.

# II Revue bibliographique et objectifs de la thèse

## II.1 Généralités sur l'adhérence des routes

### II.1.1 L'adhérence

L'adhérence des chaussées contribue de façon importante à la sécurité des usagers de la route [1, 2]. Elle est définie comme la capacité à mobiliser des forces de frottement entre un pneumatique d'un véhicule et la surface du revêtement, sous l'effet de sollicitations variées engendrées par la conduite. Elle permet au véhicule, [3] :

- de conserver à tout moment la trajectoire désirée ;
- de réduire les distance de freinage et d'arrêt ;
- de favoriser les manœuvres d'évitement ;
- etc.

Deux composantes de l'adhérence sont à distinguer : l'adhérence transversale mesurée par le coefficient de frottement transversal (cas du dérapage et du virage), et l'adhérence longitudinale, mesurée par le coefficient de frottement longitudinal (cas du freinage).

#### II.1.1.1 Adhérence longitudinale

La composante longitudinale de l'adhérence conditionne la transmission par le pneu des couples moteurs et de freinage. En effet, l'adhérence résulte du frottement des pains de gomme du pneumatique sur le sol. On en déduit que le contact gomme/sol fournit une force de résistance, d'intensité égale et de sens opposé à la sollicitation correspondant au sens de roulement, que l'on désignera par la force de frottement F. L'adhérence longitudinale dépend de la charge verticale appliquée par le véhicule sur le sol, ainsi que de l'état de la route et de la gomme du pneu.

Quand un véhicule roule en ligne droite à une certaine vitesse, il faut avoir une très bonne adhérence longitudinale pour freiner. A ce moment-là, la vitesse angulaire des roues diminue et la vitesse de roulement du pneu devient inférieure à la vitesse de défilement du sol : pour compenser cette différence, les pneus commencent à glisser selon un certain taux de glissement. Il est défini par le rapport entre la vitesse de glissement pneu/sol et la vitesse du véhicule :

$$G = \frac{\omega r - v}{v} \qquad \text{(II.1)}$$

où $G$ est le taux de glissement ; $\omega$ est la vitesse angulaire des roues ; $r$ est le rayon de roulement des roues ; $v$ est la vitesse du véhicule.

A partir de cette expression, nous pouvons avoir les situations suivantes :

- $G < 0$ : glissement-freinage ;
- $G > 0$ : glissement-moteur (accélération) ;
- $G = 0$ : roue libre ;
- $G = -1$ (ou 100 %) : roue bloquée ;
- $G = +\infty$ : patinage sur place.

#### II.1.1.2 Adhérence transversale

Quand un véhicule est lancé dans un virage ou est en dérapage, c'est la composante transversale de l'adhérence qui va s'opposer à la force centrifuge. Elle permet d'assurer et de maintenir le véhicule sur sa trajectoire. Cette force de frottement naît de la dérive entre la trajectoire et le plan de rotation des roues. En général, le frottement transversal augmente avec la dérive jusqu'à une valeur maximale, que l'on atteint à environ entre 4° et 7° de dérive pour une voiture, et entre 6° et 10° pour un poids lourd en fonction de l'architecture du pneumatique, de la nature de la gomme et du sol et de la pression de gonflage [4].

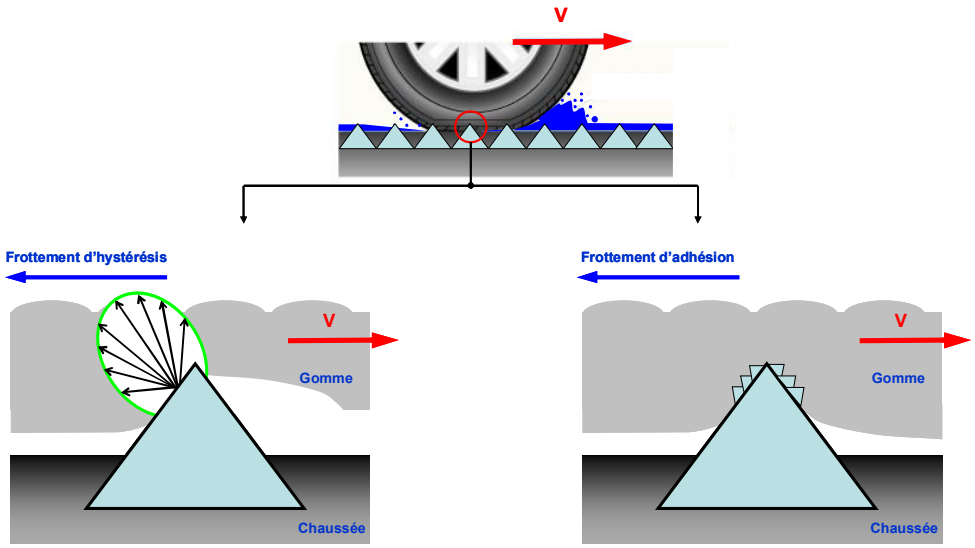
### II.1.2 Les mécanismes à l'origine de l'adhérence

#### II.1.2.1 Sur sol sec

Sur sol sec, l'élastomère vient envelopper les aspérités du revêtement de la chaussée donnant naissance à une force de frottement. Cette force de frottement est composée de deux termes, un terme de déformation, communément appelé composante d'**hystérésis**, due à l'indentation de la gomme sur les aspérités du sol, et un terme d'**adhésion,** due à des liaisons moléculaires entre la gomme et le sol.

##### II.1.2.1.1 Mécanisme d'indentation

La gomme du pneu, de nature viscoélastique, vient buter contre l'aspérité, se déforme, mais, par un effet d'hystérésis, ne redescend pas immédiatement à sa hauteur initiale de l'autre côté de l'aspérité. Cette dissymétrie est à l'origine de la composante hystérésis (cf. Figure II.1a).




**(a) Mécanisme d'indentation** **(b) Mécanisme d'adhésion**

*Figure II.1 : Mécanismes d'indentation et d'adhésion*

II.1.2.1.2 Mécanisme d'adhésion

Le mécanisme d'adhésion nécessite un contact direct entre la gomme et le sol (cf. Figure II.1b). C'est un phénomène qu'on peut constater en faisant glisser un morceau d'élastomère sur une surface parfaitement lisse. Cette situation met en jeu des forces de liaisons moléculaires qui créent des étirements puis des relaxations des longues chaînes moléculaires. Ces sollicitations dissipent l'énergie mise en jeu. Ainsi, on peut décrire un cycle de sollicitation par le cycle suivant :

- création de la liaison ;
- étirement de la chaîne moléculaire : son caractère visco-élastique résiste à la déformation, générant une force de frottement qui s'oppose au glissement ;
- rupture de la liaison, pour se reformer plus loin.

### II.1.2.2 Sur sol mouillé

L'adhésion ne sera plus opérationnelle dès qu'une pellicule d'eau éloignera le pneu de la chaussée. Cette situation se rencontre dès qu'une fine couche résiduelle d'un matériau est présente sur la surface de roulage. Dans cette situation, l'adhérence subit une chute par rapport à celle que l'on aurait eue sur une surface sèche.

Pour des épaisseurs d'eau faible (inférieures à 100 µm), trois zones de contact entre le pneumatique et la chaussée sont constatées [5, 6]. Ces trois zones de l'aire de contact s'appellent : zone de pénétration, zone de transition, zone de contact ([7], cf. Figure II.2) :

- zone 1 de pénétration : l'eau est évacuée progressivement par les sculptures du pneu et par les aspérités du revêtement. Le frottement y est presque nul ;
- zone 2 de transition : une partie de l'eau a été évacuée et le pneumatique commence à prendre contact avec des aspérités du revêtement. La gomme du pneumatique commence un léger enveloppement des aspérités de la surface, de l'ordre de 200 à 400 µm ;
- zone 3 de contact : le pneumatique est en contact sec avec le revêtement. L'adhérence est presque entièrement réalisée dans cette zone de contact.

*Figure II.2 : Description de l'aire de contact pneumatique/chaussée*

#### II.1.2.2.1 Mécanisme de viscoplanage

Le viscoplanage est une perte d'adhérence du pneumatique, due à un film d'eau de faible épaisseur entre la gomme et les granulats. Ce phénomène d'adhérence se produit souvent dans la zone de transition. La hauteur d'eau est comprise entre quelques microns et 0,5 mm [4]. Ce film d'eau mince s'interpose entre le pneu et la chaussée, et les liaisons moléculaires sont totalement interrompues. Le viscoplanage est provoqué par l'infiltration d'eau à l'avant de l'aire de contact lorsque la vitesse du véhicule dépasse une valeur critique [6].

#### II.1.2.2.2 Mécanisme d'hydroplanage

L'hydroplanage est une perte d'adhérence due à une couche d'eau entre le pneu et la chaussée (hauteur d'eau supérieure à 0,5 mm [4]) du fait de la vitesse du véhicule. Quand la zone de pénétration recouvre toute la surface de contact, il n'y a plus de contact direct du pneumatique avec la chaussée. Sous l'effet de la vitesse de déplacement du pneu, la pression dans l'eau augmente et soulève progressivement le pneu. Le coin d'eau progresse sous le pneu et finit par le décoller totalement de la chaussée.

### II.1.3 Facteurs influençant l'adhérence

Le niveau de l'adhérence dépend de nombreux facteurs dont les plus importants sont non seulement la présence d'eau à la surface de chaussée, mais aussi la texture du revêtement, les caractéristiques du pneumatique… [8 - 24].

#### II.1.3.1 Texture des revêtements de chaussée

Comme nous l'avons déjà évoqué, la composante hystérésis de l'adhérence est liée à la texture de la surface des chaussées. Les textures des revêtements sont la superposition d'irrégularités de différentes échelles, en fonction de leurs dimensions horizontales et verticales : la macrotexture et la microtexture. En 1976, Lees [16] montre la nécessité d'avoir une bonne microtexture à basse vitesse pour bien adhérer. Cependant, il insiste sur l'importance des fonctions de drainage apportées par la macrotexture pour les vitesses moyennes et élevées. Plus récemment, Boulet [17], à partir d'un plan d'expérience, a montré que la microtexture influait positivement sur l'adhérence à toutes les vitesses.

##### II.1.3.1.1 La macrotexture

C'est l'ensemble des aspérités dont la dimension horizontale est comprise entre 0,5 mm et 50 mm et dont la dimension verticale est comprise entre 0,2 mm et 10 mm [5] (cf. Figure II.3). La macrotexture est l'un des paramètres qui influence l'apparition de l'hydroplanage. Elle participe au drainage et au stockage de l'eau ainsi qu'à l'indentation. La macrotexture est une caractéristique liée à la dimension maximale des granulats et à la composition granulométrique ainsi qu'à la mise en œuvre. La macrotexture joue un rôle sur la capacité d'évacuation de l'eau à l'interface pneumatique/chaussée et sur le développement des forces de frottement en vitesse élevée [18].

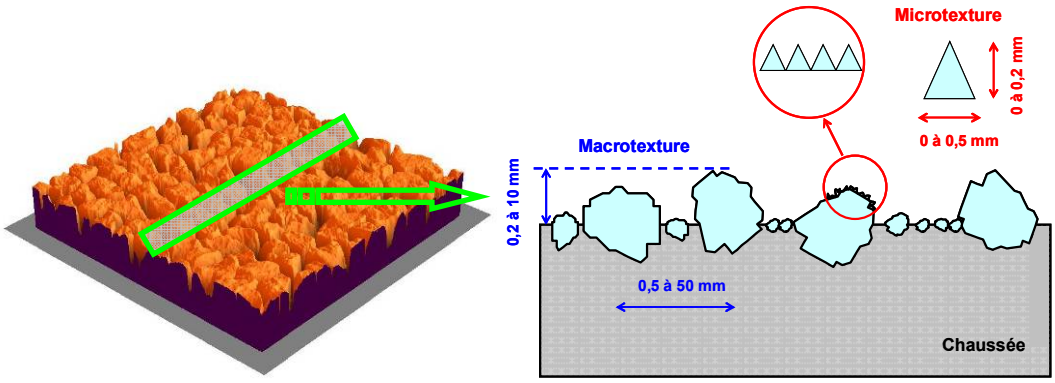



*Figure II.3 : Illustration de la microtexture et macrotexture*

#### II.1.3.1.2 La microtexture

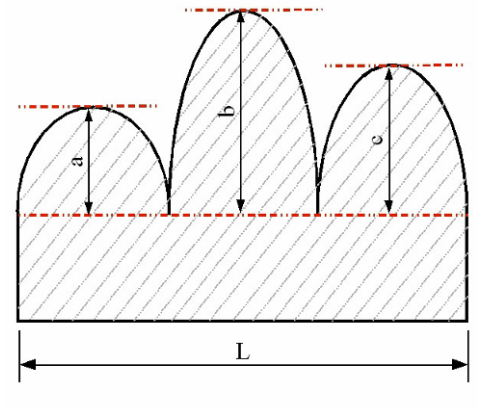
C'est l'ensemble des aspérités pouvant être en contact avec les pneus, dont la dimension horizontale est comprise entre 0 mm et 0,5 mm et dont la dimension verticale est comprise entre 0 mm et 0,2 mm (cf. Figure II.3). Elle est liée aux aspérités de surface des granulats et aux sables entrant dans la composition du revêtement. Elle permet au pneumatique de rompre le film d'eau résiduel, qui est compris entre 1,5 et 5 µm, jusqu'à l'obtention d'un contact sec. Elle est l'un des paramètres qui influence l'apparition du viscoplanage. La microtexture ne devient cependant totalement efficace que lorsque le film de liant superficiel a été décapé par le trafic.

Sabey [25] montre que la forme des aspérités influe sur le frottement longitudinal. Il montre que ceux en forme de cônes génèrent plus de frottement que les sphères et que le frottement augmente lorsque l'angle au sommet des cônes diminue. Selon Forster [26, 27], la forme est un paramètre des aspérités qui est le mieux corrélé avec le coefficient de frottement mesuré avant et après polissage des gravillons.

L'angularité désigne la présence d'arêtes plus propices à l'adhérence. Des aspérités aiguës (vives) permettent d'atteindre des pressions de contact élevées et d'assurer, au moment du freinage, un contact sec avec rupture du film d'eau. Les gravillons arrondis donnent toujours des revêtements plus glissants que les granulats entièrement concassés [28]. Selon les courbes d'évolution du coefficient de frottement en fonction de la durée de l'essai (courbes de polissage), en l'absence de tout polissage, le coefficient de frottement décroît quand l'angularité diminue. On pourrait même admettre que la valeur du coefficient de frottement avant essai dépend essentiellement de l'angularité du granulat [29].

Les travaux effectués par Britton *et al.* [30] ont été conduits an laboratoire au moyen du pendule SRT sur des granulats artificiels de macrotexture définie, dont ils ont fait varier la microtexture par ajout de particules fines. Des paramètres de taille, de distribution et de forme des particules, à la fois à l'échelle de la macro et de la microtexture permettent la modélisation des surfaces vis-à-vis du frottement. Les auteurs montrent l'existence d'une taille optimale de microtexture, elle-même fonction de la taille de la macrotexture porteuse.

Do [31, 32] introduit la notion d'indenteurs, que nous rappellerons dans la suite, pour caractériser la microtexture des revêtements de chaussée. Il définit ainsi trois paramètres : la forme des indenteurs, le relief créé par la disposition relative des indenteurs et la densité d'indenteurs. Forster [26], de son côté, a utilisé la hauteur des sommets locaux sur un profil par rapport au creux seuillé au voisinage immédiat à droite. Il définit la largeur L séparant deux vallées (les plus bas points locaux) consécutives et propose de calculer le rapport entre la hauteur et la largeur pour représenter la forme des indenteurs (cf. Figure II.4).




$$\text{Hauteur} = \frac{a+b+c}{3}$$

$$\text{Forme} = \frac{\left(\frac{a+b+c}{3}\right)}{\left(\frac{L}{3}\right)}$$

$$\text{Densité} = \frac{3}{L}$$

*Figure II.4 : Définition des descriptions de taille, forme et densité*

Dans les travaux de Kevin *et al.* ([33], cf. Figure II.5), un profil mesuré est séparé en série de segments (la longueur d'un segment : 100 mm). La profondeur moyenne du profil [34] est calculée par la hauteur moyenne sur tous les segments du profil. La hauteur moyenne pour un segment est définie par la distance entre la hauteur moyenne de deux pics pour chaque demi-segment et la hauteur moyenne de tous les points dans le segment.

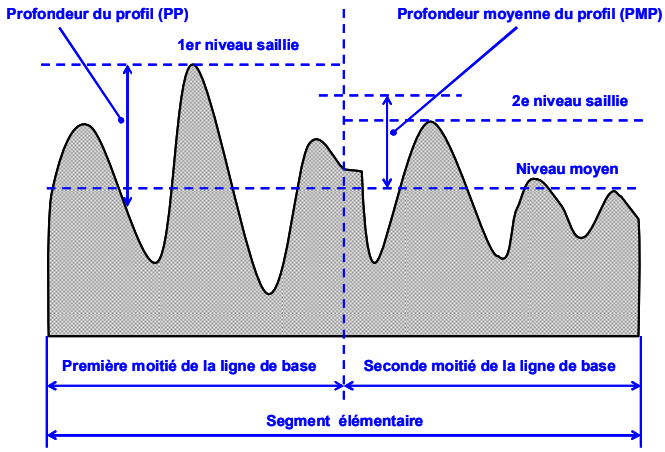



*Figure II.5 : Illustration de la profondeur moyenne du profil*

$$\text{Profondeur moyenne du profil (PMP)} = \frac{\text{Niveau saillie (1er)} + \text{Niveau saillie (2e)}}{2} - \text{Niveau moyen}$$

D'autres auteurs, tels que Yandell *et al.* [35, 36], caractérisent la forme par la pente moyenne entre deux points successifs du profil. Un profil se décompose en un certain nombre de motifs. Un motif est une portion de profil comprise entre deux sommets consécutifs. La définition du motif et leurs caractéristiques sont normalisés dans la norme européenne EN NF ISO 12085 [37].

#### II.1.3.2 Influence de la formulation

La formulation des couches de roulement en enrobés a été longtemps le résultat d'un compromis entre la texture, les caractéristiques mécaniques et les capacités de la couche à protéger les couches de chaussées inférieures. Sous l'effet de facteurs économiques et techniques, les formulations ont évolué vers des matériaux en couches de plus en plus minces [38]. La formulation du matériau de surface, le plus souvent un enrobé bitumineux, vise à assurer une adhérence suffisante :

- un choix *a priori* d'une famille d'enrobés ;
- une optimisation de la composition (dimension D, nature du granulat, courbe granulométrique, type de liant, teneur en liant) ;
- des précautions à la mise en œuvre (choix des ateliers de répandage et de compactage, respect de l'épaisseur).

Les différentes caractéristiques des granulats, avant la construction de la couche de roulement influencent l'adhérence initiale [13]. La pétrographie confère aux granulats l'existence d'une microtexture et leur aptitude à la conserver sous le trafic. Les caractéristiques minérales de la roche comme le contraste entre minéraux durs et mous, la finesse des cristaux, la force de liaison entre cristaux, etc. sont aussi importants pour l'adhérence [39]. Une proportion élevée de minéraux durs génère une meilleure adhérence et une résistance élevée à l'usure [40, 41]. D'après Nitta *et al.* [42], l'adhérence de la chaussée dépend de la dureté et des distributions des minéraux. Le pourcentage des résidus insolubles en milieu acide (Acid Insoluble Residue) dans les gros gravillons joue un rôle très important, ainsi que dans les petits gravillons [43, 44]. Dahir et Mullen [45] ont montré que plus ce pourcentage est élevé, plus l'adhérence est meilleure. Shupe *et al.* [46] a établi une très bonne corrélation entre le pourcentage de carbonates de calcium de calcaire et la résistance au polissage. Plus le pourcentage de carbonates de calcium est élevé, plus la résistance au polissage est importante, l'adhérence est donc meilleure.

La forme de la courbe granulométrique, optimisée afin de réduire le pourcentage de vides, affecte aussi la macrotexture [16, 47, 48]. La taille des granulats a une forte influence sur l'adhérence [49]. Plus le calibre D de l'enrobé est petit, plus l'adhérence longitudinale à basse vitesse est élevée [50, 51, 52]. Pour les formules dont la nature minéralogique du granulat est unique, la courbe granulométrique et l'angularité sont des facteurs secondaires de l'adhérence. Pour les formules mixtes, les sables calcaires sont associés à des gravillons éruptifs pour présenter une meilleure adhérence [53]. Le coefficient de frottement longitudinal à basse vitesse des enrobés classiques dépend surtout de la microrugosité du mortier [50].

Le coefficient de frottement longitudinal à haute vitesse se hiérarchise en fonction du pourcentage de gros gravillons, donc en fonction de la macrotexture des revêtements [54]. Si le pourcentage de gros gravillons est plus important, l'adhérence est plus élevée. L'adhérence à basse vitesse des bétons bitumineux drainants augmente avec le coefficient de polissage accéléré des gravillons, et ce de façon plus sensible que celle des bétons bitumineux semi-

grenus. La résistance au polissage du sable contribue aussi à l'adhérence du revêtement [55]. Une augmentation de la résistance au polissage du sable implique une augmentation de l'adhérence du revêtement. Cependant, le pourcentage de filler dans la formule joue négativement sur l'adhérence [56].

L'espace entre les grains joue un rôle sur l'adhérence [57]. L'adhérence diminue lorsque l'espace entre les grains augmente. Le liant est un autre facteur important sur l'adhérence des enrobés. Plus le pourcentage du bitume est élevé, plus l'adhérence est faible [58].

#### II.1.3.3 Influence du pneumatique

Un pneu à carcasse radiale (deux éléments : une carcasse souple disposée en arceaux droits de façon radiale et une ceinture métallique pour stabiliser la bande de roulement) offre une meilleure adhérence (longitudinale et transversale) par rapport à un pneu à carcasse diagonale [7, 59]. L'adhérence dépend aussi des sculptures du pneu [60]. Sur une chaussée sèche, l'adhérence, qui dépend de l'aire de contact pneu/chaussée, est maximale lorsque le revêtement est très fin et le pneu lisse. Sur la chaussée mouillée, l'adhérence du pneu sculpté est plus élevée que celle du pneu lisse. Il y a évolution de l'adhérence en fonction de la profondeur des sculptures des pneumatiques [61]. Un pneu à 3 mm n'offre guère plus d'adhérence qu'un pneu lisse. La profondeur des sculptures des pneumatiques influe considérablement sur l'adhérence des revêtements fins, mais cette influence est moins importante pour les revêtements à texture (PMT, Profondeur Moyenne de Texture) comprise entre 0,6 et 1 mm et pratiquement nulle pour les revêtements très rugueux de type enduits.

Les propriétés mécaniques de la gomme du pneumatique jouent un rôle, plus important pour les revêtements rugueux que pour les revêtements lisses [62, 63]. Pour obtenir un bon frottement, il est préférable d'utiliser une gomme à hystérésis élevé sur des revêtements macrorugueux. La composante de déformation par hystérésis de la gomme due aux gravillons, suivant la définition classique du coefficient de frottement, devient prédominante à vitesse élevée (par rapport à celle due à l'adhésion). En fait, l'influence de la gomme dépend de la présence de la microtexture. Plus une surface possède de microtexture, qu'elle soit due aux gravillons ou au sable, plus le frottement pneumatique/chaussée est sensible aux propriétés mécaniques de la gomme [64]. La gomme du pneumatique à plus fortes pertes par hystérésis donne, sur une chaussée suffisamment rugueuse, des distances d'arrêt plus courtes [65].

#### II.1.3.4 Influence de la présence de polluant

Lorsque certains produits comme de l'huile, de la glaise, du sable ou des feuilles mortes sont déposés sur la chaussée, l'adhérence diminue. Aux sorties de carrières, l'adhérence est plus faible, en raison des fines de concassage perdues par les camions, qui se déposent sur la chaussée et qui joue un rôle d'abrasif. L'adhérence pneumatique/chaussée, déjà dégradée par la présence d'eau, l'est encore bien davantage en période hivernale par l'existence de neige ou

de glace à la surface des chaussées [66]. La neige tassée, le verglas ou la glace produisent une adhérence très basse.

### II.1.4 Mesure de l'adhérence

Il existe plusieurs systèmes de mesure de l'adhérence [67]. Mais selon les principes utilisés, les résultats ne sont pas identiques de par l'influence des divers paramètres considérés (vitesse, taux de glissement, profondeurs des sculptures du pneu de mesure, hauteur d'eau répandue lors de la mesure, etc.).

#### II.1.4.1 Coefficient de Frottement Longitudinal (CFL)

Les valeurs de CFL n'ont pas d'unité, elles sont indiquées avec deux chiffres après la virgule. Ce coefficient dépend de la nature de la gomme et de la chaussée en présence, mais également de leur état à l'instant considéré (température, propreté, présence d'eau, etc.). Pour un couple gomme/chaussée donné, il dépend faiblement de la charge, mais varie fortement en fonction du taux de glissement (roue libre, avec glissement, roue bloquée) [4]. Les appareils de mesure du coefficient de frottement longitudinal peuvent être séparés en deux groupes, soit suivant leurs fonctions de mesure : statique et dynamique, soit suivant leurs cadres de mesure : en laboratoire et *in situ*.

##### II.1.4.1.1 Essais en laboratoire

**Le Pendule SRT** : c'est un appareil de type statique, d'origine anglaise (Skid Resistance Tester), qui existe depuis plus de trente ans et équipe pratiquement tous les pays (cf. Figure II.6). Il porte, à l'extrémité de son bras, un patin de caoutchouc (76,2 × 25,4 mm) frottant pendant l'essai sur la surface à mesurer. Après une rotation d'un quart de tour à partir de la position horizontale, le patin entre en contact avec la surface de la chaussée à tester avec une vitesse de glissement de l'ordre de 15 km/h. Au cours de cette phase de glissement, des forces de frottement se développent entre le patin et la surface de chaussée, un ressort applique sur le patin frottant sur cette surface, une force verticale déterminée (le plus souvent 22,2 N). Un dispositif de réglage permet de maintenir la longueur de glissement dans des limites déterminées. La hauteur maximale de remontée du pendule, qui dépend de l'énergie absorbée par le frottement, est repérée par une aiguille placée devant un cadran gradué directement en valeurs de « coefficient de frottement mesuré avec le pendule ». Plus l'adhérence rencontrée par le patin est élevée et moins le bras du pendule remonte après frottement.

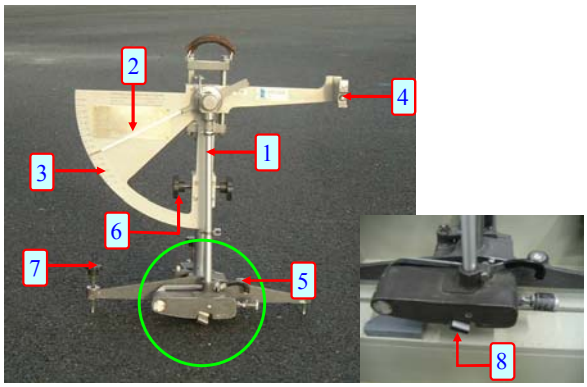



*Figure II.6 : Le pendule SRT*

*1. pendule (rayon de 500 mm) ; 2. aiguille ; 3. cadran gradué : échelle C (longueur de glissement de 126 mm), échelle F (longueur de glissement de 76 mm) ; 4. point d'accrochage du pendule à l'horizontale et bouton de déclenchement ; 5. niveau à bulle ; 6. vis de réglage vertical ; 7. vis de mise à niveau; 8. patin en caoutchouc.*

Cet appareil peut être utilisé directement non seulement en laboratoire, mais aussi sur route, ou sur des échantillons de chaussée prélevés *in situ* ou sur des éprouvettes de matériaux recomposés en laboratoire. La mesure est généralement réalisée sur une surface préalablement mouillée (voir norme NF EN 13036-4, [68]). Pour une surface donnée, la valeur du coefficient de SRT est égale à la moyenne de 5 points de mesures élémentaires avec la réalisation sur chacun de 5 lâchers. Il est enfin utilisé, avec un patin spécifique, dans l'essai permettant d'évaluer le coefficient de polissage accéléré (PSV) des gravillons utilisés pour les couches de roulement.

**NCSU Variable-Speed friction Tester (VST)** : cet appareil est similaire au pendule SRT [69]. Il porte une roue bloquée munie d'un pneu lisse au bout du pendule. Il s'adapte aux mesures en laboratoire et *in situ*. Cet essai permet de travailler à différentes vitesses de mesure, par rapport à la vitesse unique du SRT. Il est couvert par la norme ASTM E 707-90 [70].

#### II.1.4.1.2 Essais *in situ*

Le CFL est obtenue par un type d'essai simulant un aquaplanage [71, 72]. Une roue animée d'une vitesse angulaire constante ω est tractée à une vitesse de translation constante v. On mesure la force F qui se développe dans l'aire de contact pneu/chaussée et qui tend à ré-entraîner la roue à une vitesse angulaire correspondant à v/r (cf. Figure II.7).

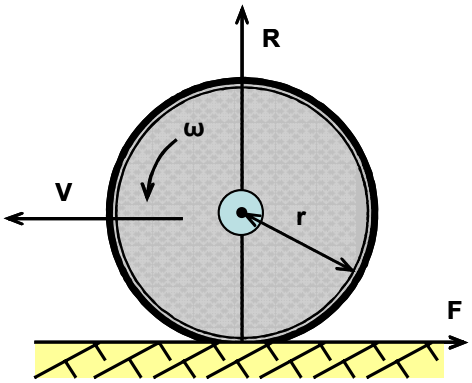



*Figure II.7 : Principe de calcul du coefficient de frottement longitudinal*

*v : vitesse constante ; ω : vitesse de rotation constante ; r : rayon de la roue de roulement ;*

*F : réaction longitudinale ; R : réaction verticale.*

*Si ω = v/r → CFL roulement ; Si ω = 0 → CFL blocage ; Si 0 < ω < v/r → CFL avec glissement.*

Le coefficient de frottement longitudinal μ est le rapport entre la force R qui se développe dans l'aire de contact pneumatique/chaussée et la réaction F tangentielle à la chaussée, due à la charge sur la roue :

$$\mathrm{CFL} = \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{R}} \qquad \text{(II.2)}$$

où *CFL* est le coefficient de frottement longitudinal ; *F* est la réaction longitudinale, i.e. la force de frottement longitudinal, en daN ; *R* est la réaction verticale, i.e. la charge appliquée par le véhicule sur la chaussée, en daN.

**ADHERA** : c'est un appareil français de mesure *in situ,* développé depuis 1968 (cf. Figure II.8). Cet appareil était auparavant appelé « remorque de glissance LPC » [73]. Il permet indirectement de caractériser la texture superficielle d'un revêtement de chaussée. L'essai se fait avec roue bloquée (taux de glissement de 100 %). L'équipement se compose d'une remorque monoroue et d'un véhicule tracteur aménagé pouvant atteindre une vitesse de 120 km/h. La roue de la remorque équipée d'un pneumatique lisse aux caractéristiques de gomme fixées (pneu AIPCR lisse 165R15 [74]) est chargée à 250 daN. Elle est tractée à vitesse constante par le véhicule assurant le mouillage du revêtement avec une hauteur d'eau estimée à 1 mm. Le résultat élémentaire d'un essai est représentatif du niveau moyen d'adhérence d'une bande de surface de chaussée de largeur égale à celle de l'empreinte du pneumatique sur la chaussée et de longueur égale à 20 m, quelle que soit la vitesse d'essai. On mesure le couple moyen des forces tendant à la ré-entraîner (voir norme NF P 98-220-2 [72]). La vitesse de mesure peut varier de 40 km/h à 120 km/h. Normalement, ces mesures sont réalisées pour trois vitesses d'essais (souvent sur route, à 40, 60 et 90 km/h ; sur autoroute, à 60, 90 et 120 km/h en section courante). Au-delà de 40 km/h, le CFL intègre

une partie de plus en plus forte de la macrotexture, en deçà il constitue une approche de la microtexture.

*Figure II.8 : L'appareil ADHERA*

**Le Grip Tester** : cet appareil d'origine écossaise (cf. Figure II.9a), d'environ 85 kg, mesure le coefficient de frottement longitudinal avec un taux de glissement constant de l'ordre de 15 %. L'appareil se présente sous la forme d'une petite remorque autonome permettant le mouillage, la mesure et son enregistrement. Le taux de glissement générateur de la force d'adhérence est obtenu par entraînement mécanique entre deux roues porteuses et la petite roue de mesure. Cette dernière est équipée d'un pneumatique dont la bande de roulement est lisse, avec une empreinte nominale statique de contact avec la chaussée de l'ordre de 15 $cm^2$. Elle peut être chargée à environ 19 daN. Le pneumatique de mesure est de taille 10 × 4 à 5 (diamètre × largeur, valeurs exprimées en pouces), conformément à la norme ASTM E 1844-96 [75]. Un système d'arrosage calibré lui est adjoint. Le débit est de l'ordre de 0,6 l/min à une vitesse de 5 km/h et de 4 l/min à 30 km/h. La mesure peut être ainsi réalisée en continu. L'axe de la roue de mesure est équipé d'un système de jauges de déformation permettant la mesure de la réaction verticale $F_v$ et de la force horizontale $F_h$. Il mesure un CFL, appelé Grip Number (GN), égal au rapport $F_h/F_v$. Les mesures sont réalisées à des vitesses d'essai comprises entre 5 et 40 km/h. Cet appareil n'est pas adapté à des vitesses inférieures à 5 km/h ni supérieures à 40 km/h. En effet, à vitesse plus élevée, un délestage de la roue de mesure peut se produire, du fait de la suspension sommaire de la petite remorque. Il peut être utilisé sur des petites surfaces pour l'évaluation de l'adhérence des marquages, des voies piétonnes et des dallages.

**(a) Le Grip Tester**

**(b) IMAG du STBA**

*Figure II.9 : Les appareils des mesures de frottement longitudinal dans le monde*

**DFTester** : cet essai, d'origine américaine, est appelé « Dynamic Friction Tester ». C'est un appareil de mesurer dynamique et portable du coefficient de frottement longitudinal par rapport à l'essai Grip Tester [76]. Il se compose d'une plaque horizontale de diamètre de 284 mm, et permet donc d'effectuer une mesure d'adhérence locale. Trois patins standard sur la plaque peuvent être mis en rotation pour mesurer le frottement. Chaque patin, de la dimension 20 × 16 × 6 mm (longueur × largeur × hauteur) est chargé sous un effort de 11,8 N. La vitesse tangentielle peut atteindre au maximum de 90 km/h. Il peut être utilisé *in situ* et en laboratoire. Les résultats à différentes vitesses : 20, 40, 60 et 80 km/h, sont normalement enregistrés pour obtenir une courbe du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de mesure. Cet essai est normalisé selon la norme ASTM E 1911-98 [77].

**Remorque « Instrument de Mesure Automatique de Glissance » (IMAG)** : cet appareil a été développé en France par le Service Technique des Bases Aériennes (STBA), devenu récemment le Service Technique de l'Aviation Civile (STAC). L'ensemble se compose d'un véhicule tracteur et d'une remorque de mesure (cf. Figure II.9b). Le pneumatique d'essai est le même que celui de l'appareil ADHERA. La charge à la roue est de 150 daN. Cette roue permet de mesurer un CFL lorsqu'elle glisse à 15 %. Les mesures sont le plus souvent réalisées avec le mouillage naturel pour donner aux pilotes, le niveau d'adhérence de la piste sur laquelle ils vont atterrir. Le mouillage est de 1 mm d'eau et les essais peuvent être effectués jusqu'à 140 km/h. Cet appareil est utilisé sur les aéroports pour surveiller la glissance des pistes.

**Remorque pour l'étude de l'adhérence des deux roues** : cet appareil est conçu pour la mesure d'un coefficient de frottement longitudinal avec des pneumatiques de types « cycles » ou « motocycles » à des vitesses comprises entre 20 et 130 km/h. En fait, c'est une remorque mono-roue, tractée par un véhicule léger. La roue est freinée de façon progressive jusqu'au blocage et on enregistre en continu le couple moyen d'adhérence. La charge est variable entre 30 et 100 daN pour s'adapter au type de pneumatique. La hauteur d'eau standard est de 1 mm.

**ASTM trailer** : cet appareil américain mesure le coefficient de frottement longitudinal [78]. Lors de la mesure, la hauteur d'eau est normalement de 1 mm. Le pneumatique d'essai

utilisé est un pneu lisse ASTM. Une version standard de cet appareil, appelé « Pavement Friction Tester » (PFT) [79, 80], est souvent utilisée. Il a été développé en Grande Bretagne pour étudier l'effet de la profondeur de la texture et de la vitesse sur l'adhérence. Il se compose d'un véhicule tracteur et d'une remorque de mesure.

**Michelin C35** : cet appareil a spécialement été développé par la société de manufacture des pneumatiques Michelin. Il se compose d'un véhicule comportant une cinquième roue. Cette roue peut mesurer le coefficient de frottement longitudinal pour un taux de glissement qui varie de 0 à 100 % pour différentes charges et différentes vitesses. Le même système d'acquisition de données, établi pour la mesure à l'ADHERA, est utilisé avec cet appareil.

**STRADOGRAPHE** : c'est un véhicule léger qu'intègre deux roues de mesures articulées de part et d'autre de son axe par l'intermédiaire d'un bras. Les deux bras sont chargés à 280 kg. Lors de la mesure, les deux roues sont bloquées en rotation. La mesure de la force verticale est réalisée par la pression appliquée sur chaque bras. La mesure de la force horizontale est réalisée à l'aide d'un capteur situé dans chaque bras. Le pneu utilisé est lisse. La hauteur d'eau sur chaussée est de 0,5 mm. La vitesse d'essai varie entre 40 et 90 km/h sur route ou entre 60 et 120 km/h sur autoroute [3].

D'autres appareils existent qui, tout en mesurant un coefficient de frottement longitudinal, diffèrent cependant dans la réalisation. Ils peuvent mesurer la distance d'arrêt, comme l'avion quadriréacteur Convair 880 M aux U.S.A. pour les mesures sur piste d'aérodrome, ou mesurer la décélération, ou encore être basés sur une remorque dynamométrique (« Skiddomètre » suédois) ou de freinage (remorque de la N.A.S.A. aux U.S.A. [82]).

#### II.1.4.2 Coefficient de Frottement Transversal (CFT)

Le coefficient de frottement transversal est égal au rapport entre la réaction transversale N et la réaction R normale à la chaussée due à la charge sur la roue [71, 81]. On peut définir un plan de rotation d'une roue tractée à une vitesse de translation constante et un angle θ d'envirage par rapport à la direction du déplacement (cf. Figure II.10). La réaction transversale N engendrée par l'adhérence pneu/chaussée tend à ramener la roue dans la direction du déplacement. Il n'y pas d'essai statique normalisé pour la mesure de frottement transversal comme pour le CFL. Par contre, de nombreux tribomètres de laboratoires permettent la mesure du coefficient de frottement transversal, dans des conditions bien définies, mais différentes de celles du pneu sur le revêtement [82]. Ce coefficient est obtenu par un type d'essai en dynamique simulant un aquaplanage. Sa valeur peut être utilisée pour caractériser indirectement la texture superficielle d'un revêtement de chaussée.

Comme le coefficient de frottement longitudinal, le CFT est sans dimension. Pour un revêtement donné, ce coefficient dépend du type de pneu (lisse ou sculpté), de la vitesse angulaire de la roue, de la hauteur d'eau sur le revêtement, de l'angle d'envirage et du poids appliqué sur la roue.

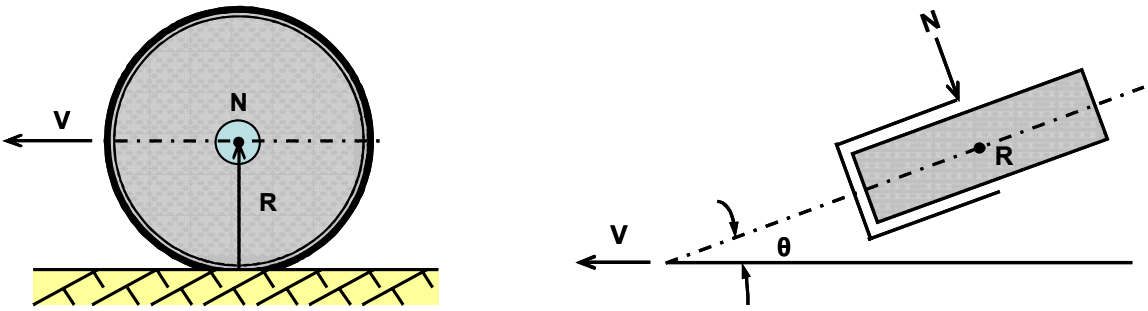



*Figure II.10 : Principe de calcul du coefficient de frottement transversal*

*v = vitesse constante ; N = réaction transversale ;*

*θ = angle de pincement (ou dérive, ou envirage) ; R = réaction verticale.*

Il est défini par :

$$CFT = \frac{N}{R} \tag{II.3}$$

où *CFT* est le coefficient de frottement transversal ; *N* est la réaction transversale, i.e. la force de frottement transversal, en daN ; *R* est la réaction verticale, i.e. la charge appliquée par le véhicule sur la chaussée, en daN.

**SCRIM** : le mot « SCRIM » [83, 84], est l'abréviation de Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine. L'appareil SCRIM a été conçu par le TRRL ; il est fabriqué par la société britannique WDM (cf. Figure II.11). C'est un camion équipé d'un réservoir de 6 000 litres. Il comporte une roue de mesure à droite. La roue de mesure fait un angle de 20° par rapport à la direction de vitesse du véhicule (cf. normes NF P 98-220-3 [81], NF P 98-220-4 [85]). Le taux de glissance utilisé est égal à sin20° = 0,34 soit 34 %. Le pneu d'essai est un rouleau de 76 × 508 (largueur × diamètre, valeurs exprimées en mm), gonflé à 0,35 MPa, avec une dureté standard. Il est solidaire d'une masse de 200 kg, mobile verticalement grâce à un guide vertical monté sur appui sphérique. Sous la condition standard d'essai, l'autonomie maximale est de 100 km. La vitesse de mesure limitée est au plus de 60 km/h pour l'auscultation du réseau routier français, mais les mesures peuvent être exécutées à 100 km/h sur autoroute. Les mesures sont effectuées en continu sur une chaussée mouillée avec une hauteur d'eau répandue devant la roue de mesure estimée à 0,5 mm, sous différents trafics. Le SCRIM lorsqu'il est équipé d'un module « RUGO », peut, en plus de la mesure du CFT, relever la macrotexture.

*Figure II.11 : L'appareil SCRIM*

Le tableau ci-dessous résume les différents appareils de mesure d'adhérence conventionnelle. Les autres appareils de mesure du frottement sont présentés dans les références [86, 87].

| Appareils / Paramètres | ADHERA | SCRIM | GripTester | IMAG | SRT |
|---|---|---|---|---|---|
| **Coefficient de frottement** | CFL | CFT | CFL | CFL | CFL |
| **Vitesse de mesure (km/h)** | 40 à 120 | 60 | 5 à 30 | 40 à 120 | 15 |
| **Taux de glissement (%)** | 100 | 34 | 14,5 | 8 à 100 | 100 |
| **Domaine d'application** | route | route | route | pistes d'aéroport | route/labo |
| **Charge (daN)** | 250 | 196 | 19 | 160 | 2,2 à 2,8 |
| **Sculpture** | lisse | lisse | lisse | lisse | lisse |
| **Surface ($cm^2$)** | 125 neuf<br>145 usé | 32 neuf<br>42 usé | 27 | 125 neuf<br>145 usé | surface frottée : 96 |

*Tableau II.1 : Comparaison pneumatiques/appareils conventionnels de frottement en France, [88] modifié*

### II.1.5 Mesure de la texture

L'adhérence d'une chaussée peut être évaluée soit par des mesures directes de la seule macrotexture - car il n'existe pas aujourd'hui de méthode satisfaisante pour la mesure à grand rendement de la microtexture - soit par des mesures indirectes de la macrotexture et de la microtexture par le biais de mesures de frottement.

#### II.1.5.1 Mesure de la macrotexture

La macrotexture peut être caractérisée directement par la Profondeur Moyenne de Texture (PMT), ou Hauteur au Sable vraie (HSv), ou par profilométrie.

#### II.1.5.1.1 Mesures directes

**Profondeur Moyenne de Texture (PMT)** : c'est une méthode volumétrique, dite « à la tache », qui donne une profondeur moyenne des aspérités de surface (cf. Figure II.12). Cette méthode statique (norme NF EN 13036-1 [89]) est réalisée par un opérateur, de manière ponctuelle et rapide. Elle est décrite comme la hauteur moyenne des creux de la surface du revêtement. La gamme des résultats ponctuels observés est de 0,3 à 3 mm, selon les techniques routières et l'état de la couche de roulement. Les résultats de PMT sont équivalents aux anciennes Hauteurs au Sable vraie. En fait, la mesure est également réalisée sur les volumes des vides et non sur leur hauteur ; ainsi, la hauteur au sable soit aussi fonction de la forme des vides. Les mesures sont testées nécessairement avec une surface de chaussée sèche et propre. Dans le cas d'un revêtement drainant, la hauteur au sable ne traduit pas correctement la macrotexture superficielle, car les grains s'écoulent dans la porosité ouverte du matériau. La PMT nécessite un grand nombre de mesures pour donner une appréciation significative de la macrotexture d'un revêtement.

*Figure II.12 : Mesure de la macrotexture PMT*

*1) on verse 25 cm$^3$ (V) de billes de verre (ou sable) calibrées ;*

*2) on étale les billes à l'aide du disque spécial en une plage circulaire ;*

*3) on mesure au moins 4 diamètres de la tache.*

Sa valeur peut être calculée par :

$$PMT = \frac{4V}{\pi d^2} \qquad \text{(II.4)}$$

où *PMT* est la Profondeur Moyenne de Texture, en mm ; *V* est le volume de billes verre (ou sable), en mm$^3$ ; *D* est le diamètre moyen de la tache, en mm$^2$.

L'appareil **RUGOLASER** : il s'agit d'une méthode dynamique (mesure effectuée pour une vitesse de 30 à 100 km/h), sur route. Il permet d'obtenir la « Profondeur Moyenne du Profil » (PMP, selon la norme NF EN ISO 13473-1 [34]). L'appareil mesure l'indenteur géométrique qui correspond à la moyenne arithmétique $R_a$ ou la moyenne quadratique $R_q$. L'appareil se compose d'un capteur sans contact à rayon laser et d'un potentiomètre optique (cf. Figure II.13). Le rayon émis frappe la surface des chaussées et se réfléchit sur le potentiomètre

optique. En fonction de la position du point illuminé sur ce potentiomètre, on en déduit la hauteur du point de réflexion à la chaussée. La mesure s'effectue en continu, sur une chaussée sèche et propre. L'ensemble des appareils de mesure est fixé à une hauteur moyenne de 30 cm, et l'étendue de mesure est de plus ou moins 6 cm par rapport à un point neutre de la chaussée. Les mesures de la distance entre appareil et chaussée sont testées avec une fréquence élevée d'environ 16 000 Hz. En général, les mesures sur couches de roulement drainantes ne sont pas utiles. Les résultats de mesures sont exprimés en valeurs de HSc (Hauteur au sable calculée, en mm), au pas de 10 à 20 m, en fonction des abscisses de la roue.

L'appareil calcule la valeur $R_a$ moyenne, la valeur $R_q$ moyenne, et une valeur HSc déduite de $R_a$ par une loi empirique de la forme :

$$HSc = a \times R_a + b \qquad \text{(II.5)}$$

où *HSc* est la Hauteur au Sable calculée, en mm ; $R_a$ est la moyenne arithmétique des aspérités, en mm ; *a*, *b* sont des coefficients à déterminer.

*Figure II.13 : Méthode profilométrique : le RUGOLASER*

**Mini Texture Meter (MTM)** : il s'agit d'un appareil portatif, produit et commercialisé par la société WDM, en Angleterre, à la suite d'une étude réalisée au TRL [11, 90]. C'est un appareil sur roulettes poussé par un opérateur entre 4 et 5 km/h. Il est équipé d'un capteur sans contact à rayon laser. Il se présente sous la forme d'un bâti soutenu par deux roues, et muni d'un manche démontable au bout duquel se trouve une poignée ; cette poignée contient une petite imprimante qui affiche les résultats, soit une valeur tous les dix mètres. C'est la valeur SMTD-10 (« Sensor Measured Texture Depth »). Chaque 50 m, l'appareil imprime la moyenne des cinq valeurs SMTD-10 précédentes ; c'est la valeur SMTD-50. Il relève la macrotexture à partir d'un profil de la surface échantillonnée au pas de 3 mm environ. L'appareil calcule la valeur SMTD, analogue au critère $R_q$. L'appareil est surtout utilisé en contrôle de chantier, sur chaussée sèche.

**Drainoroute** : l'appareil comporte un patin métallique avec un orifice pour l'écoulement, un réservoir d'eau à niveau constant et un débitmètre à impulsions, le tout porté par un véhicule léger [91]. Il quantifie l'aptitude au drainage instantané de l'eau superficielle sous le

pneumatique, en relevant en continu le débit d'eau qui s'échappe par les vides de la texture superficielle de la chaussée. Le pneumatique est simulé par un patin métallique qui glisse sur la chaussée, et qui est percé d'un trou par lequel se fait l'alimentation en eau, à pression constante [90, 92]. La mesure est réalisée sur une chaussée sèche à vitesse constante d'environ 30 km/h. Les résultats sont imprimés : soit la valeur moyenne par zones de 10 m, soit la moyenne et écart-type par section, soit encore un graphique d'enregistrement en continu du débit. La valeur fournie, dite « Coefficient Drainoroute », est le rapport du débit mesuré au débit maximal. Cet appareil est particulièrement adapté aux revêtements à faible macrotexture.

**L'appareil Protex (ou TM2)** : c'est un profilomètre laser portable [93]. Cet appareil est fabriqué par la société WDM en Angleterre et est commercialisé en France par la société SERTRA. Il permet des mesures ponctuelles, mais n'est pas adapté pour des mesures en continu. Le résultat obtenu est le même indicateur de macrotexture (PMP) que le RUGO, selon la norme NF EN ISO 13473-1 [34].

**TRIDIM** : c'est un appareil qui mesure des profils de chaussées [94]. Il comporte un système équipé d'un capteur laser à triangulation. Il permet la numérisation des surfaces routières sur une matrice de 256 × 256 points, à partir de carottes ou de moulages. Le pas d'acquisition choisi est 0,25 mm. La numérisation est donc faite sur un carré de 64 mm. La mesure porte sur la macrotexture, avec toutes les possibilités d'analyses bi- et tri-demensionnelles. Il permet aussi l'étude géométrique de la microtexture. L'acquisition et le traitement des données utilisent un micro-ordinateur.

**Circular Texture Meter (CTMeter)** : ce nouvel appareil a été développé depuis 1998 pour la mesure de PMP [95, 96]. L'essai est normalisé selon la norme ASTM E 2157 [97]. Il peut être mise ne œuvre en laboratoire et sur route. Il mesure un profil de diamètre de 284 mm avec un capteur laser. Le profil de mesure est divisé en 8 segments de 111,5 mm sur une longueur de la circonférence de 892 mm. Chaque mesure dure environ 45 secondes. La valeur moyenne de 8 mesures, la valeur moyenne de chaque arc qui est perpendiculaire à la direction de roulement et la valeur moyenne de deux segments dans la direction de roulement sont enregistrées.

Notons, enfin, qu'il existe d'autres moyens de mesure de la macrotexture [90] : la stéréo-photographie, le macroprofilographe [98], le numérisateur de répliques, le « High-Speed Texture Meter » (HSTM) [86], etc. Les appareils de mesure de la macrotexture conventionnels en France sont présentés dans le Tableau II.2.

| Appareils / Paramètres | Types de mesure | Indicateurs | Vitesse de mesure (km/h) | Domaine d'application |
|---|---|---|---|---|
| **Hauteur au sable** | volumétrique | HSv | 0 | route / labo |
| **RUGOLASER** | profilométrique | $R_a$ - PMP | 30 à 100 | route |
| **MTM** | profilométrique | SMTD ($R_q$) | 30 à 100 | route |
| **SIRANO** | profilométrique | $R_a$ - PMP | 5 | route |
| **PROTEX** | profilométrique | PMP | 5 | route |

*Tableau II.2 : Appareils de mesure de la macrotexture en France*

II.1.5.1.2 Mesures indirectes

Une autre manière pour apprécier la texture des revêtements est réalisée par des mesures de coefficient de frottement entre pneu / chaussée. Selon les appareils, ces mesures peuvent être réalisées à différentes vitesses de glissement (cf. § II.1.4). La mesure de macrotexture est indirectement réalisée par l'appareil ADHERA avec une vitesse plus élevée de glissement.

### II.1.5.2 Mesure de la microtexture

Les méthodes utilisées sont très diverses. Comme la mesure de la macrotexture, nous les divisons en deux catégories : mesures directes et mesures indirectes. Pour les mesures directes, il s'agit d'un ou de plusieurs indicateurs géométriques représentatifs d'un relief, d'un profil ou d'une surface. Les mesures indirectes sont basées sur des mesures de frottement.

II.1.5.2.1 Mesures directes

**Microscope Électronique Balayage (MEB)** : cette méthode permet de prendre les images sur la surface de l'échantillon pour examiner la microtexture à différentes échelles [99]. C'est une technique de microscopie basée sur le principe des interactions électrons-matière. Un faisceau d'électrons balaie la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules. Différents détecteurs permettent d'analyser ces particules et de reconstruire une image de la surface. Un grand nombre de constructeurs proposent des microscopes à balayage de série équipés de détecteurs d'électrons secondaires et dont la résolution se situe entre 1 nm et 20 nm. Son principe est présenté dans la Figure II.14. La société Michelin définit trois degrés de grossissement : × 32, × 320 et × 1000 et une échelle de notation des photos. Les notes dépendent de l'agressivité de la surface jugée visuellement par un opérateur et vont de 0 à 100 pour des aspects allant de « lisse » à « très rugueux » respectivement. Le MEB est utilisé pour caractériser la microrugosité d'un échantillon, que ce soit d'un granulat seul ou d'un enrobé, mais il peut aussi faciliter la caractérisation de la macrorugosité.

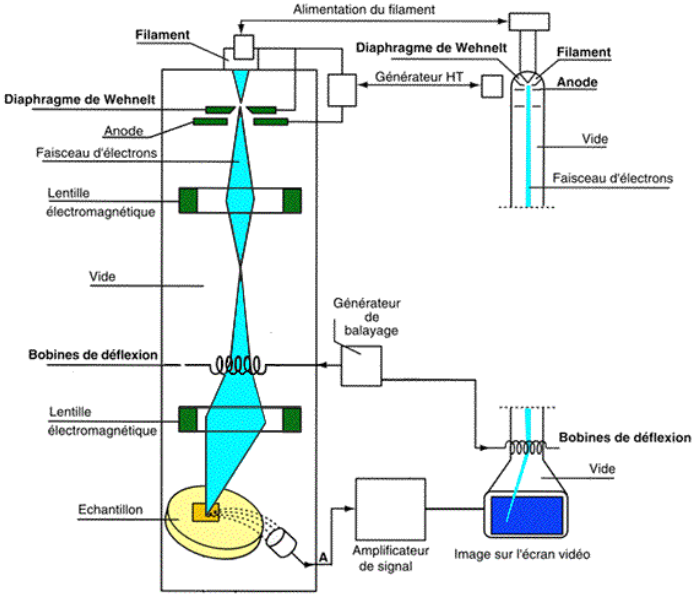



*Figure II.14 : Fonctionnement du MEB*

**Système tactile** : c'est un système équipé d'un capteur tactile [31]. Ce dernier est très utilisé pour la mesure de rugosité des surfaces usinées. Une pointe conique de diamant se déplace sur la surface à mesurer et ses débattements verticaux sont traduits en hauteurs de profil grâce à un capteur inductif lié mécaniquement à la pointe (cf. Figure II.15a). Son principal inconvénient pour une utilisation sur des revêtements de chaussée est le risque de blocage de la pointe de diamant, notamment lors de son passage dans un creux. Le rayon de courbure de la pointe conique est de 2 µm. L'étendue de mesure est de 6 mm. La longueur des profils est variable : elle dépend de la distance parcourue par la pointe de diamant, qui varie entre 12 mm et 25 mm.

**Système sans contact UBM** : c'est un système équipé d'un capteur à laser fonctionnant par focalisation dynamique [31]. Le système comporte trois éléments principaux : un capteur à laser appelé « Capteur Microfocus », un système de guidage permettant de déplacer des échantillons et l'électronique assurant le pilotage du système de guidage, le fonctionnement du capteur et l'acquisition des mesures (cf. Figure II.15b). Il dispose d'un faisceau laser ayant un diamètre de 1 µm lorsque le point de mesure se trouve à une distance dite « de focalisation » du capteur. L'étendue de mesure est de 1 mm. Ce système a nécessité une adaptation relativement lourde afin de limiter le nombre de défauts sur des relevés.

**(a) Système tactile**

**(b) Système UBM**

*Figure II.15 : Deux appareils de mesure du profil*

**Stéréovision photométrique** : c'est une technique fondée sur un modèle décrivant les propriétés photométriques de la surface étudiée (réflexion de la lumière). Elle a été développée dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire « Signal, Image et Communications (SIC) » de l'université de Poitiers et le LCPC pour effectuer un système transportable pour la prise d'images de chaussée [99]. Il s'agit d'un appareil photos à haute résolution (30 µm/pixel, taille de l'image : 3 000 × 2 000 pixels) entouré de trois sources lumineuses disposées de manière à fournir des éclairages de la même surface sous trois angles différents. La taille d'image et la résolution doivent être adaptées à l'étude de la microtexture et de l'influence de la macrotexture portante. La technique s'adapte à des surfaces de chaussée non uniformément colorées, en raison par exemple de la présence de granulats colorés.

Il y a des nombreuses méthodes de mesures dans le monde comme l'indique le Tableau II.3.

| Appareils | Origine | Type de mesure | Domaine d'application | Technique | Référence |
|---|---|---|---|---|---|
| CCD | France | profil | route | laser | [100] |
| ICC system | U.S.A | profil | route | laser | [101] |
| MGPS system | FHWA, U.S.A | profil | route | laser | [101] |
| Y-M Texture Friction Meter Mark 2 | Australie | profil | route | laser | [36] |
| Stéréoscopie | | image 3D | route/labo | caméra | [102] |
| Microprofilographe SURTRONIC | France | profil | labo | rugosimètre à pointe | [103] |
| Michelin | Michelin, France | image | route | relevé des indenteurs par empreinte | [104] |
| Light-section microscope | U.S.A. | image 2D | labo | microscopie | [105] |
| Walking Profiler | Australie | profil | route | | [106] |

*Tableau II.3 : Méthodes de mesure de la microtexture*

#### II.1.5.2.2 Mesures indirectes

Comme les mesures indirectes de la macrotexture, les mesures de la microtexture sont réalisées à l'aide de la valeur de frottement à basse vitesse. Même si la macrotexture influence

significativement les valeurs de frottement, les méthodes indirectes sont principalement employées pour caractériser la microtexture. Les plus répandues sont le SRT, le SCRIM et l'ADHERA en France (cf. § II.1.4). Les autres méthodes de mesure s'apparentent plus à une force de freinage. Elles sont en général associées à des machines de polissage (cf. § II.3).

## II.2 Évolution de l'adhérence des revêtements de chaussée

L'évolution de l'adhérence doit être considérée comme le résultat de la superposition de nombreux facteurs. Nous avions mis en exergue les facteurs influençant l'adhérence tel que la texture (micro- et macro-), le pneumatique, la formulation des revêtements, les caractéristiques des granulats, la présence de polluant, etc. Cependant, d'après Diringer [107], son évolution peut être déterminée en partie par les granulats utilisés dans le revêtement, les effets cumulés du polissage et de la saison.

### II.2.1 Décapage du liant

Lors de la fabrication des bétons bitumineux, les granulats sont enrobés d'une pellicule de bitume, y compris ceux qui sont placés en surface de la chaussée. Au début de la période de service de la chaussée, les gravillons seront progressivement débarrassés de cette couche de liant. La durée du décapage dépend du trafic, des conditions extérieures, des propriétés du liant… En général, elle varie de six mois à deux ans après la mise en circulation de la chaussée. En général, avant décapage, la chaussée a une adhérence faible, qui a tendance à augmenter au fur et à mesure que la surface se débarrasse de son bitume.

### II.2.2 Polissage par le trafic

La géométrie des rugosités d'un revêtement n'est pas figée ; elle évolue sous l'action des diverses sollicitations auxquelles la couche de roulement est soumise. Son évolution sous trafic se décompose en deux niveaux [29] : la fragmentation des granulats, provoquant à terme leur départ, et l'usure par frottement, qui se traduit par une diminution importante de la microrugosité initiale des gravillons à l'échelle macroscopique. Cette dernière est combinée à un phénomène d'usure à l'échelle microscopique, nommé polissage.

Il est montré que les poussières les plus fines jouent un rôle d'abrasif, ou, en termes tribologiques, de « troisième corps », et procèdent à une sorte de micro-usinage en arrachant des petits fragments de surface et en provoquant une rayure. Ce phénomène se produit en permanence dans les aires de contact pneu / gravillon. Le polissage d'une roche polyminérale engendre deux phénomènes superposables : une usure générale qui dépend de la dureté moyenne de la roche et une usure différentielle, qui dépend des duretés et des abondances relatives de minéraux, c'est-à-dire du contraste de dureté de la roche [108]. Dans

le cas de roches monominérales, le polissage se traduit uniquement par une usure générale. Ces deux mécanismes d'usure ont des actions différentes sur la géométrie des aspérités. L'usure générale a pour effet d'arrondir les aspérités alors que l'usure différentielle accentue le relief.

La capacité du granulat à résister au polissage, à court terme, est étudiée en utilisant quelques facteurs comme la composition et la dureté du granulat, la porosité, la distribution et la matrice du liant, la hauteur du gravillon et la présentation du milieu polissage/broyage. D'autres facteurs sont à considérer : la charge sur la roue, la hauteur du granulat concassé sur la surface et la présentation du milieu polissage/broyage.

La géométrie des rugosités de surface d'une chaussée dépend de la granularité utilisée, du dosage en liant, de la forme des granulats, de l'angularité et de l'état de surface des gravillons. La résistance au polissage des chaussées à long terme dépend de deux facteurs : le trafic de la route et le temps (température, pluie acide, action oxygène de l'air) [109]. L'action du trafic tend à réduire de plus en plus la rugosité initiale par fragmentation, usure des arêtes et polissage.

Les études de Lédée [110] ont montré que l'évolution de la microrugosité de différentes familles de roches s'explique par des différences de vitesse de polissage des cristaux constituant les granulats. La présence d'arêtes vives des cristaux détermine en grande partie la valeur du frottement. L'évolution du coefficient de frottement au cours du processus de polissage se corrèle bien avec les variations constatées à l'échelle de la microtexture, et notamment avec l'angularité des arêtes des cristaux, donc des aspérités de 0,05 à 0,15 mm de large et 0,02 à 0,05 mm de profondeur, ainsi, dans une moindre mesure, par celles de 0,01 mm de large et 0,005 mm de profondeur.

Young [111] propose une relation linéaire entre le CFT, le PSV (l'essai de polissage accéléré) et le trafic. Quand le PSV du granulat augmente, le coefficient de frottement augmente aussi. En revanche, quand le trafic augmente, le coefficient de frottement diminue (après décapage). Parmi ces deux facteurs, l'influence du PSV sur le frottement est plus importante selon Roe *et al.* [112, 113]. Il a proposé une relation logarithmique entre le coefficient de frottement et le trafic. Cependant, l'influence d'un seul facteur pour le frottement n'est pas toujours linéaire. Le coefficient de frottement diminue très rapidement avec le trafic au début de la circulation, puis plus lentement [114].

D'après Lees *et al.* [115, 116], la densité du trafic influence significativement l'évolution du frottement. Lees [115] a traité trois routes ayant le même revêtement, avec différents nivaux de trafic. Le coefficient de frottement diminue fortement pour une densité du trafic très importante. Cependant, l'influence du trafic sur l'évolution du frottement n'est pas toujours négative.

### II.2.3 Effet des variations saisonnières

Il est constaté que l'adhérence des revêtements varie au cours de l'année. D'une façon générale, elle est plus élevée en hiver qu'en été ; elle décroît en outre en période sèche pour remonter après la pluie [82, 111, 117, 118].

Pour quantifier les variations saisonnières de l'adhérence, les facteurs liés à la météorologie, tels que la température ou l'état de propreté de la chaussée, seront considérés. Du point de vue météorologique, les années ne se ressemblent pas : elles diffèrent par la répartition des précipitations, l'évolution des températures, etc. Le facteur principal est la variation de la température du pneu [111]. L'augmentation de la résilience du caoutchouc est produite par les montées de la température et cause une réduction de la résistance au glissement. Le résultat est une réduction du coefficient de frottement entre le pneu et la route.

Song [119] a trouvé une relation entre la température moyenne quotidienne et le coefficient de frottement. Quand la température augmente, le coefficient de frottement diminue et *vice versa*. Il donne une corrélation linéaire : un degré d'augmentation de la température amène une unité de diminution du FN (Friction Number). L'auteur trouve aussi que le frottement est proportionnel au débit de la pluie. Cependant, cette corrélation est moins importante que celle de la température.

Brillet et Gothié [120] ont effectué des mesures CFT à 60 km/h, à l'aide de l'appareil SCRIM. Ils montrent que les variations saisonnières de l'adhérence ne sont pas rigoureusement identiques, suivant la nature et l'état d'usure des revêtements testés.

Un autre facteur important est la nature de la poussière (troisième corps) présente sur la surface de la route et jouant aussi le rôle d'un agent polissant sous l'action des pneus du véhicule. La granulométrie des poussières rencontrées sur la route varie suivant la saison. De ce fait, l'état de polissage des granulats routiers varie aussi, engendrant des variations du coefficient de frottement. La poussière est plus fine pendant les mois de l'été, d'où un plus grand effet polissant sur les granulats de la route [121]. La récupération dans la microtexture pendant les mois hivernaux est due à la présence de poussières plus grossières et aux processus de la désagrégation naturelle, plus sévères, en hiver. Il pleut davantage en hiver, par conséquent les granulats sont plus propres, ceci amène une meilleure adhérence. Lees [115] propose les explications suivantes pour ce phénomène :

- la rupture des granulats poreux sous l'action du gel a pour effet d'augmenter la microtexture ;
- il fait également référenceaux écarts de solubilité et de sensibilité au ramollissement des différents minéraux présents dans les granulats.

Des modèles de prévision de l'effet des variations saisonnières sur l'évolution de l'adhérence sont donnés dans le Tableau II.4.

| Auteur | Loi d'évolution | Variables |
|---|---|---|
| **Diringer [122]** | $SN_{40} = SN_{terminal} + B_1 \sin(B_2 JDAY + B_3)$ | SN40 : coefficient de frottement, à 64 km/h (40 mph) ;<br>JDAY : Julian Day, date sur le calendrier Julien, exprimé en jours ;<br>$SN_{terminal}$ : coefficient de frottement moyen ;<br>$B_2$ : paramètre constant, égal à 2Π/365, synthétise un cycle saisonnier annuel à 360 degrés ;<br>$B_1$, $B_3$ : paramètres à déterminer par la régression, dans l'article, $B_1 = 3$ et $B_3 = 0$. |
| **Brillet et Gothié [120]** | $CFT = A + B\cos[2\pi(t - t_0)]$<br>$CFT = C + D\theta$ | CFT : coefficient de frottement transversal au temps t (en années) ;<br>t : temps, exprimé en années décimales ;<br>$t_0$ : paramètre d'ajustement, dans cette recheche, $t_0$=0,208 ;<br>θ : température, exprimée en degrés ;<br>A, B, C, D : paramètres à déterminer par la régression. |
| **AIPCR [5]** | $CFT = CFT_0 - AT^B$ | CFT : coefficient de frottement transversal ;<br>$CFT_0$ : coefficient de frottement transversal initial, en fonction du type d'enrobé (première installation, couche mince, granulats de basalte ou calcaires, recyclage, etc.) ;<br>T : trafic cumulé de véhicules poids lourds équivalent ;<br>A, B : paramètres dépendant du type d'enrobé et des conditions climatiques. |

*Tableau II.4 : Modèles de prédiction des variations saisonnières*

### II.2.4 Effet du vieillissement

La durée de vie des chaussées souples est liée au climat, à la fatigue de l'enrobé due au trafic, à la qualité du bitume, des granulats et à la formulation du mélange bitumineux. Parmi les détériorations des chaussées qui surviennent après plusieurs années de service, les phénomènes de fissuration et de désenrobage sont en partie liés aux effets du vieillissement de l'enrobé. Cette altération d'un liant hydrocarboné est due à l'évaporation de certaines huiles et à des actions physico-chimiques (rayonnement, oxydation,…). Tous ces facteurs auront une influence sur l'évolution de l'adhérence. Notamment, l'effet du vieillissement augmente l'adhérence.

Le vieillissement des bitumes sur route se traduit par des détériorations de la chaussée (fissuration…) provoquées par des changements de comportement rhéologiques (durcissement et fragilité) et de composition du liant [123].

Le bitume subit différents types de vieillissement, distincts par leurs mécanismes [123, 124] :

- un vieillissement physique qui se traduit par une augmentation de la viscosité sans modification des constituants. Il est engendré par un déséquilibre des proportions respectives entre asphaltènes et éléments légers ;
- un vieillissement chimique, de loin le plus important et le plus complexe, qui correspond à des réactions d'oxydation, de cyclisation et d'aromatisation. Il conduit également à un durcissement du bitume, dont la cause majeure est l'oxydation par l'oxygène de l'air. L'oxygène vient de l'air, et l'oxydation est accélérée par le soleil et la chaleur. Il s'agit d'une modification chimique des composants du bitume se traduisant par une évolution structurelle et rhéologique.

Il existe deux méthodes principales de simulation du vieillissement pour prévoir l'évolution du bitume pendant l'enrobage : Thin Film Oven Test (TFOT), 1940 ; Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), 1963. En France les méthodes normalisées sont le RTFOT selon la norme AFNOR NF EN 12607-1 [125], et le TFOT selon la norme AFNOR NF EN 12607-2 [126].

La méthode RTFOT ne s'applique pas à certains liants modifiés ou dont la viscosité est trop élevée pour permettre un renouvellement du film. Le matériel comporte une étuve parallélépipédique à double paroi et à chauffage électrique. L'étuve doit être ventilée par des courants d'air de convection et doit comporter une circulation d'air autour des parois latérales et du plafond. L'échantillon sec est chauffé dans son récipient dans une étuve dont la température ne doit pas dépasser la température de l'essai moins 10 °C. La température de référence de l'essai est 163 °C ± 1 °C.

La méthode TFOT permet de mesurer les effets combinés de la chaleur et de l'air sur un film mince de liant bitumineux. Ces effets sont mesurés à partir du changement de masse de l'échantillon ou de l'évolution des caractéristiques des liants bitumineux, mesurées avant et après le passage à l'étuve. Cette étuve à chauffage électrique, conforme aux exigences de performance indiquées, permet d'atteindre la température de 180 °C. L'étuve rectangulaire doit être ventilée par des courants d'air de convection. L'échantillon est exempt d'eau et chauffé dans son récipient, dans une étuve dont la température ne doit pas dépasser la température de l'essai moins de 10 °C. Ces deux méthodes simulent d'une manière adéquate et satisfaisante le vieillissement de construction.

Du fait de la température d'essai, le RTFOT simule le vieillissement de l'enrobage en centrale ; il n'est pas représentatif du vieillissement à long terme sur route. La simulation doit être faite par des essais accélérés réalisés à une température inférieure à 100 °C. D'autre part, en vue d'une extrapolation vers les températures sur site, des aspects cinétiques de ce vieillissement doivent être pris en compte.

Deux techniques sont principalement en concurrence :

- le **Pressure Ageing Vessel** (PAV) [127] dans laquelle le liant est placé sous 2,1 MPa de pression d'air et à 100 °C pendant 20 heures ou plus. Le temps de vieillissement des carottes d'enrobé bitumineux au PAV est quatre fois plus long que celui du bitume pur, pour un vieillissement équivalent. L'expérimentation montre que la teneur en filler n'influe pas sur le vieillissement. On considère que le RTFOT est équivalent à 5 heures de PAV à 100 °C sous une pression de 2,1 MPa.

De même, le RTFOT suivi de 20 h de PAV seraient équivalents au PAV seul durant 25 h. Cette technique est normalisée selon la norme NE EN 14769 [128] ;

- le **Rotating Cylinder Ageing Test** (RCAT) [129], norme NF EN 15323 [130], est comparable à l'essai RTFOT. Un film de liant bitumineux en mouvement est exposé dans une étuve réglée à une température déterminée, et soumis à l'action combinée de la chaleur et d'oxygène. La surface du liant exposée est constamment renouvelée et remélangée dans la masse restante. L'essai se réalise à 85 °C et doit se prolonger pendant de nombreuses heures (typiquement 240 h) pour produire des résultats simulant des durées de service de 10 à 20 ans. Cette durée de l'essai constitue un désavantage majeur, le vieillissement est homogène, la quantité de liant vieilli est suffisante pour des essais complémentaires et il permet des prélèvements (25 - 30 g) à différentes échéances afin de suivre l'évolution des caractéristiques et propriétés en fonction du temps de réaction. Une approche cinétique des phénomènes de vieillissement est donc rendue possible. Il existe une relation d'équivalence entre l'essai RCAT et le PAV. Le RTFOT suivi de 20 h de PAV est en moyenne équivalent à 178 ± 20 h de RCAT.

En plus des deux méthodes ci-dessus, Potschka [131] propose un essai de résistance au vieillissement. Les granulats enrobés de bitume sont soumis à une température de 180 °C sous un débit d'air de 500 ml/min pendant une heure. Aux Etats-Unis, Petersen [132] a fait un essai du vieillissement à 130 °C dans une colonne chromatographique sous un courant d'air. Il trouve que la cinétique d'oxydation des bitumes vieillis en laboratoire est différente de celle observée sur route. Lee [133] utilise un système d'oxydation sous une pression d'oxygène pour simuler le vieillissement des bitumes sur route. Après avoir subit un vieillissement artificiel par l'essai TFOT, le bitume est soumis pendant 1 000 heures à une température de 65°C, sous une pression d'oxygène de 3,15 MPa. Le temps d'oxydation en laboratoire en fonction du temps d'oxydation sur route est modélisé par une hyperbole.

A l'aide d'essai RTFOT, Mastrofini [134] propose l'indice du vieillissement suivant :

$$\text{A.I.}(\text{Ageing Index}) = \left[ \frac{\eta_{0(\text{après RTFOT})} - \eta_{0(\text{initial})}}{\eta_{0(\text{initial})}} \right] \times 100 \qquad \text{(II.6)}$$

où $\eta_0$ est la viscosité du zéro cisaillement à 60 °C.

Les résultats nous montrent qu'une haute teneur en asphaltènes et une faible stabilité colloïdale donnent une faible résistance au vieillissement. L'effet du vieillissement dépend de la température. Plus la température moyenne est haute, plus l'échantillon vieilli est rigide. Cependant, à basse température, la rhéologie n'influe pas sur le vieillissement.

En résumé, il y a trois catégories de facteurs d'influence de l'évolution de l'adhérence [5] :

- le trafic, caractérisé par le nombre total journalier de véhicules, la proportion de véhicules légers et de poids lourds, la pente de la chaussée (profil en long et en travers), les vitesses et les accélérations des véhicules;

- la couche de surface, caractérisée par la nature de la roche mère du granulat (polissabilité, teneur en calcaire, faculté d'accroissement de la rugosité), la granulométrie, la texture (ouverte/fermée), les caractéristiques du bitume et la présence de poussières (degré d'encrassement) ;
- le climat, caractérisé par l'alternance des périodes sèches et humides, la température moyenne, l'acidité de la pluie et le rayonnement solaire ultra-violet.

La Figure II.16 montre la combinaison de tous les effets influant l'évolution de l'adhérence pour un enrobé neuf.

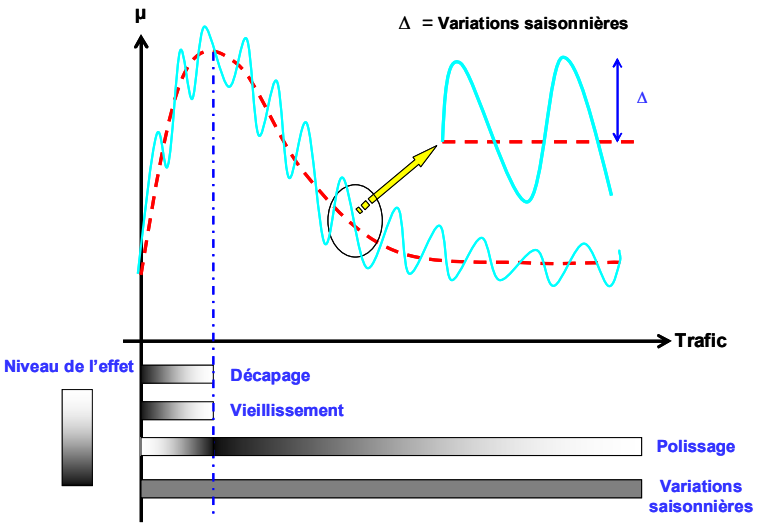



*Figure II.16 : Schéma de l'évolution de l'adhérence pour un enrobé neuf*

### II.2.5 Modèle de prédiction existant

La littérature sur le sujet montre que les lois d'évolution existantes sont basées sur des résultats obtenus sur des routes réelles. Il ne s'agit pas de lois décrivant une évolution complète depuis la construction de la route, mais elles donnent cependant une valeur minimale de l'adhérence désignée par $\mu_{min}$. D'autres travaux ont été réalisés pour déterminer la relation existante entre le coefficient de frottement et les caractéristiques intrinsèques des matériaux (cf. Tableau II.4). Très peu d'auteurs ont suggéré une loi d'évolution de l'adhérence basée sur les paramètres liés aux caractéristiques des matériaux.

| Auteur | Loi d'évolution | Variables |
|---|---|---|
| **Diringer *et al.* [107]** | $\mu_{min} = C_0\left(1 - e^{C_1 PV}\right) + C_2 PV$ | PV: valeur minimale de frottement obtenue sur des granulats en appliquant l'essai PSV sur une longue durée (au moins 10 heures) ;<br>$C_0$, $C_1$, $C_2$ : coefficients à déterminer par ajustement. |
| **Roe *et al.* [113]** | $\mu_{min} = A \cdot PSV - B \cdot \ln(CVD) + C$ | PSV : 'Polishing Stone Value' (PSV) du granulat ;<br>CVD : nombre de véhicules légers par voie et par jour ;<br>A, B, C : coefficients à déterminer par ajustement. |
| **Chelliah *et al.* [116]** | $FN = 10\left(PV - 6{,}63 \times 10^{-4} AADT - 1{,}15\right)$ | FN : coefficient de frottement à la vitesse maximale ;<br>PV : 'Polished Values' ;<br>AADT : nombre moyen de véhicules poids lourds (>3,5 tonnes) par voie et par jour. |
| **Young [111]** | $SFC = 0{,}024 - 0{,}663 \times 10^{-4} CVD + 10^{-2} PSV$ | SFC : coefficient de Frottement Transversal, CFT en français. Ici, coefficient moyen de frottement transversal mesuré à la vitesse de 50km/h en été ;<br>CVD : nombre de véhicules par voie et par jour ;<br>PSV : résistance au polissage du granulat. |
| **Pasetto [135]** | $SN = 100SFC$ | SN : coefficient de frottement ;<br>$SFC = 237{,}50AP^{-0{,}0759}$ pour le trafic global par voie ;<br>$SFC = 201{,}34AP^{-0{,}0712}$ pour le trafic poids lourds par voie ;<br>AP : nombre cumulé de véhicules. |

*Tableau II.5 : Modèles de prédiction existants*

L'une des lois décrivant l'évolution complète du frottement est proposée par Huschek [109] à partir d'une étude de suivi très intensive. La variation de l'adhérence est simplement décrite par une fonction de puissance du temps :

$$\mu = a(t+1)^b \qquad \text{(II.7)}$$

où $\mu$ est le coefficient de frottement mesuré par des appareils d'auscultation ; $t$ est le temps (depuis la construction de la route) exprimée en année ; $a$ est un coefficient de frottement initial ; $b$ est un coefficient à déterminer par ajustement, la détermination de ce coefficient est montrée à la Figure II.17.

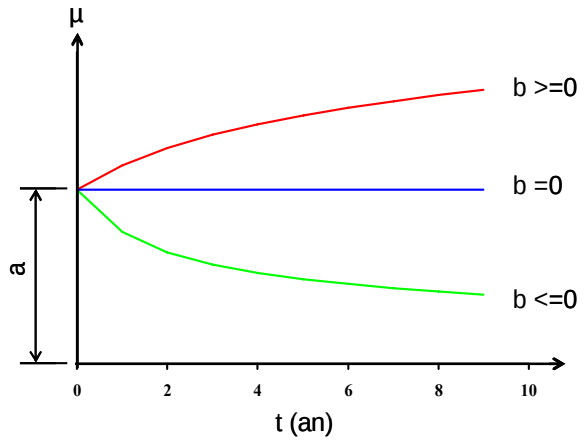



*Figure II.17 : Effet du paramètre « b » dans le modèle Huschek*

## II.3 Essais de polissage

### II.3.1 Essais normalisés

Plusieurs essais en laboratoire ont été mis en place pour tester la résistance au polissage des granulats. En général, ces essais se déroulent en deux temps. La première phase consiste en un polissage accéléré des granulats, la deuxième en une mesure de la résistance au frottement de la surface polie. En France, les deux essais les plus utilisés sont l'essai de polissage accéléré (CPA, en anglais PSV) et l'essai de polissage par projection (GRAP).

#### II.3.1.1 Essai de polissage accéléré

L'essai de polissage accéléré d'origine anglaise « Polish Stone Value » (cf. Figure II.18), norme NF EN 1097-8 [136], est l'essai le plus répandu pour la mesure de la résistance au polissage des granulats dans le monde. Il a le défaut d'être lent et d'être adapté uniquement aux gravillons. Un bandage plein en caoutchouc de 20 cm de diamètre entraîne, en rotation par contact, une roue porte-éprouvette de 40 cm de diamètre. Sur cette roue sont fixées quatorze éprouvettes, chacune d'elles comportant une quarantaine de gravillons 6/10 mm. L'interposition d'un mélange eau + abrasif, durant les 6 h de rotation, conduit à un état de polissage qui est quantifié par le frottement d'un pendule sur chaque éprouvette. Le résultat est un état limite de polissage mesuré avec le pendule SRT. L'échelle de lecture est une échelle réduite et le patin est deux fois plus étroit que celui réservé à l'usage routier du pendule.

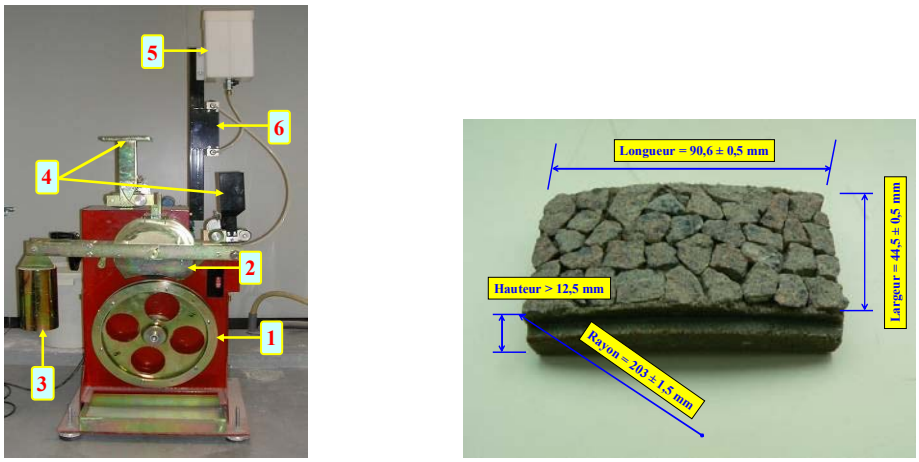



*Figure II.18 : Essai de polissage accéléré et un exemple d'échantillon*

*1). roue porte-éprouvettes ; 2). roue à bandage plein en caoutchouc ; 3). poids ;*

*4). mécanismes d'alimentation ; 5). alimentation en eau ; 6). indicateur de débit.*

### II.3.1.2 Essai de polissage par projection

L'autre essai est celui de polissage par projection (cf. Figure II.19). C'est une méthode de polissage sans contact faisant appel à la projection sous 10 MPa d'un mélange d'eau et d'abrasifs très fins [137 - 139]. Le procédé permet de qualifier la résistance au polissage des granulats en moins de 3 heures tout compris, très inférieure à celle d'un essai CPA. L'essai est réalisé sur des éprouvettes planes et d'un format quatre fois plus grand que celui de l'essai CPA. La mesure est faite au pendule SRT dans les mêmes conditions que lors des mesures sur chaussées.

L'angle de projection a d'abord été fixé à 40° par rapport à l'horizontale, sachant que les effets, entre 30° et 60° sont semblables et que divers inconvénients apparaissent en dehors de cette gamme. La projection est faite suivant un plan de balayage complet des surfaces, et répétée vingt fois.

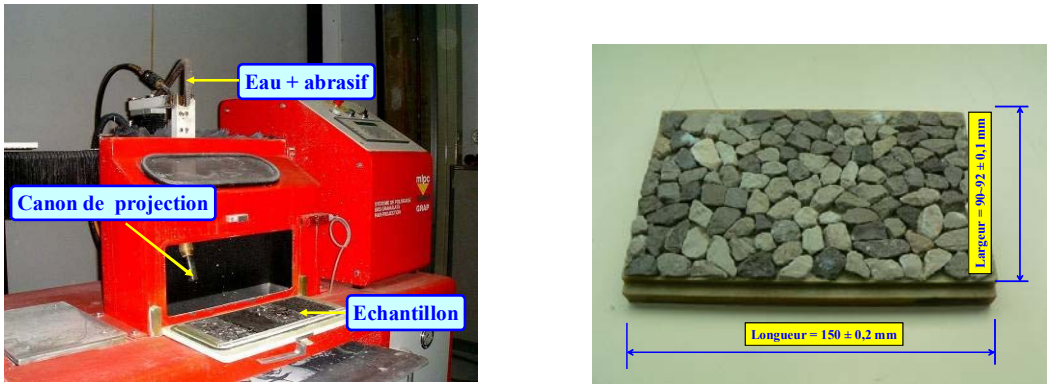



*Figure II.19 : Essai de polissage par projection et un exemple d'échantillon*

Les modes opératoires de ces deux essais sont présentés dans le tableau suivant :

| | **Essai CPA** | **Essai GRAP** |
|---|---|---|
| Eprouvette | Courbe | Plane |
| Largeur du patin (mm) | 31,7 | 72,2 |
| Longueur de frottement (mm) | 76 | 125 |
| Surfaces testées ($cm^2$) | 24 | 95 |
| Échelle de lecture SRT | Réduite | Normale |
| Mise en place granulats | Manuelle (pince à épiler) | Automatique (plaque vibrante) |
| Temps de préparation d'un échantillon | ½ journée | 1 heure |
| Temps de préparation essai | 3 jours | 2 heures |
| Temps de réalisation essai | 7 heures | 1 heure |
| Temps total entre réception échantillon et résultat | De 3 jours à 6 semaines | ½ journée |

*Tableau II.6 : Comparaison des conditions d'essai de polissage entre l'essai CPA et l'essai par projection (d'après [110])*

Ces essais sont pratiques, cependant, ils présentent également quelques inconvénients. Ils sont conçus pour les granulats, non pour des matériaux de surface de chaussée. En outre, l'essai CPA nécessite un temps très long pour la préparation des échantillons et pour sa mise en œuvre. L'essai de polissage par projection est moins gourmand en temps, mais, à cause de l'utilisation de la projection d'abrasif, le mode d'usure est différent de celui provoqué par le passage des véhicules.

### II.3.2 Présentation de la machine Wehner et Schulze (WS)

Une des machines récemment développée selon le principe du frottement de roulement est celle de l'Université d'Aukland [76]. Trois petites roues équipées de pneus sont utilisées pour le polissage. Les éprouvettes sont des plaques. Les auteurs ne précisent pas si le polissage se fait à sec ou en présence d'eau. Le frottement est mesuré par une autre machine appelée « Dynamic Friction Tester » (DFT), qui utilise un disque rotatif équipé de trois patins de gomme [140].

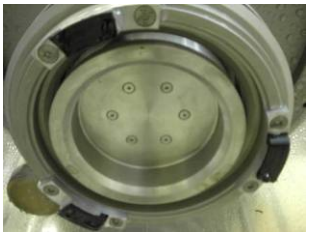
La machine de l'Université d'Aukland semble être un bon outil pour simuler le polissage d'une chaussée. Cependant, il est difficile d'évaluer la pertinence des simulations, car les travaux ne portent que sur des essais en laboratoire. En réalité, l'ensemble composé de cette machine de polissage et du DFT ressemble, dans son principe, à une autre machine d'essai développée en Allemagne, il y a trente ans, appelée « machine Wehner et Schulze » (WS). L'un des avantages de la machine WS vis-à-vis des autres machines est le regroupement sur le même bâti des deux fonctions de polissage et de mesure de frottement.

La machine Wehner et Schulze (cf. Figure II.20a) est fabriquée en Allemagne. L'appareillage est composé d'un système de polissage (cf. Figure II.20b) et d'un

système de mesure du frottement (cf. Figure II.20c). La détermination de l'évolution du frottement nécessite une étape de simulation du trafic suivie d'une étape de mesure de l'adhérence. Les éprouvettes sont de forme circulaire. Elles peuvent se présenter sous forme de carottes prélevées sur la chaussée ou de plaques fabriquées en laboratoire. Les essais peuvent s'appliquer directement sur les gravillons arrangés, ou même sur du sable. Ces matrices de résine sont appelées « galette » dans la suite.

**(a) Vue panoramique**

**(b) Fonction de polissage : galets coniques de polissage**



**(c) Fonction de mesure du frottement : patins de mesure**

*Figure II.20 : Machine Wehner et Schulze du LCPC au Centre de Nantes*

### II.3.2.1 Système de polissage

Avec le système de polissage, l'action du trafic sur la surface de l'échantillon à tester est simulée en laboratoire de manière accélérée. Pour cela, le polissage est effectué par la rotation avec glissement de trois galets coniques revêtus d'une couche de gomme striée transversalement (cf. Figure II.21). L'action de polissage est renforcée par un apport continu d'un mélange abrasif d'eau, d'abrasif et de farine de quartz à la surface de l'échantillon, pendant toute la durée de l'essai.

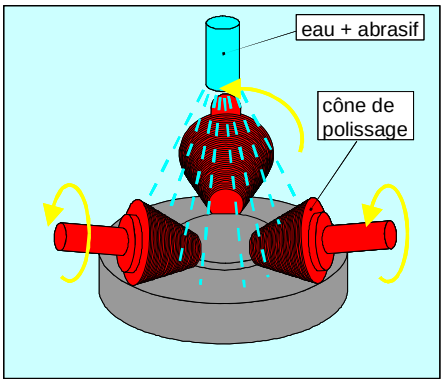



*Figure II.21 : Schéma du système de polissage*

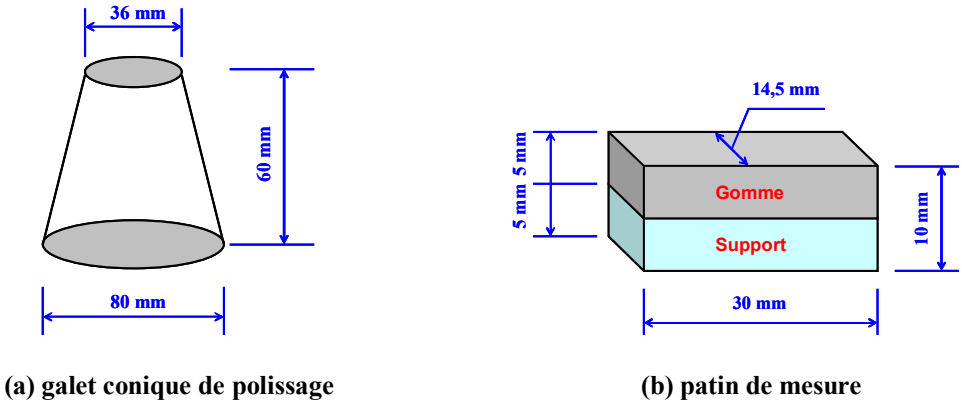
Les caractéristiques du système de polissage sont les suivantes :

- charge imposée : 400 N (masse de 40 kg), soit pression de contact moyenne d'environ 0,4 N/mm$^2$ ;
- taux de glissement < 1 % ;
- vitesse circulaire : environ 17 km/h ;
- vitesse de rotation des têtes : 500 tr/min (soit 90 000 passages par heure) ;
- débit du mélange abrasif : 5,0 l/min ± 10 %. L'abrasif est constitué d'un mélange d'eau et de farine de quartz d'une granulométrie inférieure à 0,063 mm, type Millisil W6 (*Quarzwerke Frechen*), avec un rapport de 60 g de farine de quartz par litre d'eau ;
- température ambiante : < 25 °C, température d'eau : environ 10 °C.

Les éléments principaux pour le système de polissage se composent :

- d'un dispositif de fixation de l'échantillon assurant un alignement plan-parallèle de la surface à tester ;
- d'une tête rotative motorisée munie de trois galets de polissage s'appliquant sur la surface à tester lors du processus de polissage ;
- d'un réservoir de mélange abrasif équipé d'un mélangeur ;
- d'une pompe assurant un débit de mélange abrasif à la surface de l'échantillon.

Chaque galet est constitué d'une pièce support métallique de forme tronconique sur laquelle est déposée une couche de gomme de 8,8 mm entaillée de huit rainures d'environ 4,5 mm de profondeur et de 3,5 mm de largeur. Les dimensions extérieures d'un galet sont de (cf. Figure II.22a) : 36 à 80 mm (la largeur) ; 56,3 mm (la hauteur) ; s = 60 mm (la génératrice) ; 65 ± 3 (la dureté Shore). Ils décrivent une surface annulaire d'environ 55 mm de large.




**(a) galet conique de polissage** **(b) patin de mesure**

*Figure II.22 : Dimensions de galet conique de polissage et patin de mesure*

L'échantillon est monté horizontalement dans le système de fixation. La température du mélange abrasif ne doit pas dépasser 25 °C. Elle doit être régulièrement contrôlée en cours d'essai. L'abrasif est progressivement pollué par des particules arrachées à la surface ou aux galets. De ce fait, il doit être entièrement renouvelé au plus après douze essais de polissage au plus.

La surface de l'échantillon est polie pendant une heure à 500 tr/min soit 30 000 cycle de rotations de la tête de polissage ou 90 000 passages de galet. A l'issue du polissage, la surface doit être soigneusement nettoyée et débarrassée de tout reste d'abrasif ou d'arrachements. La machine peut s'arrêter après un nombre programmé de rotations. A chaque arrêt, la surface de l'éprouvette est nettoyée à l'aide d'un jet d'eau (sans abrasif) projeté pendant 500 rotations des cônes. Après cette étape de lavage, l'éprouvette est déplacée manuellement vers la tête de mesure de frottement.

Après chaque cycle de polissage, on doit vérifier que la gomme des galets n'est pas endommagée par de gros arrachements. Les galets doivent être changés s'ils sont endommagés, s'ils deviennent collants, s'ils présentent de gros arrachements de gomme ou s'ils laissent des traces de frottement sombres à la surface de l'échantillon.

A la fin de chaque journée d'essai, la tête de polissage et le système de fixation doivent être soigneusement débarrassés des dépôts d'abrasif. La libre rotation des supports de galets doit être vérifiée. Si un point dur ou un bruit de roulement anormal est détecté, les galets doivent être changés.

#### II.3.2.2 Système de mesure de l'adhérence

Le système de mesure de l'adhérence reproduit en laboratoire le principe de la méthode de mesure de la roue tractée bloquée. Il est adapté, conformément au système de polissage, pour des mesures à la surface d'échantillons plans circulaires d'un diamètre de 22,5 cm. En début de processus de mesure, trois patins de gomme destinés à la mesure sont tout d'abord accélérés en position haute jusqu'à une vitesse circulaire d'environ 100 km/h. Lorsque la

vitesse atteint 90 km/h, l'eau est projetée à la surface de l'éprouvette. Puis, ils sont freinés par application sur la surface de l'échantillon sous un arrosage continu. Les valeurs de la force de frottement de freinage sont enregistrées pour toute la plage de vitesse jusqu'à l'arrêt des patins. La courbe du frottement aussi obtenue en fonction de la vitesse de rotation est présentée dans la Figure II.23. Dans nos essais, nous choisissons la même vitesse que celle utilisée dans la mesure de l'adhérence avec le SCRIM.

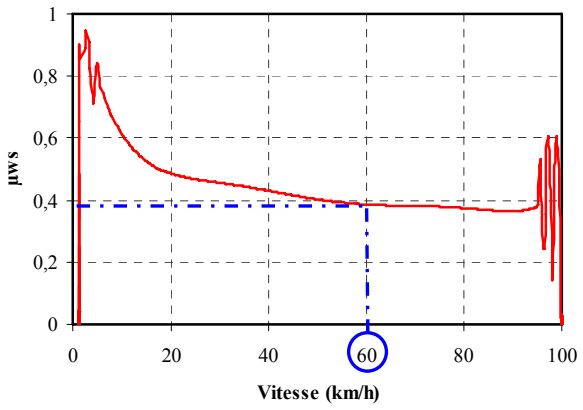



*Figure II.23 : Exemple de courbe de freinage obtenue avec la machine de Wehner et Schulze*

Les caractéristiques du système de mesure pour l'adhérence sont les suivantes :

- pression de contact moyenne : environ 2,0 bars (ou 200 kPa) ;
- surface de contact : 82 $cm^2$ ;
- longueur de la trace de mesure : 565 mm par tour de couronne de mesure ;
- débit d'eau : 20 l/min ;
- température : 12 °C ± 4 °C.

Les éléments principaux du système de mesure de l'adhérence sont :

- un dispositif de fixation de l'échantillon assurant un alignement plan-parallèle de la surface à tester ;
- une tête de mesure débrayable munie de trois patins de gomme de mesure ;
- un système d'entraînement de la tête de mesure ;
- un système de mouillage assurant une hauteur d'eau régulière ;
- un système de mesure du moment de rotation ;
- un système d'acquisition et de traitement des données.

Chaque patin est constitué d'un support métallique en forme d'arc de cercle, muni d'un système de fixation, sur lequel est déposé une couche de gomme de 5 mm d'épaisseur. Les dimensions extérieures d'un patin sont de (cf. Figure II.22b) : 14,5 mm (la largeur) ; 10 mm (l'épaisseur, support inclus) ; 30 mm (la longueur moyenne) ; 65 ± 3 (la dureté Shore).

### II.3.3 Autres essais de polissage

D'autres essais existent suivant un principe voisin recourant toujours à la circulation de roues caoutchoutées sur les surfaces à tester. Ces essais s'appliquent aussi bien aux surfaces routières qu'aux granulats seuls. Des essais voisins sont utilisés en Allemagne, Australie, Russie et Etats-Unis. Par exemple, un essai américain emploie un mouvement de va-et-vient. La machine de polissage utilise un patin de caoutchouc plaqué à l'éprouvette par de l'air comprimé.

En Allemagne, l'université de Munich a développé un appareil pour quantifier l'abrasion subie par la couche de roulement. Ce type d'abrasion est produit par les pneus cloutés qui roulent sur des revêtements en béton utilisées généralement en zone montagneuse. Un échantillon cylindrique de diamètre 15 cm est prélevé. Cet échantillon est mis dans un moule fixé sur une plate-forme, posée sur le sommet d'un arbre, mise en rotation par un moteur électrique à la vitesse de 750 tr/min pour une durée d'oscillation verticale de 25 mn. Au total, treize cycles sont réalisés pendant une durée de 15 000 secondes. L'abrasion est mesurée à l'aide de l'essai SRT à la fin de chaque cycle.

On trouve ensuite les essais suivants :

- **Penn State Reciprocating Polisher** (Etat de Pennsylvanie, Etats-Unis) [42] : cette machine de polissage utilise un patin de caoutchouc plaqué à l'éprouvette par de l'air comprimé. Le patin se déplace d'un mouvement alternatif à l'aide d'un mécanisme bielle-manivelle. Le polissage se fait avec un abrasif qui est envoyé sur l'échantillon à travers le caoutchouc, en présence d'un peu d'eau, ce qui évite la surchauffe du patin et assure un bon renouvellement de l'abrasif. Le polissage se met en oeuvre sur une seule éprouvette plane. Aucun renseignement n'est donné sur ses dimensions. De plus, la machine a été construite pour être utilisée sur des échantillons en laboratoire (aussi bien sur des granulats que des enrobés), mais aussi sur le terrain (chaussées). La mesure des résultats est faite au pendule SRT ;
- **Accelerated Polishing Using a Small Wheel Circular Track** (Université de l'Etat de Caroline du Nord, Etats-Unis) [69] : la machine de polissage se compose de quatre pneumatiques de petit diamètre. Ils peuvent se déplacer les uns indépendamment des autres et ainsi être désaxés. Le fonctionnement se fait à sec, sans abrasif. Le polissage est assuré par des cylindres abrasifs en métal ; ce sont des anneaux qui sont montés autour des pneumatiques. Ils sont ou ne sont pas utilisés suivant le type d'éprouvettes. Le polissage final est obtenu au bout de 8 heures de fonctionnement, cependant, la majorité des expériences s'arrête au bout de 3 heures. Une heure représente 7 200 passages de roue. Les éprouvettes sont planes. Elles peuvent être de tailles différentes mais elles doivent former ensemble une surface plane. L'essai est réalisé sur des éprouvettes de béton ou d'enrobés ; 12 éprouvettes sont placées simultanément sur l'anneau d'essai. On atteint un état limite de polissage évalué au pendule SRT (cas général) ou avec un appareillage spécifique dit « appareil de frottement à vitesse variable de l'Université de l'Etat de Caroline du Nord » ;

- **Full Scale Wheel Method** (Etats-Unis) [13] : la machine de polissage utilisée par l'Etat de Floride se compose d'une roue motrice automobile, appuyée sur l'éprouvette. Cette roue se déplace sur un échantillon fixe. Le polissage se fait en présence d'eau. De l'abrasif est envoyé dans le courant d'eau par de l'air comprimé. L'essai s'effectue en trois phases distinctes, d'une durée totale de 4 heures. L'échantillon est unique. Il peut être de taille variable, mais doit dépasser 305 mm de côté et 102 mm d'épaisseur. L'essai se fait sur des enrobés qui peuvent provenir d'une fabrication en laboratoire mais aussi de prélèvements sur chaussées. Des valeurs de traction fournies pendant et à la fin de l'essai permettent de déterminer l'état du polissage ;
- **MDOT Machine** (Michigan Department Of Transportation Machine, Etats-Unis) [141] : cette machine est développée par le Michigan DOT aux USA depuis 1971. Elle comporte un petit manège d'usure en laboratoire pour mettre les échantillons. Un bras rejoignant au centre un moteur électrique pour appliquer la charge et la rotation est monté au-dessus du plan d'échantillons. Une paire de roues est fixée sur deux côtés extrêmes de ce bras. Chaque roue peut être verticalement chargée avec une force d'environ 2,45 kN. Une cage est construite autour de la piste de l'épreuve pour raison de sécurité. Les pneus lisses de ASTM sont utilisés ;
- **The Variable Speed Internal Drum Machine** (Université de Birmingham, Royaume-Uni) [13] : cette machine est particulière, au sens où elle mesure le polissage des éprouvettes mais aussi l'évolution du pneumatique. Elle comporte un tambour de 1,12 m de diamètre qui tourne à une vitesse maximale de 500 tr/min. A l'intérieur de ce tambour se trouve le pneu. La vitesse peut varier de 0 à 112 km/h. Un angle d'envirage de la roue par rapport à la direction de roulement peut être donné. Quinze éprouvettes sont placées à l'intérieur du tambour. Il peut s'agir de granulats, mais aussi d'enrobés ou de bétons. Cependant, pour bien simuler l'usure sur chaussée, un tambour de 4 m de diamètre serait nécessaire. La mesure du polissage se fait au sein même de l'appareil au moyen d'un système de freinage et de mesures de forces transversales ;
- The **Flat-Bed Polishing Machine** (Université de Birmingham, Royaume-Uni) [13] : la machine de polissage considérée s'inspire de la machine CPA. Elle a été modifiée de façon à polir des pavés. Ils sont montés sur une surface annulaire plane. La procédure suivie lors de l'essai CPA normalisé n'a pas changé ; sauf pour le temps de polissage qui a été ramené à deux fois 24 minutes afin de garder le même état final de polissage qu'avec la roue CPA. Le polissage s'effectue ici sur des pavés. Il semble que des transformations soient nécessaires si l'on souhaite changer le type des surfaces à polir. La mesure du polissage s'effectue avec le pendule SRT ;
- **L'essai de polissage pour mortier** (TRL, Royaume-Uni) : la machine est celle de l'essai CPA. Les matériaux testés sont des mortiers sable/ciment constitués en éprouvettes de la même forme que pour l'essai CPA classique. Le résultat est mesuré également de la même manière que pour l'essai CPA avec l'échelle réduite du pendule SRT. Le résultat s'exprime en PMV (Polished Mortar Value).

## II.4 Essais normalisés sur les granulats

En plus des essais de polissage, les granulats sont caractérisés par des essais mécaniques, qui servent notamment à spécifier leur usage dans les couches de roulement de chaussées.

### II.4.1 Essai d'usure micro-Deval

L'essai micro-Deval permet de mesurer la résistance à l'usure des granulats, selon la norme française P 18-572 [142]. C'est un essai normalisé destiné à caractériser l'usure par frottements réciproques en présence d'eau d'un gravillon et consistant à mesurer la quantité de fines produites lors de la rotation d'un cylindre contenant le matériau et de l'eau. Il comporte un à quatre cylindres creux, fermés à une extrémité, ayant un diamètre intérieur de 200 mm ± 1 mm et une longueur utile de 154 mm ± 1 mm pour les gravillons compris entre 4 et 14 mm et de 400 mm ± 2 mm pour les 25 - 50 mm. L'usure est réalisée à l'aide des billes sphériques de 10 mm ± 0,5 mm de diamètre en acier. La vitesse de rotation est de 100 tr/min ± 5 tr/min. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les classes granulaires : 4/6,3 mm, 6,3/10 mm, 10/14 mm et 25/50 mm. Le résultat s'exprime sous la forme du coefficient micro-Deval en présence d'eau (MDE) :

$$\mathrm{MDE} = 100\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{M}} = 100\frac{\mathrm{M} - \mathrm{m}'}{\mathrm{M}} \qquad \text{(II.8)}$$

où *m* est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm ; *M* est la masse sèche de l'échantillon pour essai (500 ou 10 000 g) ; *m'* est la masse sèche de la fraction du matériau refusé après l'essai au tamis de 1,6 mm.

### II.4.2 Essai Los Angeles

C'est un essai normalisé de la mesure de la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats, norme française P 18-573 [143]. Il mesure la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant aux chocs de boulets normalisés. La machine comporte un cylindre creux en acier de 12 mm ± 0,5 mm d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre intérieur de 711 mm ± 2 mm et une longueur intérieure de 508 mm ± 2 mm. Les boulets sphériques en acier sont d'un diamètre de 47 mm ± 1 mm et pèsent entre 420 et 445 g. La vitesse de rotation de la machine est entre 30 et 33 tr/min. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes : 4/6,3 mm, 6,3/10 mm, 10/14 mm, 10/25 mm, 16/31,5 mm, 25/50 mm. La masse de l'échantillon pour essai sera de 5 000 g ± 5 g. Le résultat est calculé par l'équation suivante :

$$\mathrm{LA} = 100\frac{\mathrm{m}}{5000} \qquad \text{(II.9)}$$

où *LA* est le coefficient Los Angeles ; *m* est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm, en grammes.

## II.5 Objectifs et démarche

### II.5.1 Objectifs de la thèse

L'adhérence des revêtements routiers et leur évolution dans le temps sous l'action du trafic reste un élément très important pour la sécurité routière. L'adhérence est directement liée à la texture de la couche de roulement. L'évolution de cette texture sous l'effet du trafic influe beaucoup sur le potentiel d'adhérence. L'adhérence fluctue aussi avec les saisons par la variation de la température et la présence de particules sur la chaussée.

Pour quantifier ce potentiel d'adhérence qu'offre la chaussée, nous avons vu que plusieurs appareils de mesure ont été mis en place. La majorité de ces appareils est utilisable directement sur la chaussée. Pour les essais de polissage, que se soit le CPA ou le GRAP, il est difficile de les réaliser sur des enrobés. En outre, l'essai CPA nécessite plus de temps pour la préparation les échantillons et la mise en œuvre de l'essai. L'essai GRAP est moins gourmand en temps. Mais, l'utilisation de la projection d'abrasif modifie la texture de la surface et peut être non représentatif du polissage d'une chaussée soumise au trafic.

Il est donc nécessaire de disposer d'un appareil pouvant évaluer le coefficient de frottement des échantillons de granulats et d'enrobés, et pouvant reproduire le polissage causé par le trafic. Pour l'instant, il n'y a pas de méthodes d'essai permettant de simuler l'évolution de l'adhérence en laboratoire. Il est également nécessaire de développer une méthode de simulation pour obtenir la courbe d'évolution de l'adhérence en fonction du temps et/ou du trafic.

Les recherches antérieures ont montré l'importance de la microtexture quant à l'évolution de l'adhérence. Pour mieux comprendre les mécanismes de polissage, il est nécessaire d'établir des relations entre l'évolution de l'adhérence et celle de la microtexture.

Certains auteurs ont essayé d'établir des modèles pour l'évolution de l'adhérence en fonction du trafic, à l'aide de mesures *in situ*. Aucun de ces modèles ne permet cependant de prédire l'évolution de l'adhérence *in situ* à partir d'essais en laboratoire. Il faut donc chercher la liaison entre les évolutions *in situ* et en laboratoire. D'autres recherches ont été menées sur l'évolution de l'adhérence en fonction des caractéristiques des matériaux. Malheureusement, personne ne propose un modèle assez complet les prenant en compte. Une fois les caractéristiques d'enrobé in situ mesurées, l'idée serait de prédire l'évolution de l'adhérence *in situ* à l'aide d'essais en laboratoire.

### II.5.2 Démarche de travail

La démarche envisagée pour le travail de thèse est présentée dans la Figure II.24.

Elle comprend les points suivants :

- développement d'une méthode de polissage en laboratoire pour construire la courbe complète présentant l'évolution de l'adhérence avec le temps. L'essai doit pouvoir être mis en œuvre sur des échantillons de granulats et d'enrobés ;
- suivi de l'évolution de l'adhérence des routes circulées depuis leur construction, afin de faire une comparaison avec l'évolution simulée en laboratoire ;
- développement d'un modèle basé sur des évolutions simulées, et mise en relation entre les paramètres du modèle et les caractéristiques des matériaux.

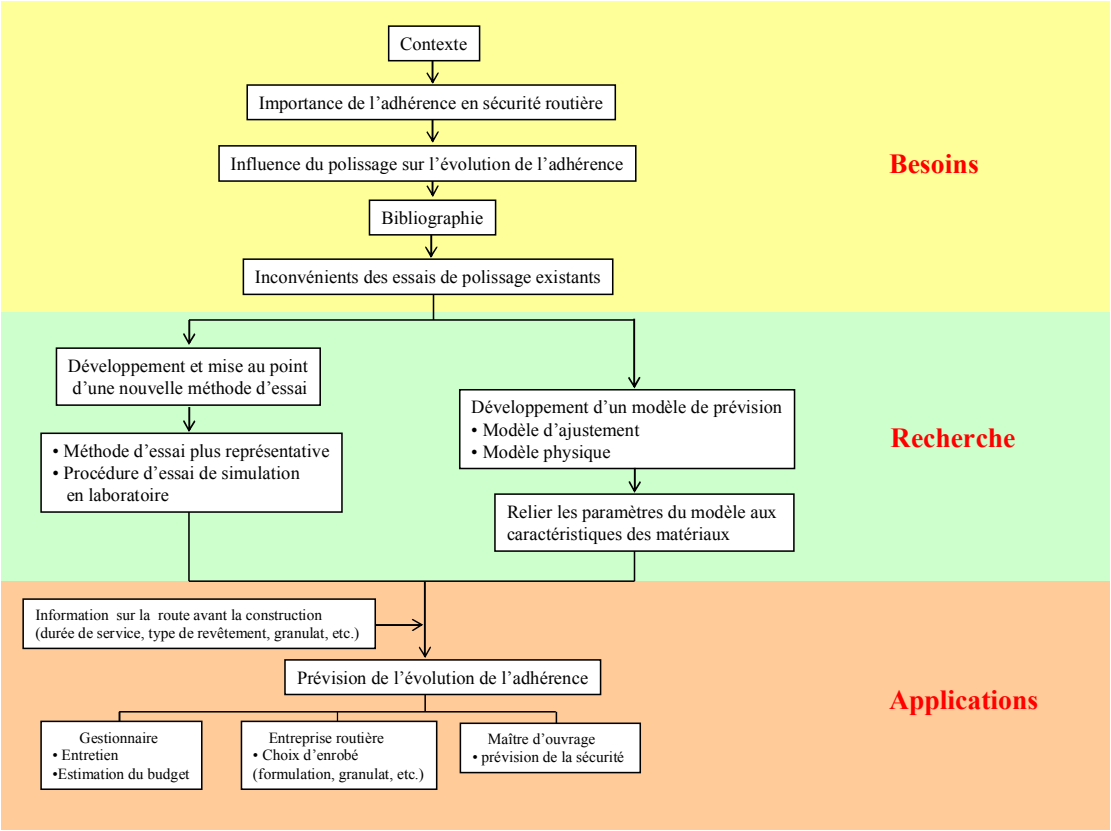



*Figure II.24 : Méthodologie de thèse*

Une fois toutes les étapes effectuées, lorsque nous donnerons les caractéristiques des enrobés, la prévision de l'évolution de l'adhérence sera possible. Selon cette recherche, nous espérons proposer des produits pour les différents usagers :

- pour les gestionnaires, il sera faisable d'estimer précisément le budget avant la construction selon les besoins : la durée de service d'attente, le trafic prévu, etc. A l'aide du modèle développé, les gestionnaires pourront prédire la sécurité routière,

la nécessité d'entretien, etc. ainsi que la perte de l'adhérence et le coefficient de frottement minimal. La courbe d'évolution de l'adhérence sera particulièrement intéressante en cas de modification du trafic;

- pour les ingénieurs routiers, il deviendra possible d'optimiser le choix du type de revêtement et des constituants des enrobés (caractéristiques des granulats, liant, etc.) en prenant en compte l'adhérence des pneumatiques. Ceci entrera dans l'optimisation globale, en termes techniques et économiques.

# III Développement d'un essai de polissage

Dans le premier chapitre, les essais de polissage et de mesure du frottement actuels ont été exposés. Ces essais normalisés ne sont pas adaptés à notre étude : le GRAP [137, 138] effectue un polissage qui n'est pas représentatif de la réalité, et le PSV [136] ne peut pas s'adapter aux mélanges bitumineux à cause de la forme incurvée des éprouvettes.

De nombreux résultats sont disponibles sur l'utilisation de la machine WS, grâce aux recherches menées à l'Université de Berlin [55, 109]. Les efforts ont été jusqu'à maintenant focalisés sur le développement d'un mode opératoire pour atteindre une adhérence minimale. Car cette machine reproduit très bien la réalité sur la route, nous décidons utiliser dans notre recherche.

Dans ce chapitre, une description succincte du mode opératoire de l'Université de Berlin est donnée. Une nouvelle procédure est adoptée pour obtenir la courbe complète d'évolution du frottement. Puis, les descriptions des sites et des échantillons expérimentaux sont présentées. Enfin, la validation de la nouvelle méthode d'essai est détaillée.

Tout d'abord, un bon fonctionnement du système doit au préalable être vérifié parc un cycle de mesure complet avec la plaque de contrôle, avant et après chaque mesure. Les propriétés d'adhérence de la plaque de contrôle ne doivent pas être modifiées au cours du processus de mesure. Une plaque de verre texturé ou une tôle d'aluminium brossé constituent des surfaces de contrôle adaptées. Lors du contrôle, la valeur mesurée doit rester égale à la valeur théorique avec une tolérance de ± 10 %. La Figure III.1 montre les coefficients de frottement en fonction du temps pour les différentes carottes à différents stades de polissage. Quatre patins différents sont testés. A partir de cette figure, la valeur du frottement sur la même plaque de verre varie entre 0,08 et 0,12. La plupart des valeurs sont environ égales à 0,1. Lors de la calibration de la plaque de verre, si on dépasse les valeurs de l'intervalle de mesure requis, les patins de mesure doivent être changés.

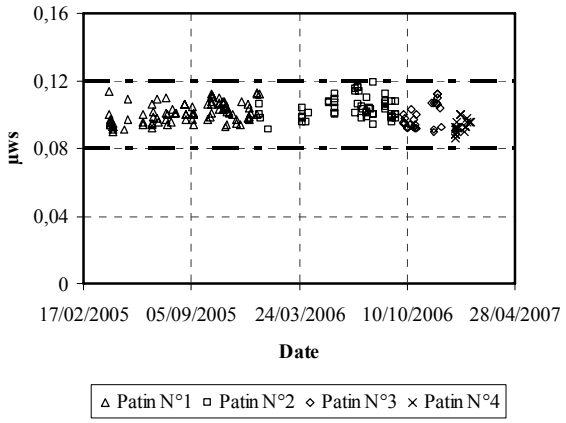



*Figure III.1 : Calibration de la mesure de frottement sur la machine WS (180 mesures pour les différentes carottes à différents stades de polissage avec quatre patins)*

L'usure des patins dépend du type de surface testé. De ce fait, un jeu de patins différents doit être utilisé pour chaque type de surface. Après chaque mesure, il faut vérifier l'état des patins. Si leur surface est usée ou si des déformations (bavures dues à l'échauffement lors du frottement) sont visibles, les patins doivent être remplacés. Dans tous les cas, les patins doivent être changés si l'épaisseur de gomme est inférieure à 2 mm.

## III.1 Présentation de la procédure d'essai

### III.1.1 Procédure existante : l'essai TU Berlin [109]

La procédure développée par l'Université Technique de Berlin (TU Berlin) cherche à atteindre le frottement limite d'un échantillon. Les différentes étapes sont décrites dans le Tableau III.1 :

| Niveaux de sollicitation | |
|---|---|
| État initial non sollicité | {0} |
| 90000 passages de polissage avec apport constant d'un mélange de farine de quartz et d'eau | {1} |
| Décapage de la surface par un sablage contrôlé | {2} |
| 90000 passages de polissage avec apport constant d'un mélange de farine de quartz et d'eau | {3} |
| Répétition de la mesure d'adhérence jusqu'à obtention d'une valeur limite | {4} |

*Tableau III.1 : Niveaux de sollicitation (programme type pour la prédiction de l'adhérence) [109]*

D'après les travaux de Huschek [109], une bonne corrélation a été trouvée entre le frottement à l'état {3} et celui mesuré sur des routes réelles après quatre ans de trafic. Dans le cadre de cette thèse, pour étudier les variations de l'adhérence d'une manière plus détaillée notamment pour proposer une loi d'évolution, il est nécessaire de simuler la courbe complète d'évolution du frottement et d'étudier les aspects suivants :

- la pertinence des courbes frottement-temps simulées, comparées à l'évolution des routes réelles ;
- le rôle des granulats.

Pour répondre à ces besoins, nous avons donc développé une nouvelle procédure appelée « procédure LCPC ».

### III.1.2 Nouvelle procédure : LCPC

#### III.1.2.1 Description de la procédure

Dans cette procédure, l'échantillon peut être fabriqué en laboratoire ou prélevé sur route. Le polissage et la mesure du frottement sont faits par la machine Wehner et Schulze. Les étapes sont les suivantes (cf. Figure III.2) :

- étape 1 : caractérisation de l'état « 0 » (PMT, relevé Imagine Optic, relevé STIL, SRT, $\mu_{ws}$) ;
- étape 2 : polissage et arrêt tous les 1 000 passages, avec une mesure de $\mu_{WS}$. Lorsque le coefficient de frottement atteint un maximum, on considère que le décapage du liant est achevé ;
- étape 3 : caractérisation de l'état « décapé » (relevé STIL, SRT, $\mu_{ws}$) ;
- étape 4 : polissage et arrêt à 15 000-20 000-50 000-90 000 passages, avec mesure $\mu_{ws}$ à chaque arrêt ;
- étape 5 : caractérisation de l'état « 90 000 » (relevé STIL, SRT, $\mu_{ws}$) ;
- étape 6 : polissage jusqu'à 180 000 passages ;
- étape 7 : caractérisation de l'état « 180 000 » (relevé STIL, SRT, $\mu_{ws}$).

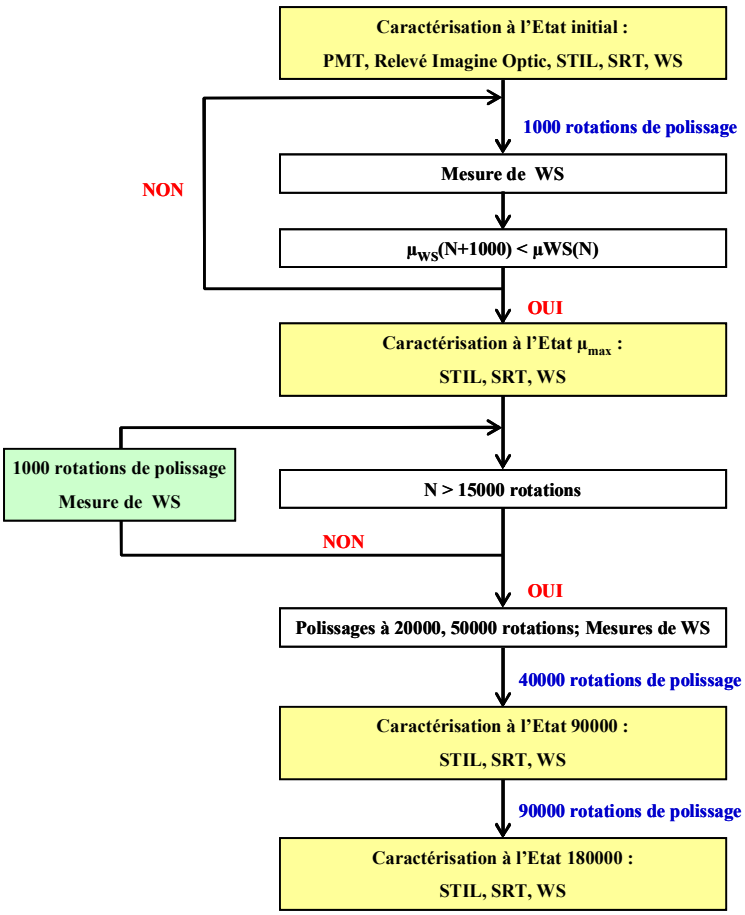


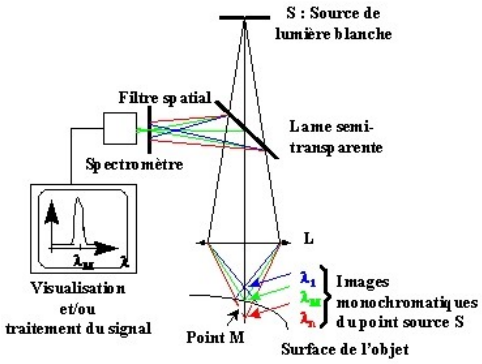

*Figure III.2 : Démarche de la procédure LCPC*

Pour des gravillons, la procédure est légèrement différente, compte tenu de l'absence de la phase de décapage du liant. La caractérisation de l'état « décapé » n'existe pas pour les granulats.

III.1.2.1.1 Relevé STIL : Principe de mesure des profils de microtexture

La mesure des profils de microtexture s'effectue sur la station de mesure « STIL ». Le principe de mesure du Capteur Optique CHR est celui de la microscopie confocale à champ étendu grâce au codage spectral de ce champ (cf. Figure III.3a).

**(a) Système de mesure LCPC en laboratoire**




**(b) Principe de la microscopie à profondeur de champ étendue (source : STIL [146])**

*Figure III.3 : Capteur confocal en champ étendu pour la mesure de la microtexture*

Contrairement à la microscopie conventionnelle qui permet, sous certaines conditions optogéométriques, d'imager simultanément tous les points d'un champ objet, la microscopie confocale n'image à chaque instant qu'un seul point du champ, lequel doit ensuite être scruté point par point par balayage (x, y). Ainsi il ressort que la microscopie confocale découle de la microscopie conventionnelle, à laquelle il suffit de rajouter un double filtrage spatial qui permet de n'éclairer qu'un seul point de l'objet et de ne détecter en retour que la lumière diffusée et/ou réfléchie provenant de ce même point.

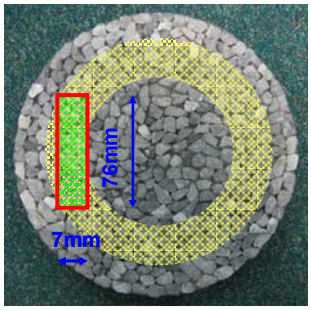
En pratique, une source de lumière blanche est imagée au moyen de l'objectif à chromatisme axial étendu en une série d'images ponctuelles monochromatiques dans l'espace de mesure (cf. Figure III.3b). Lorsqu'un objet intercepte l'espace de mesure au point « M », une seule des images ponctuelles monochromatiques est alors focalisée en « M ». Par application de la propriété de focalité seule la longueur d'onde $\lambda_M$ sera transmise avec un maximum d'efficacité à travers le filtre spatial, les autres longueurs d'ondes étant par essence défocalisées au point « M ». De plus, notons que si l'objet se compose d'un empilement de couches minces (au moins partiellement) transparentes, on détecte simultanément, en une seule acquisition, toutes les interfaces situées dans l'espace de mesure sous forme d'une série de maxima d'intensité.

Dans notre étude, quinze profils parallèles de 76 mm de longueur et à une distance de 0,5 mm d'écart entre des profils (largeur totale : 7 mm) ont été relevés dans des zones d'axes tangents au cercle de diamètre moyen de la couronne de frottement des patins de mesure de la machine Wehner et Schulze (cf. Figure III.4a). Les profils ont été réalisés dans quatre zones à l'état initial et dans une seule zone aux états suivants. D'après une analyse statistique, les résultats sur quatre zones sont identiques. Donc, on a pris un seul résultat sur une zone pour notre étude.

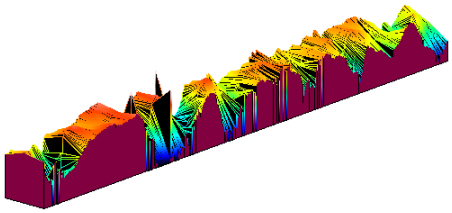
Les caractéristiques du capteur sont données dans le Tableau III.2. Les caractéristiques du mesurage sont les suivantes :

- plage de mesure dans la direction « x » : 10 µm ;
- nombre de points de mesure d'un profil : 7 601 ;

- longueur mesurée par profil : 76 mm.




**(a) Echantillon de granulats de 22,5 cm de diamètre, comportant une zone de 76 × 7 mm de surface polie pour la mesure de la microtexture**



**(b) Exemple d'image en 3D prise par un capteur confocal en champ étendu**

*Figure III.4 : Illustration des zones mesurées de la microtexture*

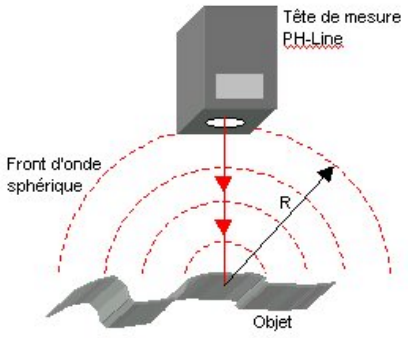
III.1.2.1.2 Relevé Imagine Optique : Principe de mesure des profils de macrotexture

Dans notre étude, les relevés de surface sont réalisés à l'aide de la station de mesure « Imagine Optic ». Ce dispositif utilise un capteur laser (cf. Figure III.5a) basé sur le principe de l'analyse de front d'onde permettant de limiter le nombre de valeurs invalides. L'échantillon est déplacé, sous le capteur fixe mesurant la hauteur verticale « z » de la surface, par translation dans le plan horizontal à l'aide d'une table de déplacement en « x » et « y ». L'association des valeurs de translations et de hauteur permet d'obtenir une surface numérisée z(x, y). La surface peut ensuite être caractérisée par des paramètres normalisés calculés à partir des valeurs numériques mesurées (NF EN ISO 4287 [148]).

Le faisceau lumineux d'une diode laser est projeté sur la surface. Le spot lumineux qui apparaît sur cette surface se conduit comme une source lumineuse ponctuelle secondaire. Un front d'onde sphérique est retro-diffusé par cette source lumineuse vers le capteur.

Une matrice de microlentilles échantillonne ce front d'onde et l'image sur une barrette CCD (cf. Figure III.5b).

**(a) Système de mesure LCPC en laboratoire**




**(b) Principe du capteur (émission et diffusion) [145]**

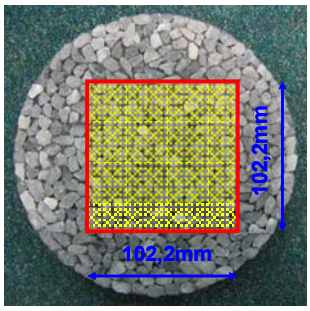
*Figure III.5 : Capteur à front d'onde pour la mesure de la macrotexture*

L'analyse du front d'onde présente, pour des mesures de texture de chaussées, trois avantages majeurs par rapport aux autres méthodes sans contact basées sur l'utilisation d'un laser :

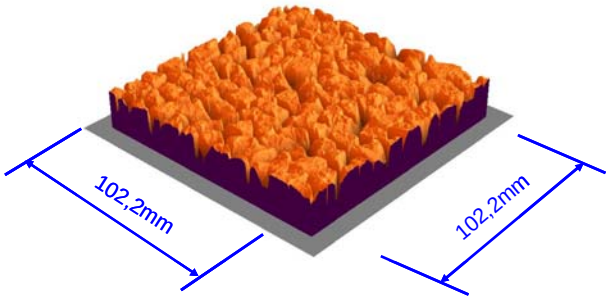
- la mesure est colinéaire : Les axes d'émission et de réception sont confondus ; il est possible de mesurer les reliefs les plus accidentés sans risque d'angle mort. Cette technologie permet donc théoriquement d'effectuer des relevés sur des surfaces présentant des reliefs en creux marqués type enrobé drainant ;
- la mesure est insensible à la couleur. La dissymétrie dans la répartition de l'énergie lumineuse de la tache focalisée sur un point de transition entre deux surfaces d'émissivités très différentes ne génère pas d'artefact sur la mesure. L'écart entre les barycentres de deux images d'une tache sur la barrette CCD est, en effet, indépendant de la répartition de l'énergie dans la tache. Il est donc possible de travailler sur des surfaces présentant des contrastes importants liés à la nature des granulats utilisés ;
- La mesure est possible jusqu'à une inclinaison de 87° de la surface. Jusqu'à cette valeur de l'angle entre le faisceau incident et la normale à la surface, le capteur délivre une valeur valide. Ceci doit permettre de limiter de manière significative le nombre des valeurs invalides liées aux pentes importantes qui peuvent être observées sur des surfaces de chaussées.

Les caractéristiques des relevés sont (cf. Figure III.6) :

- pas de mesure en « x » et « y » : 200 µm ;
- nombre de points de mesure : 512 × 512 ;
- surface relevée : 10,22 × 10,22 $cm^2$ centrée sur l'échantillon.




**(a) Echantillon de granulats avec 22,5 cm de diamètre, une zone centrée de 102,2 × 102,2 mm sur la surface pour la mesure de la macrotexture**




**(b) Exemple d'image en 3D prise par un capteur à front d'onde**

*Figure III.6 : Illustration d'une zone mesurée de la macrotexture*

Les spécifications annoncées par le constructeur pour les deux capteurs sont données dans le tableau suivant :

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

*Tableau III.2 : Caractéristiques des systèmes de mesure de texture [99]*

### III.1.2.2 Avantages de la procédure LCPC

Avec la procédure LCPC, nous pouvons obtenir une courbe complète incluant la phase de décapage du liant pour les mélanges bitumineux. Le décapage est effectué par des cônes en caoutchouc, donc proches des sollicitations exercées par des pneumatiques de véhicules.

Donc, trois points dans cette procédure sont à noter :

- le décapage du liant à l'aide d'un solvant, solution envisagée initialement, a été abandonné car le décapage mécanique par des cônes de caoutchouc est plus réaliste ;
- à chaque stade de polissage, il n'a été réalisé qu'une seule mesure du coefficient de frottement pour éviter l'effet de polissage d'une série de freinages ;
- au cours de l'essai, l'échantillon est démonté de son support deux fois, après avoir atteint le maximum du coefficient de frottement et 90 000 rotations de polissage, pour réaliser des mesures de microtexture.

En résumé, la procédure LCPC convient mieux à nos besoins. Si le temps pour les mesures de la texture (micro- et macro-) n'est pas compté, une demi-journée est nécessaire pour une procédure complète (permettant d'obtenir une courbe complète d'évolution du frottement).

## III.2 Descriptions des sites et échantillons expérimentaux

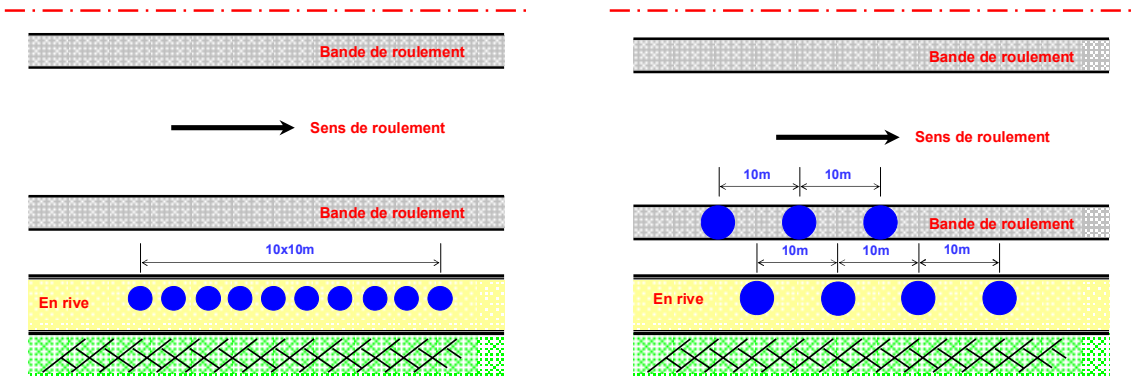
### III.2.1 Sites expérimentaux

Le choix du matériel et de la procédure développée ont déjà été présentés dans le paragraphe précédent. Avant d'analyser l'évolution du frottement en laboratoire des différents échantillons, on va décrire les trois sites expérimentaux. Puis, les caractéristiques des granulats seront données. Ces granulats sont utilisés pour la confection des échantillons de galettes et les échantillons des mélanges bitumineux. Les méthodes de fabrication de la galette et de la carotte en laboratoire sont expliquées dans ce paragraphe.

Cependant, les chaussées seront nécessairement en nombre limité, compte tenu du coût des essais nécessaires à leur suivi. Le suivi des chantiers de construction est donc complété par un plan d'expérience en laboratoire, afin d'établir la relation entre des paramètres du modèle d'évolution et des caractéristiques de matériaux, sur la base d'un nombre plus important de formules de matériaux routiers.

#### III.2.1.1 Programme du suivi des sites

Juste après la construction de la route, plus précisément après moins d'un mois de trafic, dix carottes de diamètre de 22,5 cm sont prélevées en rive (cf. Figure III.7a). Sur ce lot, une éprouvette est stockée en laboratoire comme référence. Une autre éprouvette est déposée sur le toit d'un local de la piste de glissance du LCPC afin étudier l'effet du vieillissement dû au climat.




**(a) Après la construction** **(b) Tous les six mois**

*Figure III.7 : Protocole des prélèvements in situ*

D'autres carottes sont prélevées ensuite sur la route tous les six mois : trois carottes dans la bande roulement droite et quatre en rive (cf. Figure III.7b). Les prélèvements sont espacés tous les dix mètres. Toutes les éprouvettes sont sciées perpendiculairement à leur axe, pour ne conserver que

les quatre centimètres supérieurs. Le prélèvement de la carotte verticale sur la chaussée est effectué à l'aide d'une machine de carottage (cf. Figure III.8).

*Figure III.8 : Carottage in situ (matériel du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers)*

Le choix d'un site expérimental dépend des caractéristiques recherchées (matériaux et trafic notamment) et surtout de la possibilité de prélever des carottes juste après la construction de la route et pendant sa durée de vie. Dans le cadre de la thèse, trois sites avec différents types de revêtement (BBSG 0/10, BBTM 0/10 et BBTM 0/6) ont été retenus ; leurs descriptions sont données dans le Tableau III.3. Les mélanges, béton bitumineux semi-grenu (BBSG) [149] et béton bitumineux très mince (BBTM) [150], sont couramment utilisés pour des revêtements de routes secondaires ou nationales. Dans le Tableau III.3, les chiffres suivant le nom du mélange indique la taille des granulats, exprimée en millimètre. Comme il s'agit d'un choix de chantiers existants, il n'est pas possible de choisir le type de granulat, en fonction de son PSV par exemple.

| Site | Type de route | Longueur du tronçon | Trafic (TCPL, 10×5/an) | Formulation | Nature du granulat | PSV | LA | MDE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Angers** | nationale | 2 700 m | 2,89 | BBSG 0/10 | Spilite | 53 | 9 | 10 |
| **Clisson** | départementale | 1 700 m | 1,14 | BBTM 0/10 | Gabbro | 51 | 15 | 10 |
| **Coëx** | départementale | 800 m | 1,10 | BBTM 0/6 | Rhyolite | 55 | 15 | 9 |

*Tableau III.3 : Description des sites et matériaux utilisés*

### III.2.1.2 Site d'Angers

Le chantier d'Angers est une section de la RN162. Dans ce cas, les couches de roulement sont composées d'un « Béton Bitumineux Semi-Grenu de granularité 0/10 mm », noté « BBSG 0/10 ». Les fractions granulaires sont de la pierre bise de granularité 0/2, 2/6 et 6/10 mm et des fillers. Les pourcentages des composants sont donnés dans le Tableau III.4.

| Composant | | | Origine (Carrière) | Pourcentage (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Granulats** | **Fraction** | 6/10 mm | pierre bise | 42 |
| | | 2/6 mm | pierre bise | 17 |
| | | 0/2 mm | pierre bise | 39,5 |
| | | filler | - | 1,5 |
| **Liants** | **Classe** | bitume 35/50 ESSO PJ | - | 5,7 ppc |

*Tableau III.4 : Composition de l'enrobé du site d'Angers*

### III.2.1.3 Site de Clisson

Le chantier de Clisson est une section de la déviation de la route départementale à Clisson. Les couches de roulement sont composées d'un « Béton Bitumineux Très Mince de granularité 0/10 mm », noté « BBTM 0/10 classe1 ». La composition de cet enrobé est présentée dans le tableau suivant.

| Composant | | | Origine (Carrière) | Pourcentage (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Granulats** | **Fraction** | 6/10 mm | La Margerie | 70 |
| | | sable 0/2,5 mm | La Margerie | 27 |
| | | filler | La Margerie | 3 |
| **Liants** | **Classe** | STYRELF 11-40 | Givors | 5,4 ppc |

*Tableau III.5 : Composition de l'enrobé du site de Clisson*

### III.2.1.4 Site de Coëx

Le chantier de Coëx est une section de la route départementale D6 à Coëx. Les couches de roulement sont constituées d'un « Béton Bitumineux Très Mince de granularité 0/6 mm classe 1 discontinu 2/4 ». La composition de l'enrobé est exprimée dans le Tableau III.6.

| Composant | | | Origine (Carrière) | Pourcentage (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Granulats** | **Fraction** | 4/6 mm | La Vrignaie | 67 |
| | | 0/2 mm | La Vrignaie | 27 |
| | | filler | Méac | 6 |
| **Liants** | **Classe** | - | - | 6,34 ppc |

*Tableau III.6 : Composition de l'enrobé du site de Coëx*

Ces trois sites expérimentaux sont suivis à l'aide du programme de prélèvement décrit précisément (cf. Figure III.7). Leurs enrobés respectifs, de gauche à droite à la Figure III.9, sont respectivement BBSG 0/10, BBTM 0/10 et BBTM 0/6. L'influence des différents états de la surface, provenant des formulations des mélanges bitumineux, sur l'évolution du frottement est présentée dans le chapitre suivant.

**(a) BBSG 0/10** **(b) BBTM 0/10** **(c) BBTM 0/6**

*Figure III.9 : Les différents sites expérimentaux*

### III.2.1.5 Site de Saint-Fulgent

Pour compléter le plan d'expérience, deux sites expérimentaux sont ajoutés. Ces deux sites ont été circulés depuis quelques années avant le prélèvement des carottes. D'abord, le chantier de Saint Fulgent qui est une section de la route nationale RN137 à Saint-Fulgent a été retenu. Les échantillons pour le site de Saint-Fulgent sont prélevés après 6 années de trafic. L'enrobé a déjà été décapé lorsqu'on a prélevé les échantillons *in situ*. Le programme du suivi de ce site est réalisé comme celui à la Figure III.7b. Un seul prélèvement est effectué sur ce site. Cinq sections de BBTM 0/10 avec deux granulats possédant les valeurs de PSV extrêmes sont répartis dans différentes fractions granulométriques sont utilisées (cf. Tableau III.7).

| Site | Type de route | Longueur du tronçon | Trafic (TCPL, 10×5/an) | Formulation | Nature du granulat | PSV | LA | MDE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Saint-Fulgent** | nationale | 2 192 m | 1,76 | BBTM 0/10 | Grès + Cornéenne quartzeuse | 61 | 13 | 14 |
| | | | | | Leptinite | 51 | 13 | 4 |

*Tableau III.7 : Description du site supplémentaire de Saint-Fulgent et matériaux utilisés*

Les couches de roulement sont constituées d'un « BBTM 0/10 continu ». Les compositions de l'enrobé sont exprimées du Tableau III.8 au Tableau III.12.

| Composant | | | Origine (Carrière) | Pourcentage (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Granulats** | **Fraction** | 6/10 mm | Mouzinière | 58 |
| | | 2/6 mm | Mouzinière | 22 |
| | | 0/2 mm | Garenne | 17,5 |
| | | filler | - | 2,5 |
| **Liants** | **Classe** | Bitume pur 50/70 | - | 5,75 ppc |

*Tableau III.8 : Composition de l'enrobé de site de Saint-Fulgent (BBTM 0/10 dont 0/2 Garenne)*

| Composant | | | Origine (Carrière) | Pourcentage (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Granulats** | **Fraction** | 6/10 mm | Mouzinière | 58 |
| | | 2/6 mm | Garenne | 21 |
| | | 0/2 mm | Mouzinière | 17,5 |
| | | filler | - | 3,5 |
| **Liants** | **Classe** | Bitume pur 50/70 | - | 5,75 ppc |

*Tableau III.9 : Composition de l'enrobé de site de Saint-Fulgent (BBTM 0/10 dont 2/6 Garenne)*

| Composant | | | Origine (Carrière) | Pourcentage (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Granulats** | **Fraction** | 6/10 mm | Garenne | 60 |
| | | 2/6 mm | Mouzinière | 20 |
| | | 0/2 mm | Mouzinière | 17,5 |
| | | filler | - | 2,5 |
| **Liants** | **Classe** | Bitume pur 50/70 | - | 5,55 ppc |

*Tableau III.10 : Composition de l'enrobé de site de Saint-Fulgent (BBTM 0/10 dont 6/10 Garenne)*

| Composant | | | Origine (Carrière) | Pourcentage (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Granulats** | **Fraction** | 6/10 mm | Mouzinière | 59 |
| | | 2/6 mm | Mouzinière | 20,5 |
| | | 0/2 mm | Mouzinière | 16,5 |
| | | filler | - | 4 |
| **Liants** | **Classe** | Bitume pur 50/70 | - | 5,85 ppc |

*Tableau III.11 : Composition de l'enrobé de site de Saint-Fulgent (BBTM 0/10 tout Mouzinière)*

| Composant | | | Origine (Carrière) | Pourcentage (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Granulats** | **Fraction** | 6/10 mm | Garenne | 59 |
| | | 2/6 mm | Garenne | 21 |
| | | 0/2 mm | Garenne | 17,5 |
| | | filler | - | 2,5 |
| **Liants** | **Classe** | Bitume pur 50/70 | - | 5,50 ppc |

*Tableau III.12 : Composition de l'enrobé de site de Saint-Fulgent (BBTM 0/10 tout Garenne)*

### III.2.1.6 Site de Fontenay

Le deuxième site expérimental supplémentaire est une section de la route nationale RN148 à Fontenay. Dans ce site, cinq sections différentes sont sélectionnées : une de BBDr 0/10, trois de BBTM 0/10 et une de BBSG 0/10, avec un seul granulat, sont (cf. Tableau III.13). Un autre revêtement BBDr 0/10, « Béton Bitumineux Drainant de granularité 0/10mm » [151], est retenu pour ce site. Comme pour le site de Saint-Fulgent, les échantillons de ce site ont été prélevés selon le programme présentant à la Figure III.7b. Les prélèvements ont été réalisés après 11,5 années de trafic.

| Site | Type de route | Longueur du tronçon | Trafic (TCPL, 10×5/an) | Formulation | Nature du granulat | PSV | LA | MDE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Fontenay** | nationale | 7 900 m | 2,21 | BBDr 0/10 | Diorite | 50 | 12 | 10 |
| | | | | BBTM 0/10 type1 | | | | |
| | | | | BBTM 0/10 type2 | | | | |
| | | | | BBTM 0/10 continu | | | | |
| | | | | BBSG 0/10 | | | | |

*Tableau III.13 : Description du site supplémentaire de Fontenay et matériaux utilisés*

Tous les échantillons d'enrobés, prélevés *in situ* et fabriqués en laboratoire, sont numérotés dans le Tableau III.14. Les caractéristiques des matériaux sont aussi présentées dans ce tableau.

| N° d'échantillon | Type de revêtement | Mode de fabrication | Fraction (mm) | Type de route | Site | N° de planche | Nature | PSV | LA | MDE | Compacité | P.C.G. (v%) | Teneur en liant (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | BBSG | Chantier | 0/10 | nationale | Angers | C | Spilite | 53 | 9 | 10 | | 11,21 | 5,70 |
| 2 | BBTM | Chantier | 0/10 | départementale | Clisson | D | Gabbro | 51 | 15 | 10 | | 17,17 | 5,40 |
| 3 | BBTM | Chantier | 0/6 | départementale | Coëx | B | Rhyolite | 55 | 15 | 9 | | 17,80 | 6,34 |
| 4 | BBTM | Chantier | 0/10 | nationale | Saint-Fulgent | Section F4 | Leptinite | 51 | 13 | 4 | | | 5,75 |
| 5 | BBTM | Chantier | 0/10 | nationale | Saint-Fulgent | Section F5 | Leptinite | 51 | 13 | 4 | | | 5,75 |
| 6 | BBTM | Chantier | 0/10 | nationale | Saint-Fulgent | Section F6 | Grès + Cornéenne quartzeuse | 61 | 13 | 14 | | | 5,55 |
| 7 | BBTM | Chantier | 0/10 | nationale | Saint-Fulgent | Section F7 | Leptinite | 51 | 13 | 4 | | | 5,85 |
| 8 | BBTM | Chantier | 0/10 | nationale | Saint-Fulgent | Section F8 | Grès + Cornéenne quartzeuse | 61 | 13 | 14 | | | 5,50 |
| 9 | BBDr | Chantier | 0/10 | nationale | Fontenay | Section B | Diorite | 50 | 12 | 10 | | | |
| 10 | BBTM type2 | Chantier | 0/10 | nationale | Fontenay | Section D | Diorite | 50 | 12 | 10 | | | |
| 11 | BBTM type1 | Chantier | 0/10 | nationale | Fontenay | Section E | Diorite | 50 | 12 | 10 | | | |
| 12 | BBTM continu | Chantier | 0/10 | nationale | Fontenay | Section F | Diorite | 50 | 12 | 10 | | | |
| 13 | BBSG | Chantier | 0/10 | nationale | Fontenay | Section G | Diorite | 50 | 12 | 10 | | | |
| 14 | BBTM | Laboratoire | 0/10 | - | - | A | Rhyolite | 56 | 15 | 9 | | | 5,91 |
| 15 | BBTM | Laboratoire | 0/6 | - | - | B | Rhyolite | 55 | 15 | 9 | 19,00 | | |
| 16 | BBSG | Laboratoire | 0/10 | - | - | C | Spilite | 53 | 9 | 10 | 6,50 | | |
| 17 | BBTM | Laboratoire | 0/10 | - | - | D | Gabbro | 51 | 15 | 10 | 18,00 | | |
| 18 | BBTM | Laboratoire | 0/10 | - | - | E | Diorite | 50 | 12 | 12 | 19,00 | | 5,55 |
| 19 | BBTM | Laboratoire | 0/10 | - | - | F | Leptinite | 49 | 15 | 4 | 19,00 | | 6,00 |
| 19+ | BBTM | Laboratoire | 0/10 | - | - | F | Leptinite | 49 | 15 | 4 | 19,00 | | 6,80 |
| 20 | BBTM | Laboratoire | 0/10 | - | - | G | Calcaire | 41 | 21 | 12 | 19,00 | | 5,84 |

*Tableau III.14 : Caractéristiques des enrobés utilisés*

## III.2.2 Échantillons confectionnés en laboratoire

### III.2.2.1 Description des échantillons

Pour prendre en compte la nature du granulat [149, 152], il est nécessaire d'effectuer des essais avec différents PSV. Cependant, la différence entre les valeurs de PSV des granulats des sites expérimentaux n'était pas assez nette (51, 53 et 55). Ainsi, des essais complémentaires sont proposés avec des granulats ayant une gamme de PSV plus allant de 41 à 56. Leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau III.15. Des échantillons de gravillons sont fabriqués selon la procédure indiquée dans la section III.2.2.3. Des essais de polissage sont ensuite conduits selon la procédure décrite dans le chapitre précédent.

| N° d'échantillon | Correspondant de N° d'échantillon d'enrobés | N° de planche | Nature | Fraction du granulat | PSV | LA | MDE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 21 | 14 | A | Rhyolite | 7,2/10 | 56 | 15 | 9 |
| 22 | 15 | B | Rhyolite | 4/6,3 | 55 | 15 | 9 |
| 23 | 16 | C | Spilite | 7,2/10 | 53 | 9 | 10 |
| 23+ | 16 | C | Spilite | >10 | 53 | 9 | 10 |
| 24 | 17 | D | Gabbro | 7,2/10 | 51 | 15 | 10 |
| 25 | 18 | E | Diorite | 7,2/10 | 50 | 12 | 12 |
| 26 | 19 | F | Leptinite | 7,2/10 | 49 | 15 | 4 |
| 27 | 20 | G | Calcaire | 7,2/10 | 41 | 21 | 12 |
| 28 | 8 | H | Grès + Cornéenne quartzeuse | 7,2/10 | 61 | 13 | 14 |

*Tableau III.15 : Caractéristiques des granulats utilisés en laboratoire*

### III.2.2.2 Confection des plaques d'enrobés

Le nombre de prélèvements d'échantillons d'enrobés *in situ* et la formulation du revêtement sont toujours limités. Pour varier les caractéristiques des revêtements, des plaques d'enrobés ont été confectionnées en laboratoire. Des plaques pour les sites d'Angers, Clisson et Coëx sont fabriquées en laboratoire, selon leurs formulations respectives sur route (cf. § III.2.1). Les autres plaques d'enrobés sont constituées d'un BBTM 0/10 discontinu 2/6. Les formulations d'enrobés sont détaillées dans les tableaux suivants.

| Composant | | | Origine (Carrière) | Pourcentage (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Granulats** | **Fraction** | 6/10 mm | Vairé | 69 |
| | | 0/2 mm | Vairé | 26 |
| | | filler | Airvault | 5 |
| **Liants** | **Classe** | Styrelf 11/40 | - | 5,91 ppc |

*Tableau III.16 : Composition de l'enrobé (échantillon d'enrobé N°14, granulat A)*

| Composant | | | Origine (Carrière) | Pourcentage (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Granulats** | **Fraction** | 6/10 mm | Noubleau | 70 |
| | | 0/2 mm | Noubleau | 26 |
| | | filler | Airvault | 4 |
| **Liants** | **Classe** | Styrelf 11/40 | - | 5,55 ppc |

*Tableau III.17 : Composition de l'enrobé (échantillon d'enrobé N°18, granulat E)*

| Composant | | | Origine (Carrière) | Pourcentage (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Granulats** | **Fraction** | 6/10 mm | Mouzinière | 69 |
| | | 0/2 mm | Mouzinière | 26,5 |
| | | filler | Airvault | 4,5 |
| **Liants** | **Classe** | Styrelf 11/40 | - | 6,00 ppc |

*Tableau III.18 : Composition de l'enrobé (échantillon d'enrobé N°19, granulat F)*

| Composant | | | Origine (Carrière) | Pourcentage (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Granulats** | **Fraction** | 6/10 mm | Châteaupanne | 65,5 |
| | | 5/8 mm | Châteaupanne | 4 |
| | | 0/2 mm | Châteaupanne | 27,5 |
| | | filler | Airvault | 3 |
| **Liants** | **Classe** | Styrelf 11/40 | - | 5,84 ppc |

*Tableau III.19 : Composition de l'enrobé (échantillon d'enrobé N°19, granulat G)*

Les carottes de laboratoire sont issues des plaques de dimensions 600 × 400 × 45 mm. Celles-ci avaient été fabriquées à l'aide d'un compacteur de plaques BBPAC [153] (cf. Figure III.10), à partir du mélange prélevé sur le chantier ou du mélange et du matériau d'épandage, conformément à la norme européenne NF EN 12697-33 [154]. Deux carottes d'un diamètre de 22,5 cm sont découpées dans chaque plaque.

*Figure III.10 : Compactage en laboratoire, matériel du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Centre de Nantes*

La méthode de compactage choisie part d'un volume spécifié : la masse du matériau employé est calculée de telle manière que la valeur cible, densité brute ou pourcentage de vides, pour un volume final fixé soit atteinte par une réduction progressive de l'épaisseur de la couche. La valeur cible a été choisie en fonction du pourcentage de vides. L'épaisseur finale de la couche choisie était de 40 mm. Cette épaisseur d'échantillon, atteinte directement après le carottage, convient au montage sur la machine Wehner et Schulze.

La température de fabrication est fixée en fonction des conditions de fabrication chantier : 160°C pour le BBSG 0/10 et 175°C pour le BBTM 0/10. Dans le but d'obtenir des caractéristiques de surface qui soient les plus fidèle possibles à celles du chantier, le choix s'est opéré entre un compactage avec un rouleau lisse ou avec des pneumatiques, qui a été fait en fonction de la composition des ateliers de compactage propre à chaque site.

Pour le BBTM 0/10, on a donc employé un rouleau lisse à axe bloqué. L'épandage pour les échantillons du mélange a été effectué à la main après la quatrième étape de compactage avec du gravillon préchauffé à 100°C. Dans le cas du BBSG 0/10, pour lequel le compactage s'effectue sur le chantier avec un rouleau à pneus gonflés, un compromis a été choisi entre le compactage avec des pneus, dont on sait par expérience qu'il ne produit pas un état réaliste de la surface, et le compactage avec un rouleau lisse, avec lequel il est difficile d'atteindre des taux de compactage élevés (pas d'effet de malaxage comme avec les pneus). Une première plaque a été compactée avec un rouleau lisse. Le taux de compactage visé n'a pas pu être atteint. Le procédé de compactage a donc été adapté pour les autres plaques : on procède d'abord à un fort compactage avec des pneus à axe libre pour atteindre le taux de compactage. Puis, on aplanit avec le rouleau lisse à axe bloqué afin d'obtenir une surface représentative.

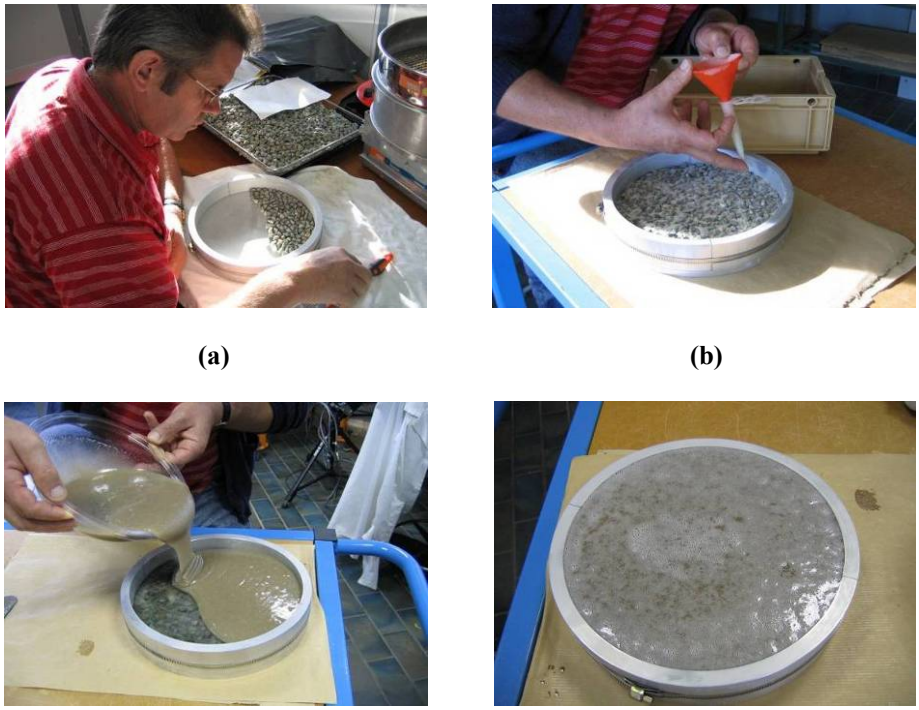
### III.2.2.3 Fabrication des galettes de granulats

Pour étudier l'effet des granulats, des galettes de granulats sont rajoutées aux différents échantillons. Leurs caractéristiques ont déjà été données dans le Tableau III.15. Un échantillon d'enrobé prélevé *in situ* (cf. Figure III.11a) et un échantillon composé avec le même granulat (cf. Figure III.11b) permettent d'analyser le rôle du granulat.

**(a) Carotte de mélanges bitumineux** **(b) Galette de gravillons**

*Figure III.11 : Échantillons de diamètre de 22,5 cm pour la machine Wehner et Schulze*

D'abord, les granulats sont tamisés par fractions. Les trois fractions sont choisies : < 7,2 ; 7,2/10 ; > 10 pour le revêtement 0/10 ; < 4 ; 4/6,3 ; > 6,3 pour le revêtement 0/6. Les échantillons de gravillons sont fabriqués par fraction : 7,2/10 pour l'échantillon de granulats 0/10 et 4/6,3 pour l'échantillon de granulats 0/6. Le processus de fabrication est illustré à la Figure III.12.



**(a)** **(b)**

**(c)** **(d)**

*Figure III.12 : Processus de la fabrication d'un échantillon de gravillons*

*(a) Mise en place des granulats dans un moule ; (b) Remplissage des interstices entre les grains avec du sable ; (c) Remplissage du moule avec de la résine ; (d) Durcissement de la résine et obtention de l'échantillon.*

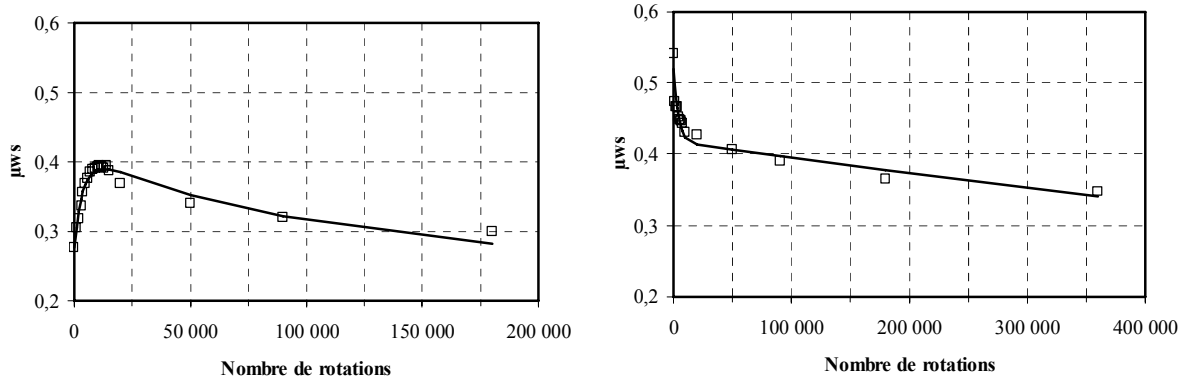
Avant de déposer le granulat, il faut enduire une couche d'huile pour éviter le collage. Comme dans l'essai normalisé GRAP, on place manuellement les gravillons en une

couche, aussi près les uns des autres que possible, avec leur face la plus plane contre le fond d'un moule circulaire de 22,5 cm de diamètre. L'objectif visé est d'avoir le minimum de 'trous' (vides) entre les granulats ou autrement dit avoir les granulats les plus jointifs possibles (l'état plus serré). Comme la colle pénètre entre les grains et risquerait de modifier l'état de surface de l'échantillon, du sable de 'Fontainebleau' est versé préalablement dans les interstices entre les grains. Ensuite, le mélange avec de la résine de stratification est mis en œuvre dans le moule. Dans notre étude, le rapport entre les composants de la résine : durcisseur « Ren HY 956 » ; adhésif « RenLam MS-1 » et sable de Fontainebleau est de 1 : 5 : 13,33. En pratique, cette quantité remplit précisément le reste du moule. Enfin, on enlève tout excès de résine sur les bords du moule. Lorsque la prise de la résine est terminée, on polit la surface de la résine et on retire l'échantillon du moule.

## III.3 Validation de la procédure d'essai LCPC

### III.3.1 Comparaison des différentes évolutions de l'adhérence des échantillons d'enrobés

Les évolutions de l'adhérence des échantillons d'enrobés prélevés *in situ* sont montrées à la Figure III.13. Si l'on observe cette figure, nous constatons que les courbes d'évolution de l'adhérence sont différentes, suivant la nature des échantillons. Sur la première courbe (cf. Figure III.13a), elle croît, dans un premier temps, jusqu'à une valeur maximale, puis, elle décroît avec le nombre de rotations jusqu'à atteindre une valeur limite. Si l'on considère la deuxième courbe (cf. Figure III.13b), le coefficient de frottement décroît toujours avec le nombre de rotations. Cette différence entre les deux courbes peut être expliquée par le décapage du liant. Dans le premier cas, l'échantillon est prélevé juste après la construction. Les grains sont enveloppés par le liant neuf. Ceci amène un coefficient de frottement faible à l'état initial. Avec le polissage, l'importance du coefficient de frottement des granulats est de plus en plus évidente. Une fois le liant décapé, le coefficient de frottement décroît. Dans le deuxième cas, l'échantillon est prélevé après six années de trafic. A l'état initial, nous avons la valeur maximale du coefficient de frottement. L'évolution de cet échantillon est différente que celle du premier. Nous supposons que le liant a déjà été décapé par les effets climatiques. Ceci donne une courbe décroissante d'évolution de l'adhérence.




**(a) Échantillon prélevé juste après la construction** **(b) Échantillon prélevé après six années de trafic**

*Figure III.13 : Évolutions de l'adhérence des échantillons d'enrobés*

### III.3.2 Comparaison des frottements $\mu_{ws}/\mu_{SRT}$

Les résultats des essais normalisés et des essais Wehner et Schulze sont comparés. La relation entre le frottement $\mu_{SRT}$ et le frottement $\mu_{ws}$ est d'abord montrée à la Figure III.14. Il faut rappeler que chaque point du graphique représente une mesure à un stade de polissage donné. 64 points pour 16 échantillons de mélanges bitumineux à quatre stades de polissage différents sont portés sur la Figure III.14. Nous constatons qu'il y a une bonne corrélation entre ces deux mesures, bien que la vitesse correspondant à chaque essai soit différente (15 km/h pour l'essai SRT, 60 km/h pour l'essai Wehner et Schulze). Nous validons ainsi les futures mesures faites à l'aide de la machine WS.

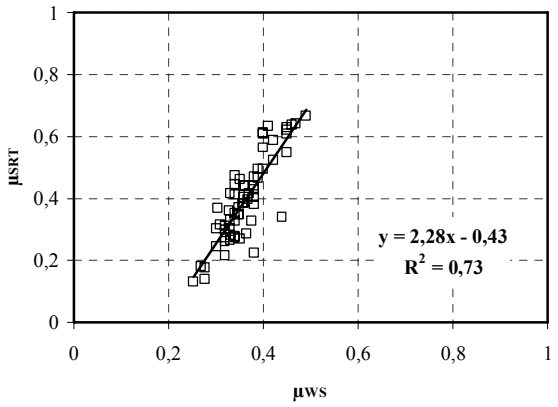



*Figure III.14 : Relation entre les frottements $\mu_{ws}$ et $\mu_{SRT}$*

### III.3.3 Comparaison des frottements $\mu_{ws}/\mu_{RPA}$

Pour obtenir la relation entre les résultats issus de la machine WS et l'essai normalisé RPA, des échantillons avec quatre granulats complémentaires sont confectionnés. Pour chaque granulat, quatre échantillons avec les fractions 6/8, 8/10, 10/12 et 12/14 sont utilisés. Dans notre étude comparative, nous avons choisi la mesure RPA de la fraction 8/10 et la mesure WS du granulat de la fraction 7,2/10. Il faut rappeler que les mesures de frottement sont effectuées par le pendule SRT pour les échantillons RPA. Les comparaisons entre $\mu_{RPA}$ à 20 cycles et $\mu_{ws}$ à 180 000 rotations de polissage, et entre $\mu_{RPA}$ initial et $\mu_{ws}$ initial, sont montrées à la Figure III.15. A partir de cette figure, une relation linéaire entre les frottements RPA et WS apparaît peu à peu.

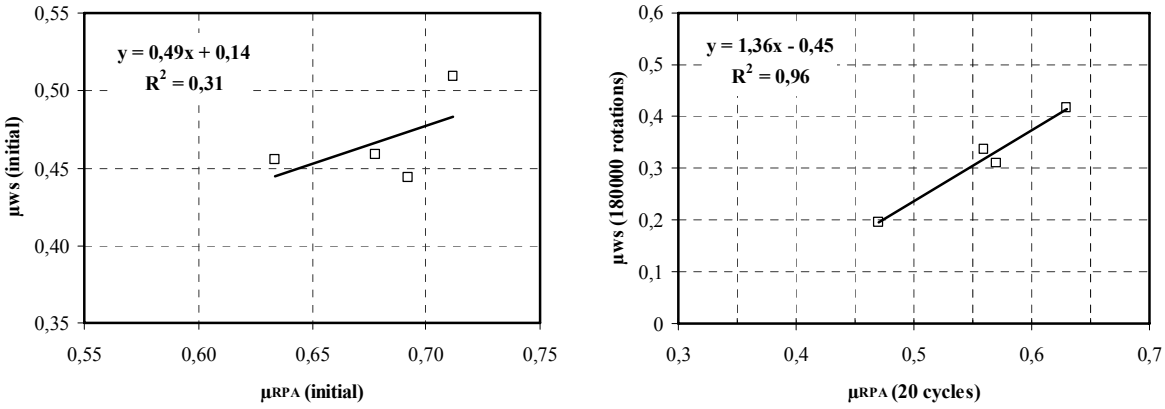



*Figure III.15 : Relation entre les frottements $\mu_{ws}$ et $\mu_{RPA}$*

### III.3.4 Comparaison entre l'essai LCPC et l'évolution réelle du frottement

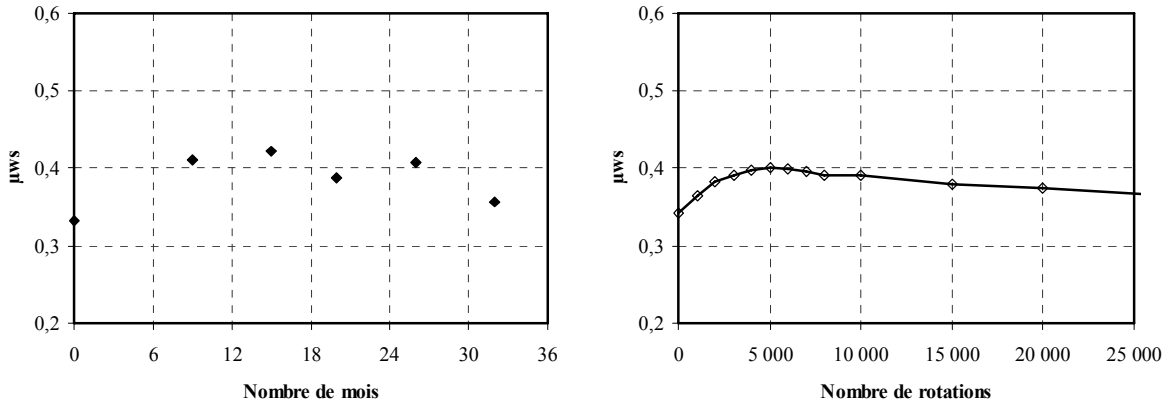
Il s'agit de l'étape la plus importante, qui est souvent absente dans les travaux antérieurs. Les courbes d'évolution pour les trois sites expérimentaux étudiés sont montrées sur la gauche de la Figure III.16. Les valeurs sont obtenues par des mesures de frottement avec la machine WS sur des carottes prélevées dans la bande de roulement. Les évolutions simulées pour les mêmes routes, obtenues par polissage des carottes prélevées juste après la construction, sont montrées sur la droite de la même figure. Les courbes simulées et observées ont pour point commun la valeur à 0. Les courbes simulées sont tronquées à 25 000 rotations.

Nous pouvons constater certaines similitudes entre la simulation et la réalité :

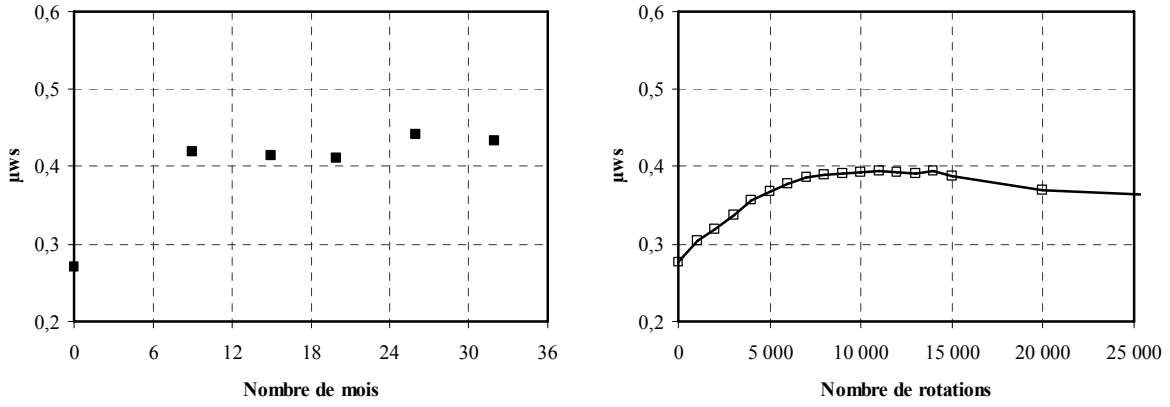
- le frottement augmente dans les deux cas jusqu'à atteindre une valeur stabilisée. Pour le moment, nous ne constatons pas encore de décroissance du frottement des routes circulées, sauf pour le BBSG ;

- l'adhérence maximale atteinte sur les routes circulées est très proche de celle obtenue par simulation (environ 0,4 pour le BBSG et BBTM 0/10, et 0,5 pour le BBTM 0/6) ;
- les simulations montrent une nette transition entre la phase de décapage et le reste de l'évolution pour les BBTM, alors que cette transition est moins nette pour le BBSG. Cette différence se retrouve sur l'évolution des routes circulées.

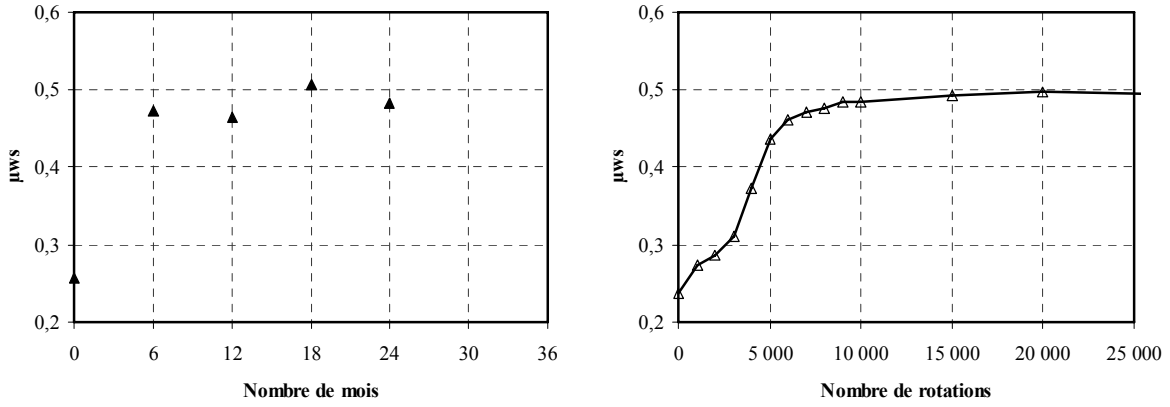
Si cette tendance se confirme, elle apportera une preuve supplémentaire de la capacité de la machine WS à reproduire le polissage du trafic. Cependant, il faudra attendre les prochains points de mesure pour confirmer ces tendances. Cette attente est motivée par le fait que des mesures effectuées sur des échantillons non circulées montrent une croissance continue du frottement due à l'effet du vieillissement ; or, cet effet est assez important au début de la mise en service de l'enrobé, et n'est pas *a priori* reproduit dans la simulation de laboratoire.




**(a) Site d'Angers (BBSG 0/10)**




**(b) Site de Clisson (BBTM 0/10)**




**(c) Site de Coëx (BBTM 0/6)**

*Figure III.16 : Évolutions de frottement des chaussées par le trafic – comparaison avec les simulations*

*A gauche : évolution de frottement des chaussées par le trafic in situ ; A droite : évolution de frottement de simulation en laboratoire.*

## III.4 Synthèse sur le développement d'un essai de polissage

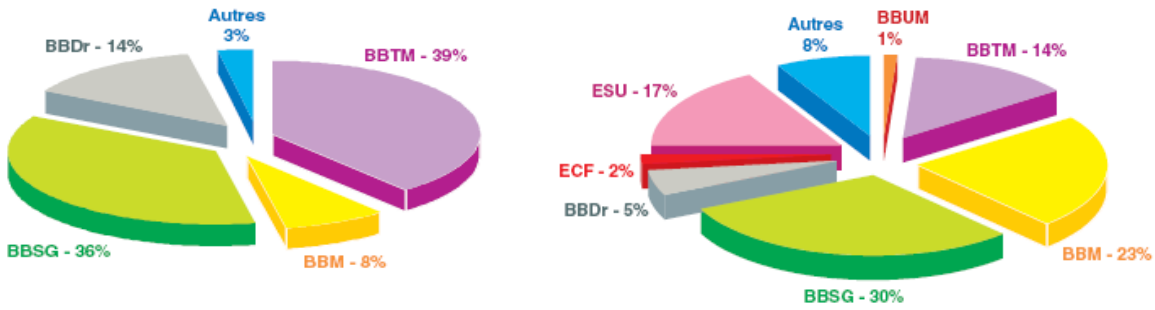
La procédure LCPC est développée pour obtenir une courbe de l'évolution du frottement par simulation du trafic en laboratoire. Grâce à la machine Wehner et Schulze, la simulation de l'évolution de l'adhérence en laboratoire peut être suivie. A partir des résultats obtenus, les évolutions réelle et simulée sont très proches. Pour les trois sites suivis pendant un peu plus de deux années, la simulation du polissage par la machine Wehner et Schulze reflète bien la variation de l'adhérence sous l'action du trafic.

A l'aide de la machine Wehner et Schulze et la procédure LCPC, les essais en laboratoire pour les différents types de revêtement et les différents granulats peuvent donc s'effectuer.

# IV Étude de l'évolution de l'adhérence en fonction de la formulation des enrobés bitumineux

L'adhérence, comme propriété prioritaire d'une couche de roulement est une démarche très récente. Dans la méthode française de formulation des enrobés, l'objectif « adhérence » est présent, mais se trouve encore placé en arrière plan. Le comportement mécanique de l'enrobé est bien appréhendé en laboratoire mais, pour l'adhérence, le concepteur est contraint d'utiliser des méthodes empiriques dans le choix *a priori* d'une famille d'enrobés, qui se traduisent par des spécifications concernant la dimension supérieure et la nature des granulats, la courbe granulométrique, la teneur en liant et le compactage.

La majorité des routes françaises est composée de BBTM et BBSG : 75 % des autoroutes et 44% des routes nationales (cf. Figure IV.1). C'est la raison pour laquelle, nous allons nous intéresser particulièrement à ces deux familles d'enrobés.




**(a) Autoroutes concédées (9500km)** **(b) Routes nationales (28000km)**

*Figure IV.1 : Répartition des revêtements [155]*

Dans ce chapitre, l'influence de la famille des enrobés et leurs constituants sera analysée sur les échantillons du Tableau III.14. Cependant, les échantillons des chaussées seront nécessairement en nombre limité, compte tenu du coût des essais nécessaires à leur suivi. Le suivi des chantiers de construction est donc complété par un plan d'expérience en laboratoire, afin d'établir la relation entre des paramètres du modèle d'évolution et des caractéristiques de matériaux, sur la base d'un nombre plus important de formules de matériaux routiers. Le Tableau III.14 rassemble tous les échantillons d'enrobés utilisés : prélevés *in situ* et fabriqués en laboratoire. Pour analyser le rôle des granulats, les échantillons de gravillons sont fabriqués en laboratoire. Ils sont composés des mêmes granulats que les échantillons d'enrobés fabriqués en laboratoire (cf. Tableau III.15).

## IV.1 Rôle des granulats

Pour évaluer l'influence de l'enrobage des granulats par le liant bitumineux sur les propriétés d'adhérence, des mesures de frottement WS sont réalisées sur des échantillons composés uniquement de gravillons collés sur une plaque support. Ces types d'échantillons seront nommés « galette » par la suite. Les carottes des mélanges bitumineux sont prélevées sur les trois sites expérimentaux. La fraction et la nature des granulats utilisés pour confectionner les galettes (échantillons N°22, N°23 et N°24) et les enrobés (échantillons N°1, N°2 et N°3) sont consignées dans le Tableau III.14 et le Tableau III.15.

La Figure IV.2 montre l'évolution de l'adhérence des carottes et enrobés confectionnés avec le même granulat et soumis au polissage de la machine WS. Rappelons qu'un cycle de polissage correspond à une rotation de la machine WS.

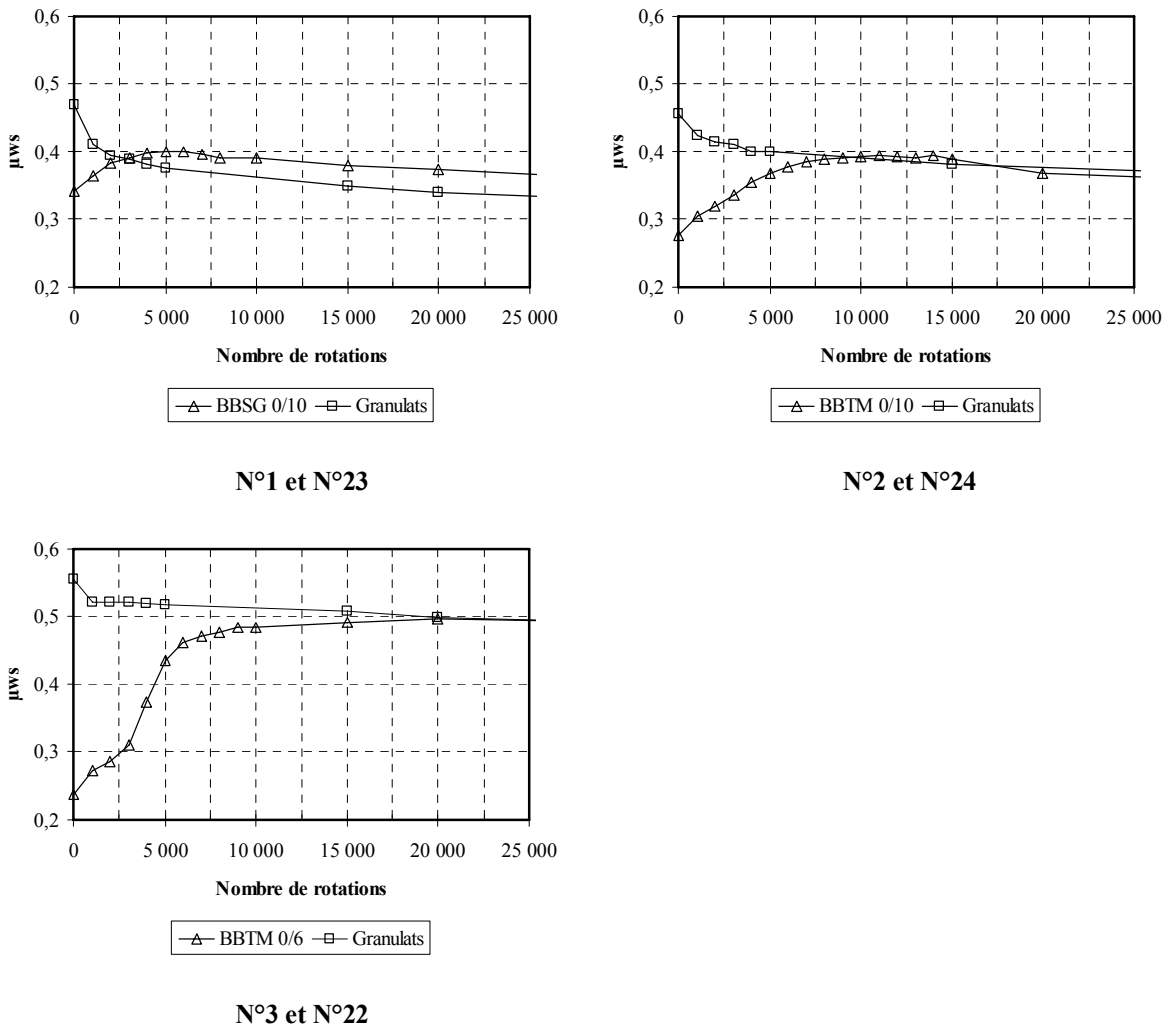



*Figure IV.2 : Évolutions de l'adhérence des échantillons d'enrobés prélevés in situ et de gravillons*

Nous distinguons deux parties sur la courbe d'évolution des enrobés : le frottement commence par croître jusqu'à une valeur maximale, puis décroît [156]. La première partie

*i.e.* la partie montante de la courbe d'évolution correspondant au décapage du liant et la deuxième partie au polissage des granulats. La courbe d'évolution des galettes de granulats, quant à elle, part d'une valeur maximale puis décroît progressivement.

L'aspect le plus intéressant à noter est le croisement entre les deux courbes au maximum de la courbe du mélange bitumineux et la quasi-superposition de ces deux courbes à partir de ce point. Elle peut s'expliquer par le fait que lorsque le liant est complètement décapé, ce sont essentiellement les granulats qui sont exposés au trafic ; il est donc logique que le mélange bitumineux se comporte ensuite comme des gravillons. L'évolution de l'adhérence d'un mélange après la phase de décapage est donc contrôlée par celle des granulats.

Il est souvent dit que les granulats d'un mélange bitumineux retrouvaient leur microtexture initiale après le décapage du liant. Les résultats de la Figure IV.2 montrent que ce n'est pas le cas. En effet, le maximum de l'adhérence du mélange bitumineux est inférieur à l'adhérence initiale de l'éprouvette de granulats, montrant ainsi, que pendant le décapage du liant, le polissage agit déjà sur la microtexture des granulats.

Les comparaisons entre les carottes d'enrobés fabriquées en laboratoire (échantillons N°15-17, cf. Tableau III.14) et les galettes de gravillons (échantillons N°22-24, cf. Tableau III.15) sont montrées à la Figure IV.3. Pour les échantillons de BBTM, on retrouve les mêmes observations que celles formulées pour échantillons *in situ* : les courbes d'évolution enrobé/granulats se confondent après le décapage du liant. Pour le BBSG, une différence évidente entre les deux courbes après le décapage peut être observée à la Figure IV.3. Pour le moment, il n'y a pas d'explication satisfaisante liée à cette observation. La différence avec l'observation faite sur des échantillons *in situ* serait liée au mode de fabrication des échantillons.

En résumé, le granulat joue un rôle important dans l'évolution de l'adhérence. L'étude montre que la décroissante de la courbe de l'adhérence est principalement liée au polissage du granulat.

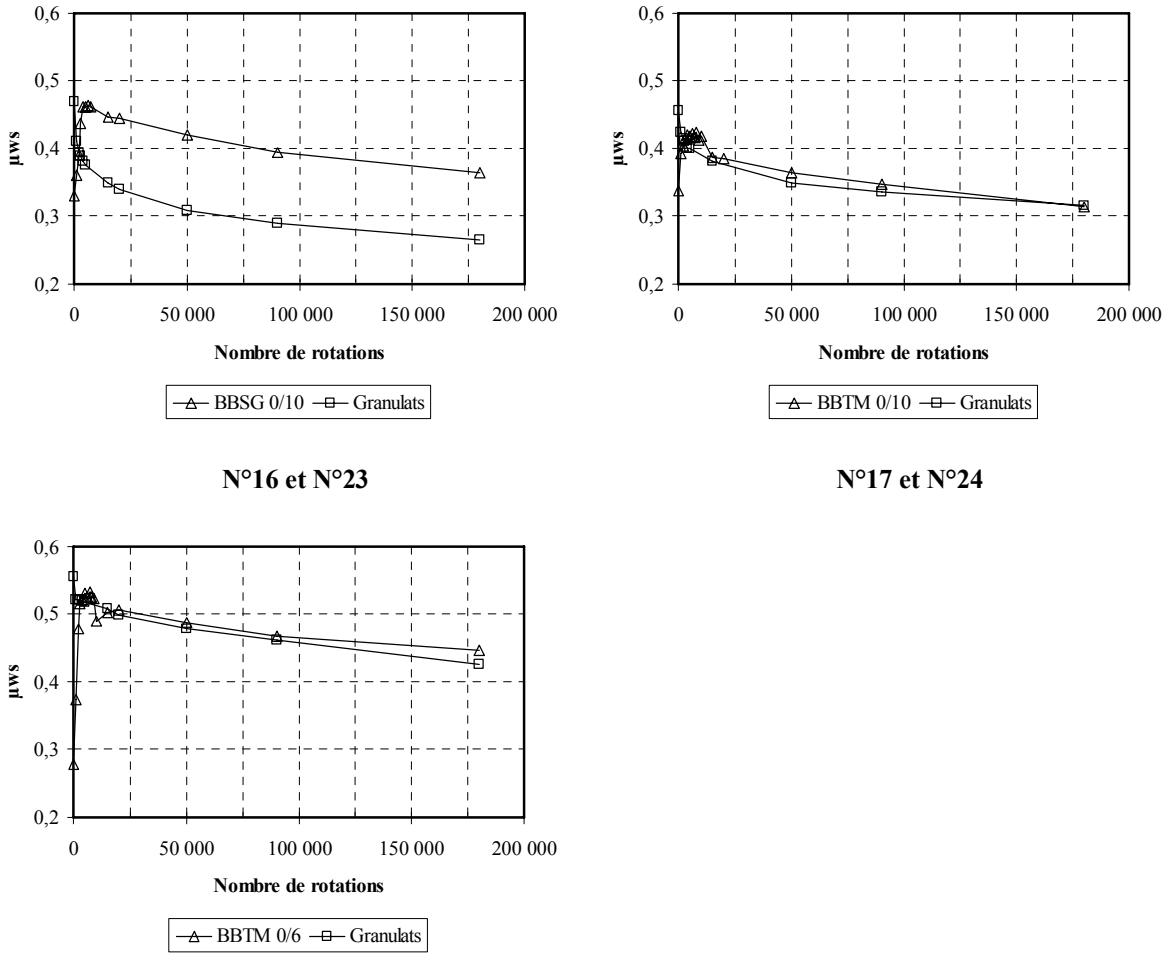



*Figure IV.3 : Évolutions de l'adhérence des échantillons d'enrobés fabriqués en laboratoire et de gravillons*

## IV.2 Influence du PSV des granulats

La formulation et la granularité, comme nous l'avons observé aux chapitres précédents, jouent un rôle important par rapport à l'adhérence. Cependant, pour le maintien de cette adhérence avec le trafic, la nature de la roche joue un rôle primordial. Pour étudier l'influence de la nature du granulat, nous avons sélectionné six granulats de natures différentes classés suivant leur PSV [136]. Pour tous ces granulats, la fraction étudiée est la 7,2/10 mm (sauf N°22, cf. Tableau III.15). Pour exclure l'effet du bitume, des galettes sont confectionnées au laboratoire (cf. § III.2.2.3). La Figure IV.4 montre l'évolution de l'adhérence des différentes galettes soumises au polissage de la machine WS.

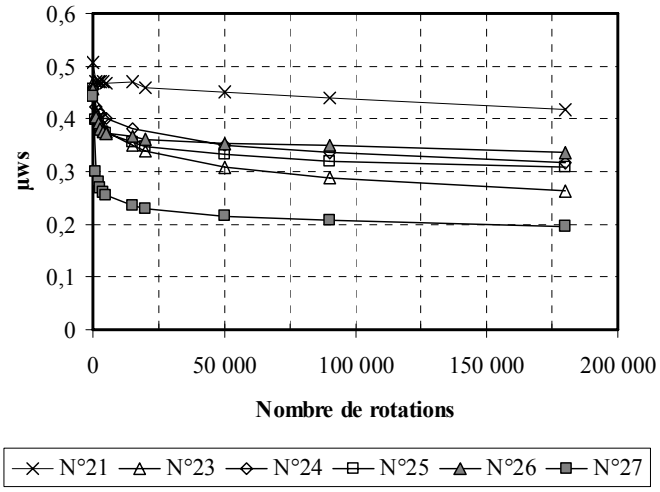



*Figure IV.4 : Évolutions de l'adhérence des six galettes de fraction 7,2/10 fabriquées en laboratoire : effet du PSV*

Trois groupes de courbes d'évolution peuvent être distingués par rapport à la valeur de leur PSV. Le premier groupe est composé de l'échantillon N°27 avec un PSV très faible à 41, le deuxième groupe est composé de quatre granulats (échantillons N°23 – 26, cf. Tableau III.15) avec un PSV moyen compris entre 49 et 53 où la différence entre les valeurs de PSV se trouve presque noyée dans l'incertitude de la mesure au pendule SRT, le troisième est composé d'un seul échantillon N°21 avec un PSV de 56 que l'on peut qualifier d'élevé par rapport aux autres granulats à l'étude.

La Figure IV.5 donne la tendance de la répartition des valeurs de l'adhérence en fonction du PSV à 90 000 rotations de polissage par la machine WS.

A ce stade, on est tenté de voir comment des valeurs de frottement obtenues sur la machine WS, désignées par « $\mu_{ws}$ », peuvent être reliées au PSV [149]. Une corrélation entre $\mu_{ws}$ et le PSV est obtenue après 90 000 rotations. Nous voyons que $\mu_{ws}$ est relativement bien corrélé avec le PSV. Sur cet exemple précis, la tendance trouvée est :

$$\mu_{WS} = 1{,}27\frac{PSV}{100} - 0{,}31 \quad \left(R^2 = 0{,}71\right) \qquad \text{(IV.1)}$$

Cette relation confirme le fait qu'une faible variation du PSV se traduit par une plus forte variation du $\mu_{ws}$. Une relation équivalente est obtenue entre $\mu_{ws}$ à 180 000 rotations et le PSV :

$$\mu_{WS} = 1{,}18\frac{PSV}{100} - 0{,}29 \quad \left(R^2 = 0{,}66\right) \qquad \text{(IV.2)}$$

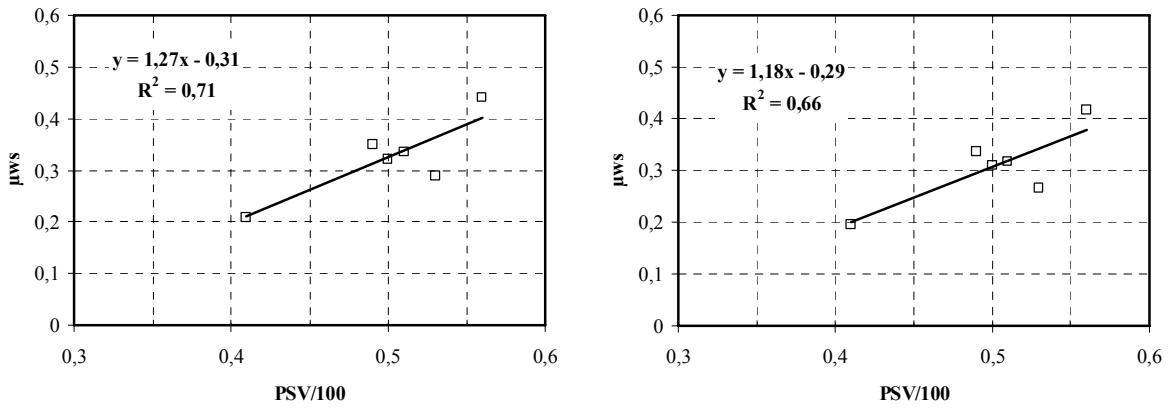



*Figure IV.5 : Relation entre le coefficient de frottement Wehner et Schulze des échantillons de gravillons et le PSV à 90 000 et 180 000 rotations*

Cette même étude est reprise sur des enrobés confectionnés en laboratoire. Les caractéristiques de ces enrobés sont consignées sur le Tableau III.14 (échantillons N°14, N°17 – 20). Tous les enrobés sont de type BBTM 0/10 avec les mêmes granulats cités plus haut (nous avons conservé les mêmes noms).

Les courbes d'évolution de l'adhérence de ces enrobés sont montrées à la Figure IV.6. Nous observons un classement des courbes d'évolution au niveau de frottement. Nous remarquons que classement est fortement lié au PSV. C'est une confirmation des précédents résultats. La différence des courbes d'évolution entre l'enrobé N°20 et les autres enrobés est logique. En effet, le granulat utilisé pour l'enrobé N°20 est un calcaire, qui se polit rapidement par rapport aux autres granulats (échantillon N°27 de la Figure IV.4). Cependant, la différence entre les courbes « enrobé » paraît un peu élevée, comparée à la différence entre les courbes « granulats ».

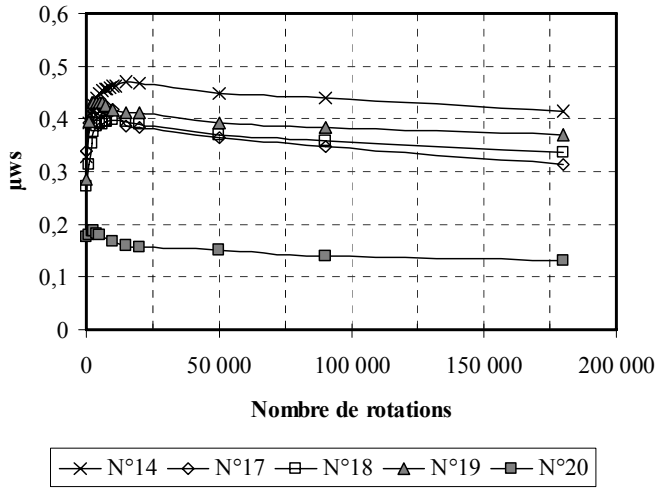



*Figure IV.6 : Évolutions de l'adhérence des cinq bétons bitumineux BBTM 0/10 (échantillons N°14, N°17 – 20) fabriqués en laboratoire : effet du PSV*

Les mêmes observations faites précédemment sur les galettes peuvent à nouveau être faites sur les enrobés. Nous voyons que $\mu_{ws}$ est bien corrélé avec le PSV. Sur cet exemple précis, la tendance trouvée à 90 000 rotations de polissage avec la machine WS est montrée dans la Figure IV.7. Là encore, on constate que les écarts en termes de $\mu_{WS}$ sont amplifiés, par rapport aux écarts en PSV. Ainsi, une extrapolation de la droite de régression montre que le fait de passer d'un PSV de 50 à un PSV de 60 fait passer le $\mu_{ws}$ de 0,35 à 0,55.

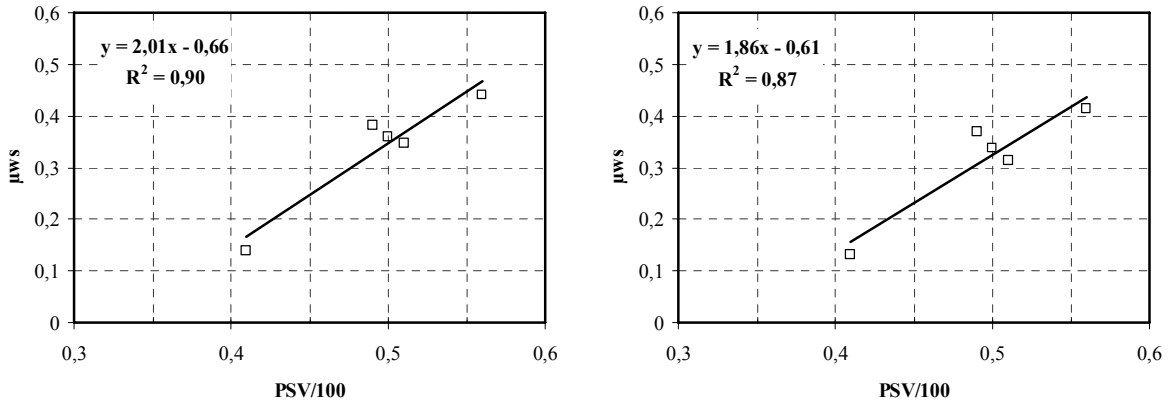
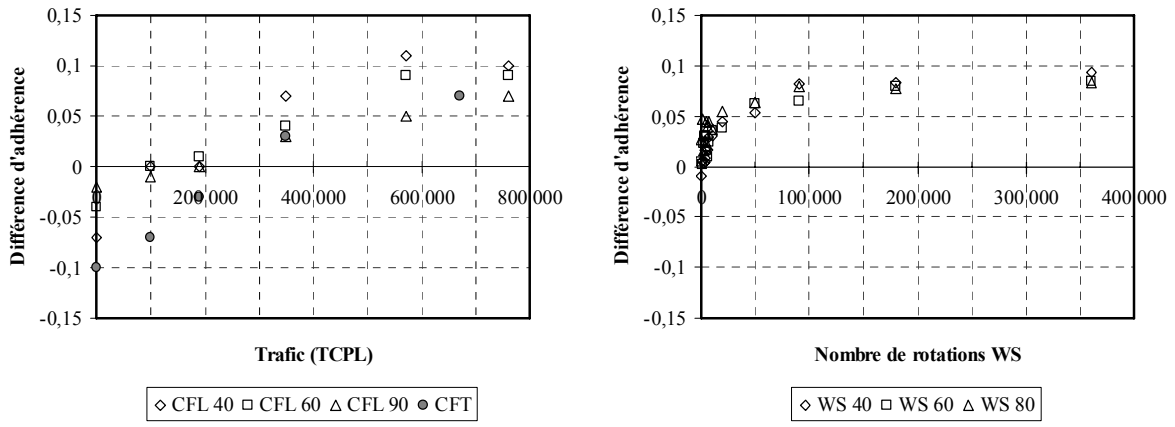



*Figure IV.7 : Relation entre le coefficient de frottement $\mu_{WS}$ des échantillons d'enrobés et le PSV à 90 000 et 180 000 rotations*

En résumé, le principal enseignement que nous pouvons tirer est que les enrobés avec un granulat à fort PSV offrent systématiquement une bien meilleure adhérence après plusieurs années de trafic. En revanche, les variations en termes de LA et MDE n'ont pas d'effet évident dans la gamme des granulats testés, par rapport à l'évolution de l'adhérence.

Les deux revêtements considérés dans la suite sont différents dans leur constitution. L'un est constitué de granulats à fort PSV et l'autre de granulats à PSV moyen. Dans les planches expérimentales du site de Saint-Fulgent (échantillons N°4 et N°8, cf. Tableau III.14, page 84), les granulats de Garenne ont un fort PSV (61). En revanche, les granulats à Mouzinière n'ont qu'un PSV moyen (51).

Le principal enseignement de ces planches est qu'après plusieurs années de trafic, les sections construites avec des granulats à fortes résistances au polissage offrent systématiquement une meilleure adhérence que les autres. Ce même phénomène est constaté en laboratoire et *in situ* (cf. Figure IV.8). Les différences d'adhérence à haute vitesse de mesure sont plus élevées que celles à basse vitesse de mesure au début du polissage. Au-delà d'un certain nombre de cycles de polissage, la hiérarchie s'inverse, et la différence d'adhérence est moins marquée à haute vitesse qu'à basse vitesse.




**(a) *in situ*** **(b) en laboratoire**

*Figure IV.8 : Différence d'adhérence entre les échantillons d'enrobés avec des granulats à fort PSV (Garenne) et des granulats à PSV moyen (Mouzinière)*

Un autre enseignement est exprimé dans les tableaux suivants (cf. Tableau IV.1 et Tableau IV.2). Nous constatons qu'il n'y pas de grande différence entre les granulats à PSV moyen et les granulats à fort PSV pour les fractions les plus fines de gravillons. L'effet des sables et des petits gravillons à la résistance au polissage peut être négligeable. Plus le PSV choisi dans la fraction la plus grossière est élevé, plus la résistance au polissage est conservée.

| Section | $\mu_{ws}$ à 40km/h | | | $\mu_{ws}$ à 60km/h | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **μ à 3,6×10$^5$ rotations de polissage** | **Gain vis-à-vis du témoin 1 × 100** | $\frac{Gain}{\mu_{témoin1}}$ | **μ à 3,6×10$^5$ rotations de polissage** | **Gain vis-à-vis du témoin 1 × 100** | $\frac{Gain}{\mu_{témoin1}}$ |
| **Témoin 1 BBTM 0/10 tout Mouzinière** | 0,39 | | | 0,35 | | |
| **BBTM 0/10 dont 0/2 Garenne** | 0,39 | 0 | 0 | 0,35 | 0 | 0 |
| **BBTM 0/10 dont 2/6 Garenne** | 0,40 | 1 | 3 | 0,35 | 0 | 0 |
| **BBTM 0/10 dont 6/10 Garenne** | 0,45 | 6 | 15 | 0,42 | 7 | 20 |
| **Témoin 2 BBTM 0/10 tout Garenne** | 0,49 | 10 | 26 | 0,44 | 9 | 26 |

*Tableau IV.1 : Effet sur l'adhérence de l'apport d'un granulat à fort PSV dans les différentes fractions granulométriques d'un BBTM 0/10 (planche du site de Saint-Fulgent, mesures en laboratoire)*

| Section | CFL 40 | | | CFT | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **μ à 7,6×10$^5$ de trafic** | **Gain vis-à-vis du témoin 1 × 100** | $\frac{Gain}{\mu_{témoin1}}$ | **μ à 7,6×10$^5$ de trafic** | **Gain vis-à-vis du témoin 1 × 100** | $\frac{Gain}{\mu_{témoin1}}$ |
| **Témoin 1 BBTM 0/10 tout Mouzinière** | 0,51 | | | 0,60 | | |
| **BBTM 0/10 dont 0/2 Garenne** | 0,51 | 0 | 0 | 0,60 | 0 | 0 |
| **BBTM 0/10 dont 2/6 Garenne** | 0,53 | 2 | 4 | 0,62 | 2 | 3 |
| **BBTM 0/10 dont 6/10 Garenne** | 0,60 | 9 | 18 | 0,66 | 6 | 10 |
| **Témoin 2 BBTM 0/10 tout Garenne** | 0,61 | 10 | 20 | 0,67 | 7 | 12 |

*Tableau IV.2 : Effet sur l'adhérence de l'apport d'un granulat à fort PSV dans les différentes fractions granulométriques d'un BBTM 0/10 (planche du site de Saint-Fulgent), mesures in situ [110]*

A partir des tableaux et la Figure IV.8, nous montrons que les essais en laboratoire par la machine Wehner et Schulze peuvent fournir les mêmes résultats que les essais *in situ* [110]. Cependant, les résultats des essais *in situ* (CFL et CFT) sont effectués après six années de trafic. L'essai WS en laboratoire a besoin de quatre heures pour avoir les mêmes résultats : gain de l'adhérence, évolution de l'adhérence en fonction de la vitesse, influence du PSV, etc. La machine WS est donc un moyen d'essai efficace pour la simulation du trafic et la mesure du frottement en laboratoire.

## IV.3 Influence du calibre D des granulats

Le calibre « D » d'un enrobé est la taille maximale des granulats utilisés pour fabriquer cet enrobé. Ce paramètre conditionne le nombre d'arêtes par unité de surface en contact avec le pneumatique. Les valeurs les plus couramment utilisées sont 6, 10 ou 14 mm. Pour étudier ainsi l'influence de la valeur D, nous avons confectionné en laboratoire deux enrobés de type BBTM avec deux valeurs de D : 6 et 10 mm, dont la composition est celle des échantillons N°14 et N°15 du Tableau III.14.

La Figure IV.9 montre l'évolution de l'adhérence de ces deux enrobés soumis au polissage de la machine WS en fonction du nombre de rotations de polissage.

Au départ, les deux enrobés ont des valeurs d'adhérence semblables. Après 2 000 rotations, le BBTM 0/6 passe au dessus du BBTM 0/10 tout en restant moins stable. Les maxima d'adhérence correspondent à peu près au même nombre de rotations de polissage pour les deux revêtements. Ensuite, le BBTM 0/6 reste toujours au dessus du 0/10. Ce résultat, prévisible et connu des ingénieurs routiers, est reproduit ici par la machine d'essais.

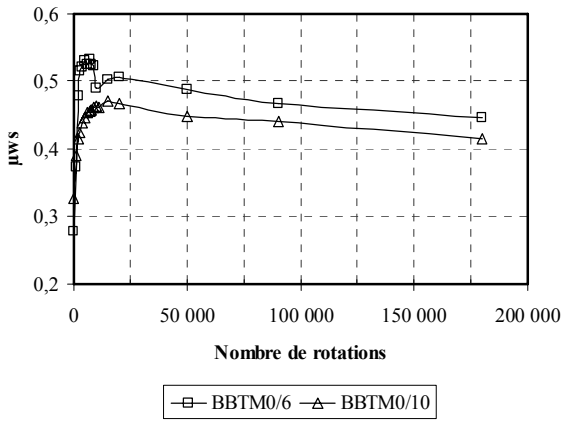



*Figure IV.9 : Évolutions de l'adhérence d'un BBTM 0/6 (N°15) et 0/10 (N°14) fabriqués en laboratoire : effet de la dimension de D*

## IV.4 Influence croisée du PSV et de la granulométrie

Dans cette section, nous essayons d'estimer l'importance du PSV par rapport à celle de la granulométrie. Nous avons constaté précédemment l'importance de ces deux paramètres.

Pour cela, cinq revêtements en BBTM 0/10 (échantillons N°4 – 8, cf. Tableau III.14) avec un mélange de deux granulats de natures différentes provenant de deux carrières (Garenne avec un PSV de 61 et Mouzinière avec PSV de 51) à différentes fractions, sont mis en place successivement sur la route nationale 4 située à Saint-Fulgent. Le schéma suivant montre les compositions granulométriques des cinq planches expérimentales :

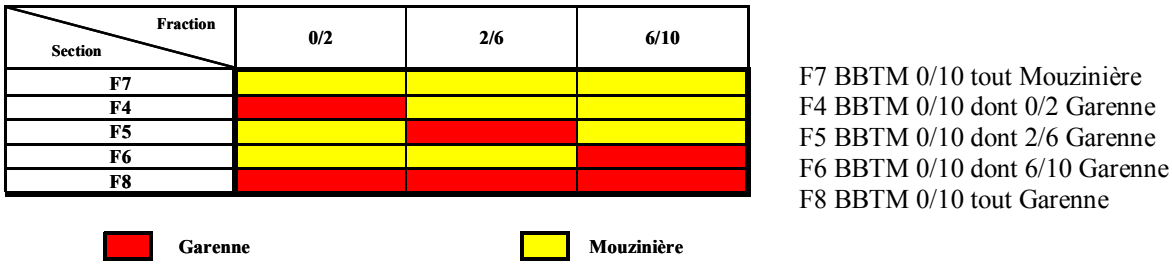



*Figure IV.10 : Schéma des compositions sur le site de Saint-Fulgent (sections F4 à F8 notés respectivement N°4 à 8 dans le Tableau III.14)*

Une carotte est prélevée sur chaque planche et polie avec la machine WS. La Figure IV.11 montre l'évolution de l'adhérence de ces cinq revêtements en fonction du nombre de rotations de polissage.

Deux groupes de courbes d'évolution se détachent, le premier d'amplitude de variation plus faible est composé de F6 et F8 et le second, de F4, F5 et F7.

Le premier enseignement que nous pouvons tirer de ces observations est que le maintien d'un niveau d'adhérence est principalement lié au PSV de la fraction la plus grossière des gravillons, comme déjà vu dans la section IV.2. En d'autres termes, c'est la plus grosse fraction qui impose son comportement. C'est le cas du F6 qui a une fraction de 6/10 mm de Garenne et 0/6 mm de Mouzinière, mais qui se comporte comme le F8 composé de granulats 0/10 mm de Garenne. Le même constat est fait avec F4 et F5, qui ont tous les deux respectivement les fractions 2/10 mm et 6/10 mm de Mouzinière, et qui se comportent comme la section F7 « tout Mouzinière ».

Le deuxième enseignement est qu'il est possible de mettre en place des revêtements durablement adhérents et économiques, en sélectionnant un bon niveau de PSV pour la seule fraction grossière des granulats.

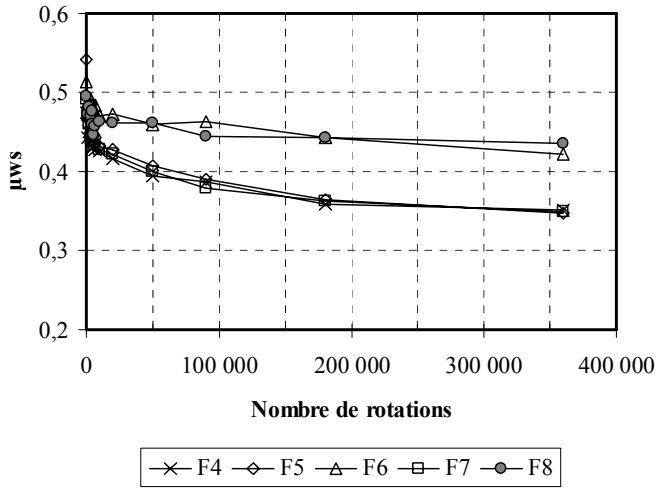



*Figure IV.11 : Évolutions de l'adhérence des échantillons N°4 – 8 (sections F4 à F8) du site de Saint-Fulgent*

## IV.5 Influence de la formulation des enrobés

La Figure IV.12 montre l'évolution de l'adhérence d'un BBTM (échantillon N°2) et d'un BBSG (échantillon N°1) soumis au polissage avec la machine WS. Rappelons que ces revêtements sont localisés à Angers et Clisson. Les caractéristiques de ces enrobés sont consignées sur le Tableau III.14.

La Figure IV.12 montre l'évolution de l'adhérence de ces deux enrobés soumis au polissage de la machine WS en fonction du nombre de rotations. Les évolutions sont sensiblement les mêmes. On peut relever des différences au niveau du nombre de passages à l'état « décapé » et au niveau du maintien de l'adhérence dans la phase de polissage. Le nombre de rotations de polissage au maximum d'adhérence est de 6 000 et 10 000 rotations pour respectivement le BBSG et BBTM. Cette classification est logique car le liant est plus épais juste après la construction sur un BBTM que sur un BBSG. Donc pour le même trafic, il faut plus de temps pour le décaper un BBTM qu'un BBSG. L'évolution de l'adhérence après le décapage est plus stable sur le BBTM. A noter que les mêmes observations peuvent être faites sur les revêtements soumis au vrai trafic.

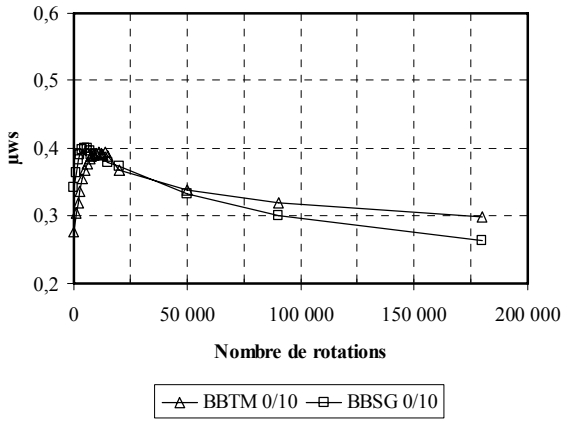



*Figure IV.12 : Évolutions de l'adhérence en laboratoire du BBTM 0/10 (N°2) et BBSG 0/10 (N°1) prélevés in situ : effet de la formulation*

La Figure IV.13 montre les évolutions de l'adhérence des échantillons du site de Fontenay. Pour ce site, cinq formulations différentes avec un granulat (échantillons N°9 à 13, cf. Tableau III.14) sont présentées. Elles concernent : un BBDr 0/10 [151], un BBTM 0/10 type 2 [150], un BBTM 0/10 type 1 [150], un BBTM 0/10 continu [150] et un BBSG 0/10. Les cinq revêtements sont soumis au même trafic. Nous pouvons estimer l'effet de la formulation à l'aide de ce site. Les courbes d'évolution de haut en bas sont respectivement : le BBSG 0/10, le BBTM 0/10 continu, le BBTM 0/10 type 1, le BBTM 0/10 type 2, le BBDr 0/10. La différence entre les courbes est cependant faible pour pouvoir confirmer l'existence d'une influence de la formulation.

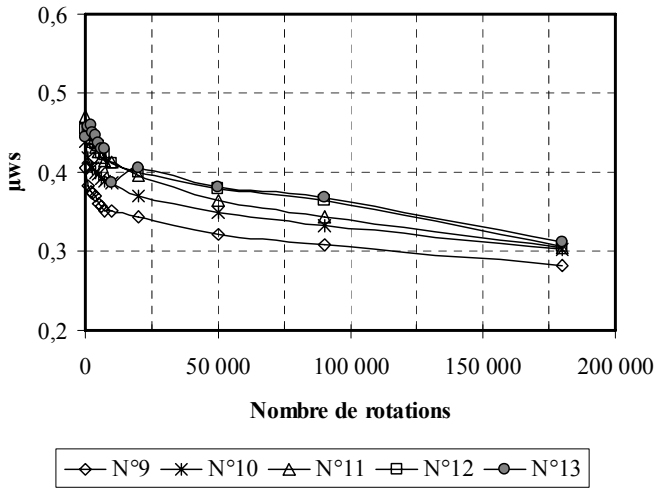



*Figure IV.13 : Évolutions de l'adhérence des échantillons d'enrobés N° 9 – 13 (section B, D – G) du site de Fontenay*

## IV.6 Comparaisons des échantillons de laboratoire/de routes

Les conditions de fabrication (type de malaxage) et de mise en œuvre (type de compactage) des mélanges hydrocarbonés peuvent influer sur le pourcentage de vides, paramètre très important dans le domaine de la formulation des enrobés. La compacité du revêtement est en relation avec les caractéristiques comme la texture et donc naturellement avec l'adhérence, mais aussi avec la durabilité du revêtement (résistance en fatigue, résistance à l'orniérage…).

Pour estimer l'influence des conditions de mise en œuvre, une partie d'un mélange est mis en oeuvre en laboratoire et une autre en chantier. La Figure IV.14 montre l'évolution de l'adhérence de deux BBSG de même formulation compactés en laboratoire et sur chantier. Le polissage est effectué avec la machine WS. Nous observons que le maximum atteint par l'échantillon de laboratoire est plus élevé que celui atteint par l'échantillon in situ, et que le maintien de l'adhérence après la phase de décapage est similaire pour les deux types d'échantillons.

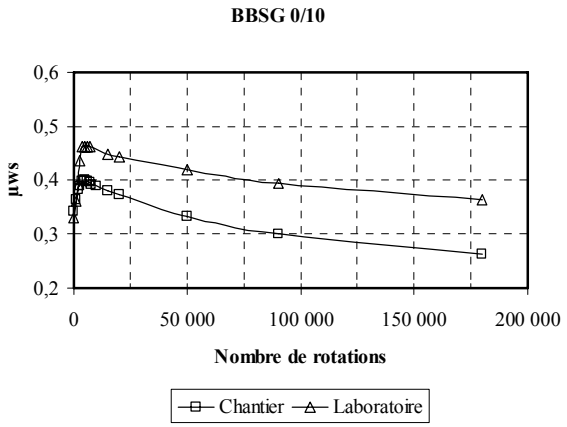



*Figure IV.14 : Évolutions de l'adhérence du BBSG 0/10 prélevé in situ (N°1) et fabriqué en laboratoire (N°16)*

La même différence entre laboratoire et chantier s'observe aussi sur un BBTM 0/10 et sur un BBTM 0/6 (cf. Figure IV.15), quoique dans une moindre mesure.

Dans une étude indépendante (résultat non publié), nous avons observé que la reproduction d'un état de macrotexture en laboratoire est plus facile pour un BBTM que pour un BBSG. La différence entre les courbes d'évolution de l'adhérence observée dans cette thèse pourrait donc être expliquée par une différence de macrotextures. Ce point mérite une étude plus approfondie sur l'influence de la macrotexture sur l'évolution de l'adhérence.

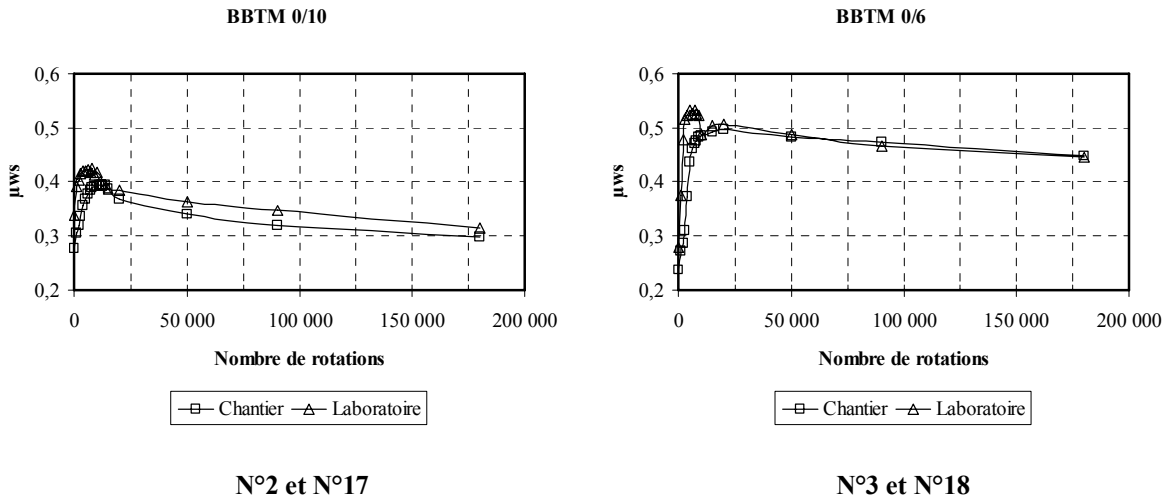



*Figure IV.15 : Évolutions de l'adhérence du BBTM 0/10 et BBTM 0/6 prélevés in situ et fabriqués en laboratoire*

## IV.7 Synthèse sur l'influence de la formulation

Dans ce chapitre, le rôle des granulats dans la courbe d'évolution de l'adhérence a été démontré. La courbe d'évolution de l'adhérence des granulats rejoint celle des enrobés à partir de la phase de décapage du liant. Le coefficient de frottement $\mu_{ws}$ est relativement corrélé avec le PSV. Plus le PSV est élevé, plus le coefficient de frottement $\mu_{ws}$ est grand, avec un certain effet d'amplification. La granularité D influence aussi l'évolution de l'adhérence. Quand la taille des granulats D est petite, les points de contact entre le pneu et le revêtement sont plus nombreux, et l'adhérence est meilleure. Les différences de formulation provoquent des différences dans les évolutions de l'adhérence. D'après les évolutions de simulation en laboratoire, nous trouvons qu'il faut plus de temps pour décaper un BBTM qu'un BBSG pour le même trafic, car le liant est plus épais juste après la construction sur un BBTM que sur un BBSG. Cette observation est aussi confirmée par les résultats *in situ*. L'influence de la formulation des enrobés sur l'évolution de l'adhérence est plus difficile à mettre en évidence avec les données disponibles. Enfin, il semble que la macrotexture influe aussi sur l'évolution de l'adhérence ; la quantification de cette influence mérite une étude plus approfondie.

# V Étude de la microtexture

L'essai de polissage en laboratoire et sa procédure d'essai ont fait l'objectif du chapitre III. Cet essai permet de simuler l'évolution de l'adhérence en laboratoire. En effet, cette évolution s'observe sur les courbes de frottement obtenues en fonction du nombre de polissage pour les différents granulats. Les résultats ont déjà été relatés dans le chapitre précédent.

L'objectif de ce chapitre est de montrer l'importance de la microtexture sur l'adhérence des revêtements de chaussée. Les deux principales questions auxquelles nous allons tenter de répondre sont :

- comment la microtexture évolue-t-elle avec le polissage ? Peut-on lier l'évolution de la microtexture à celle du frottement ?
- peut-on prévoir l'évolution des paramètres de rugosité connaissant les caractéristiques mécaniques des granulats ?

Pour répondre à ces questions, nous allons, dans un premier temps, définir les paramètres des profils de surface à considérer, et les paramètres caractérisant les rugosités de surface. Puis s'ensuivra l'analyse de l'évolution de ces paramètres avec l'adhérence et les caractéristiques des granulats.

## V.1 Procédure d'analyse

### V.1.1 Profil entier et profil seuillé

- Le **profil entier** (cf. Figure V.1) est défini par le profil comportant tous les points de la surface mesurée.
- Le **profil seuillé** est défini par la partie des profils de la surface touchée par le pneu.
- Le **plan moyen** est constitué à partir de la régression linéaire des points constituant le profil.

Dans la suite de cette étude, nous allons considérer que le plan moyen est le plan de référence en xy de tous les calculs (notion de redressement), la dimension z étant orientée vers l'extérieur.

Dans ce nouveau référentiel xyz, les pics sont alors définis comme des maxima locaux, et les creux comme des minima locaux.

- Le **plan de référence** est défini comme le plan parallèle au plan moyen passant par le pic le plus élevé.
- Le **plan de tranche** est défini comme le plan parallèle au plan de référence situé à une distance de 500 µm en dessous du plan de référence.

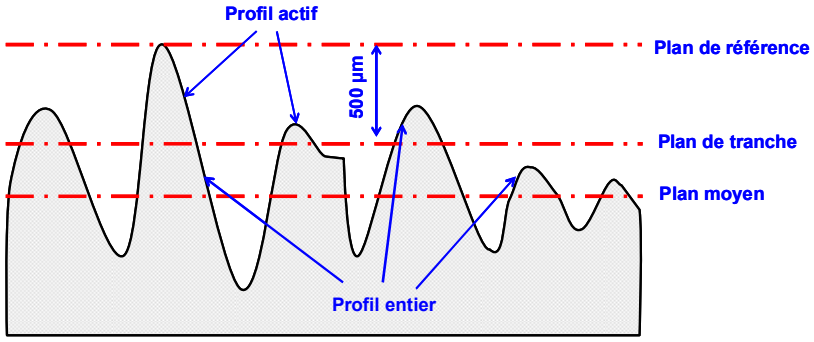



*Figure V.1 : Profil entier et seuillé*

Lorsque le pavé de gomme entre au contact avec la surface de chaussée, il ne touche pas la totalité de cette dernière en raison de l'espace entre les granulats, du module de la gomme, de la vitesse de glissement, etc. En s'inspirant des travaux de Moore [14], nous allons utiliser le plan de tranche pour évaluer l'influence du nombre d'aspérités sur le frottement.

### V.1.2 Échelles de rugosité

Trois échelles du profil sont couramment utilisées (cf. Figure V.2) à savoir [31] :

- l'échelle de rugosité (en tiret dans la figure) : profil constitué de segments reliant les pics et les creux consécutifs du profil d'origine ;
- l'échelle d'ondulation (en point dans la figure) : profil constitué de segments reliant tous les pics du profil d'origine ;
- l'échelle de forme (en deux points et un tiret dans la figure) : profil constitué de segments reliant tous les pics du profil « enveloppe ».

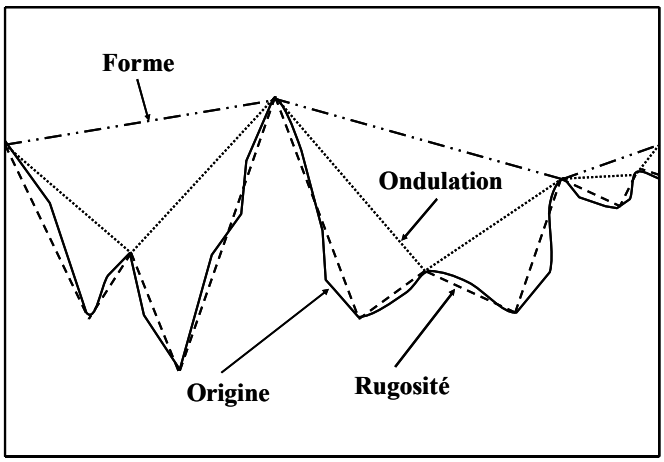



*Figure V.2 : Echelles de texture*

La gomme du pneu est déformée par chaque indenteur du profil. En revanche, elle est globalement déformée par la distribution de l'ensemble des indenteurs. Donc, le frottement global tient compte de cette déformation à deux échelles : la « rugosité » et l'« ondulation ». Le calcul du frottement est déterminé d'une part à partir de l'analyse du profil d'origine, appelé frottement de l'échelle de « rugosité » et d'autre part, appelé frottement de l'échelle « ondulation ». Le frottement global est supposé égal à la somme des deux frottements issus de ces calculs.

### V.1.3 Paramètres de rugosité

Les descripteurs de la texture sont regroupés en quatre familles de paramètres géométriques : la taille, la forme, le relief et la densité. Avant d'introduire ces notions, il est nécessaire de définir la notion d'indenteur, portion de profil comprise entre deux creux (cf. Figure V.3). Le concept d'indenteur est équivalent à celui du concept de motif. Cependant, la forme triangulaire d'un indenteur est plus proche de celle schématisant une aspérité.

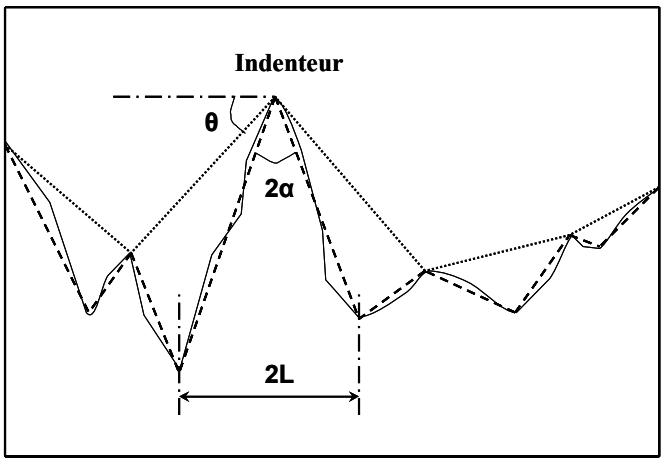



*Figure V.3 : Représentation d'un indenteur et de ces caractéristiques*

La taille :

La taille moyenne des aspérités est caractérisée par le paramètre $R_a$ ou $R_q$. Le paramètre Ra est défini par la moyenne arithmétique des valeurs absolues des altitudes. Le paramètre Rq est défini par la moyenne quadratique des altitudes ou l'écart-type [11, 37].

$$R_a = \frac{1}{\ell}\int |z(x)|dx \qquad (V.1)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{\ell}\int_l z^2(x)dx} \qquad (V.2)$$

où $\ell$ est la longueur du profil ; *z(x)* la hauteur du profil au point d'abscisse x.

La forme :

La forme de l'indenteur est définie par l'angle 2α au sommet. L'analyse de la forme est effectuée sur la ligne reliant tous les sommets et creux. L'angle 2α au sommet des indenteurs est calculé par la formule suivante :

$$\alpha = \frac{1}{2}\times\left[\tan^{-1}\left|\frac{X_m - X_{m-1}}{Z_m - Z_{m-1}}\right| + \tan^{-1}\left|\frac{X_{m+1} - X_m}{Z_{m+1} - Z_m}\right|\right] = \frac{1}{2}\times(\alpha_1 + \alpha_2) \qquad (V.3)$$

où $Z_m$ est l'altitude du m$^{ème}$ extremum ; $X_m$ est l'abscisse du m$^{ème}$ extremum ; $\alpha_1$ est l'angle formé par le segment reliant deux extrema et la verticale dans la partie gauche d'un indenteur ; $\alpha_2$ est l'angle formé par le segment reliant deux extrema et la verticale dans la partie droite d'un indenteur.

En réalité, la cotangente de l'angle α au lieu de l'angle α est préférable pour caractériser facilement le profil. Sa valeur est calculée par la formule suivante :

$$\mathrm{Cot}\alpha = \mathrm{Cot}\left(\frac{\cot^{-1}\alpha_1 + \cot^{-1}\alpha_2}{2}\right) \qquad \text{(V.4)}$$

Le relief :

Le relief est défini par l'angle θ formé par le segment reliant les sommets de deux indenteurs consécutifs et l'horizontale. Il est construit par la ligne reliant tous les pics. Donc, θ est déterminé par l'équation suivante :

$$\theta = \tan^{-1}\left|\frac{Z_{K+1} - Z_K}{X_{K+1} - X_K}\right| \qquad \text{(V.5)}$$

où $Z_k$ est l'altitude du k$^{ème}$ sommet ; $X_k$ est l'abscisse du k$^{ème}$ sommet.

La densité :

La densité dépend du nombre d'indenteurs par unité de longueur de profil. Sa valeur est calculée par le rapport entre le nombre d'indenteurs et la longueur du profil. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$D = \frac{Nb}{L} \qquad \text{(V.6)}$$

où $D$ est la densité d'indenteurs sur une longueur de profil donnée, mm$^{-1}$ ; $N_b$ est le nombre d'indenteurs sur une longueur de profil donnée ; $L$ est la longueur d'un profil, en mm.

En pratique, on peut utiliser la longueur moyenne d'indenteurs définie par :

$$\ell = \frac{L}{Nb} \qquad \text{(V.7)}$$

Les paramètres du profil sont calculés à l'aide d'un programme développé sous l'environnement Matlab. Pour chaque profil, les quatre paramètres (hauteur, forme, relief et densité) sont traités. Enfin, les valeurs moyennes de ces paramètres pour une surface donnée sont obtenues.

## V.2 Analyses de profils

### V.2.1 Analyse visuelle

#### V.2.1.1 Analyse visuelle sur granulats

Les profils des échantillons sont obtenus par le relevé STIL. Les évolutions de la microtexture dues au polissage de WS sont montrées pour sept granulats sur les figures ci-dessous. Nous pouvons constater que le nombre de rotations affecte significativement l'évolution des profils. Une réduction globale de la hauteur est observée. La plupart des pertes significatives arrivent au sommet du granulat. Les petites aspérités sont soit polies, soit complètement enlevées [31, 152].

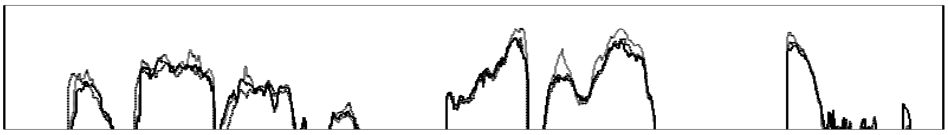


*Figure V.4 : Évolution de la texture, cas du granulat A (PSV = 56)*

*Figure V.5 : Évolution de la texture, cas du granulat B (PSV = 55)*

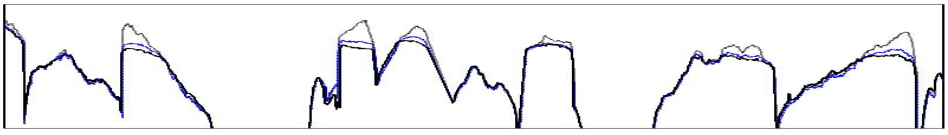


*Figure V.6 : Évolution de la texture, cas du granulat C (PSV = 53)*

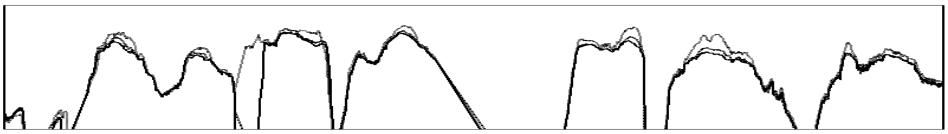


*Figure V.7 : Évolution de la texture, cas du granulat D (PSV = 51)*

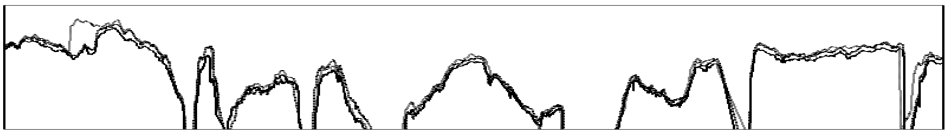


*Figure V.8 : Évolution de la texture, cas du granulat E (PSV = 50)*

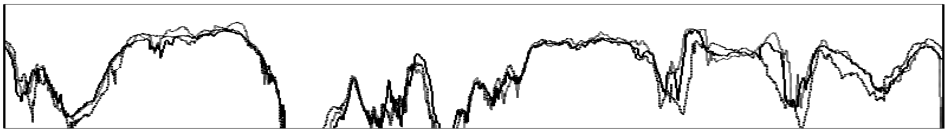


*Figure V.9 : Évolution de la texture, cas du granulat F (PSV = 49)*

*Figure V.10 : Évolution de la texture, cas du granulat G (PSV = 41)*

A partir des figures précédentes sur les évolutions des profils pour différents granulats, nous constatons que :

- la microtexture évolue avec le polissage. Les aspérités sont polies et enlevées par l'effet du polissage ;
- on voit que le profil du granulat G est plus lisse que celui du granulat A après un même nombre de rotations de polissage (cf. Figures Figure V.4 et Figure V.10). D'après le Tableau III.15, ces deux granulats correspondent aux valeurs de PSV extrêmes dans le groupe (granulat A : 56 et granulat G : 41). D'où, la constation est que plus le PSV est élevé, plus le granulat conserve sa surface rugueuse ;
- la hauteur des aspérités du granulat G diminue énormément après un même nombre de rotations de polissage, par rapport au granulat F (cf. Figures Figure V.9 et Figure V.10). En fait, le granulat G a le coefficient LA le plus élevé et le granulat F a le coefficient MDE le plus faible dans le groupe (cf. Tableau III.15). En pratique, la somme (MDE + LA) est couramment utilisée par les ingénieurs routiers. Nous obtenons la somme (MDE + LA) la plus faible pour le granulat F et la somme (MDE + LA) la plus élevée pour le granulat G dans le groupe (granulat F : 19 et granulat G : 33). D'où, la constation de la diminution des aspérités dépendant aussi de la somme (MDE + LA). Plus cette valeur est grande, plus la diminution des aspérités est évidente.

#### V.2.1.2 Analyse visuelle sur enrobés

Malheureusement, les tendances sont moins claires sur des profils relevés à la surface des enrobés. La superposition des profils obtenus à différents stades de polissage n'est pas toujours possible, sans doute à cause de la présence du liant. Ce dernier, qui enveloppe initialement la surface du granulat, est irrégulièrement enlevé avec le polissage. Ceci crée une difficulté à superposer les profils à différents stades de polissage pour les enrobés. L'analyse des paramètres de la texture pour les enrobés est traitée dans la section V.2.2.2.

### V.2.2 Étude de l'effet du polissage sur les paramètres de rugosité comparé au frottement

#### V.2.2.1 Granulats

Dans ce paragraphe, les paramètres de rugosité et le frottement sont comparés sur les échantillons de granulats. D'abord, il s'agit de deux groupes de comparaison :

- le frottement WS ($\mu_{ws}$) et les paramètres de rugosité pour le profil entier ;
- le frottement WS et les paramètres de rugosité pour le profil seuillé.

De plus, pour chaque groupe, deux échelles sont considérées, à savoir :

- l'échelle de rugosité ;
- l'échelle d'ondulation.

Dans les figures suivantes, l'abscisse « x » représente le nombre de rotations. L'abscisse « y » sur la courbe des paramètres de rugosité en fonction du nombre de rotations correspond à la valeur relative (le rapport entre la valeur initiale et la valeur à un certain stade de polissage). Les relations entre les paramètres de rugosité et le frottement sont établies à l'aide de relations linéaires.

##### V.2.2.1.1 Profil entier

<u>Échelle de rugosité</u>

Dans un premier temps, la Figure V.11 (autres granulats, cf. Figure VIII.5, page 193) montre les évolutions des paramètres de rugosité et du frottement $\mu_{ws}$ en fonction du nombre de rotations à l'échelle de rugosité. Les paramètres de rugosité : le relief ($\theta$), la forme (Cot $\alpha$), la Densité (D), la hauteur $R_a$ et $R_q$ ont été définis dans la section V.1.1. A cette échelle, nous constatons que les paramètres $\theta$ et Cot $\alpha$ à l'échelle de rugosité évoluent à peine avec le coefficient de frottement et aucune tendance claire ne se dégage.

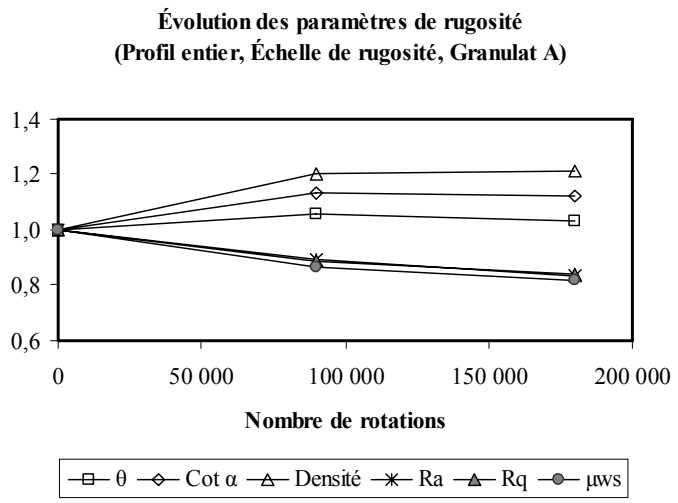



*Figure V.11 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un granulat A*

La Figure V.12 montre les paramètres d'indenteur θ et Cot α en fonction du frottement à l'échelle de rugosité. Dans ces deux cas, le coefficient de détermination $R^2$ est très faible, ce qui ne montre pas une relation linéaire.

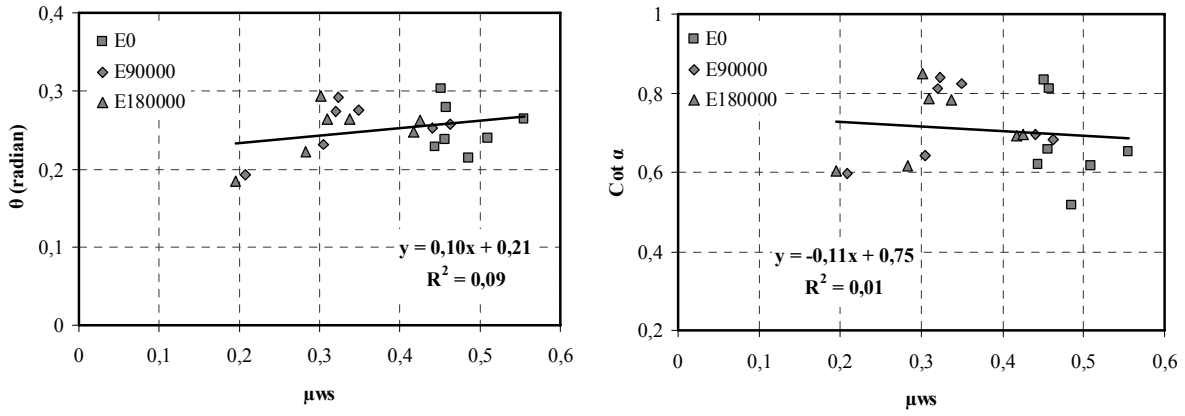



*Figure V.12 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle de rugosité)*

La Figure V.13 montre la variation de la Densité par rapport au frottement. Nous constatons une tendance de diminution de la densité avec le frottement avec un $R^2$ = 0,54. Ce résultat peut s'expliquer par l'ajout résultant des poudres d'abrasif. En fait, lorsque le polissage est effectué sur les échantillons à l'aide de la machine WS, des abrasifs de diamètres 63 µm sont ajoutés. Ce diamètre est de l'ordre de la longueur d'indenteur calculée. Quand le patin sous pression polit la surface de l'échantillon, la texture des surfaces est reformée par les abrasifs. Le nombre d'indenteurs est augmenté.

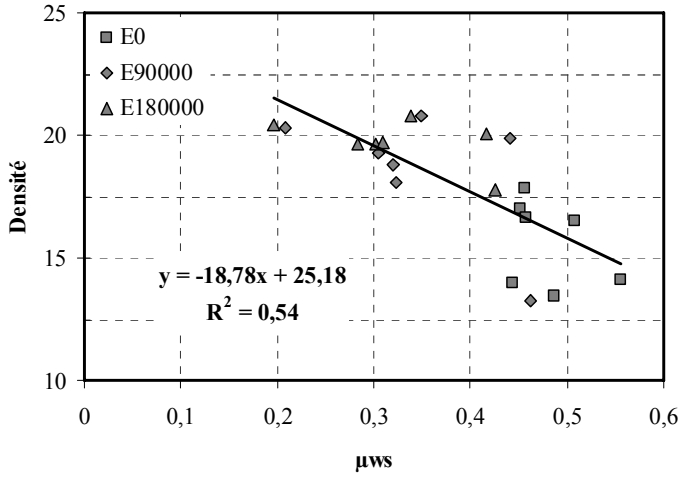



*Figure V.13 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle de rugosité)*

La Figure V.14 montre les évolutions des paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement $\mu_{ws}$. Rappelons que les points du granulat A ne sont pas traités. À l'échelle de rugosité, les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ évolent à peine avec le frottement de frottement $\mu_{ws}$ et aucune tendance claire ne se dégage avec une faible $R^2$. Mais, la Figure V.11 (autres granulats, cf. Figure VIII.5, Annexe C, page 193) montre que les valeurs relatives des paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ sont fortement liées à la valeur relative du frottement. Les taux d'évolution pour les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ et le frottement $\mu_{ws}$ sont identiques. Il est donc difficile de relier les paramètres de hauteur absolue $R_a$ et $R_q$ au frottement absolu.

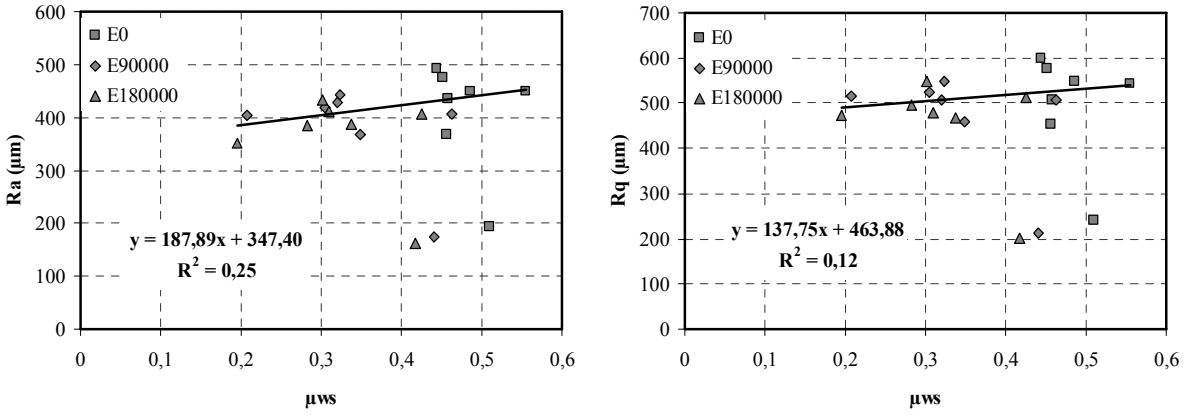



*Figure V.14 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle de rugosité)*

Toutes les valeurs des paramètres de rugosité à l'échelle de rugosité sont données dans le Tableau VIII.1 (cf. page 194). Ces valeurs sont plus élevées à l'échelle de rugosité que celles à l'échelle d'ondulation (cf. Tableau VIII.2, page 196). Ces résultats sont logiques, car les

indenteurs pointus sont plus nombreux à l'échelle de rugosité par rapport à l'échelle d'ondulation.

Échelle d'ondulation

Les paramètres de rugosité, comparés au frottement à l'échelle d'ondulation pour le profil entier sont montrés sur la Figure V.15 (autres granulats, cf. Figure VIII.6, page 195).

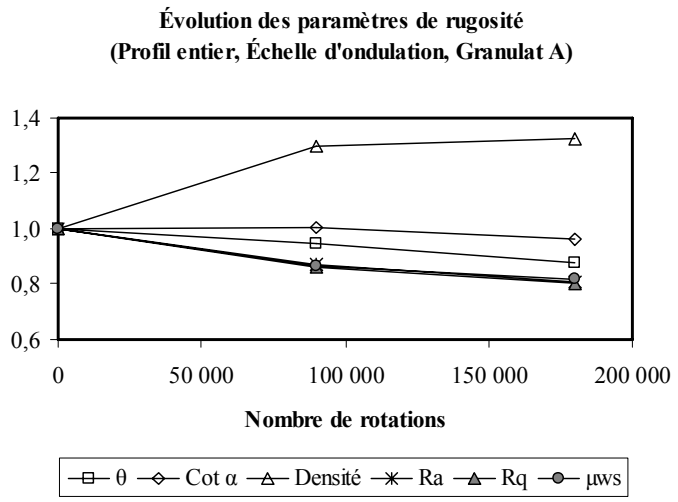



*Figure V.15 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un granulat A*

A partir des comparaisons sur les paramètres d'indenteur (le relief θ et la forme Cot α) à l'échelle d'ondulation, on constate que :

- les courbes des évolutions des paramètres θ et Cot α sont assez proches ;
- les évolutions des paramètres d'indenteur θ et Cot α à l'échelle d'ondulation suivent la même tendance que celle du frottement, sauf pour le granulat F (cf. Figure VIII.6, page 195). Ils décroissent avec le nombre de rotations ;
- les paramètres d'indenteur θ et Cot α en fonction du nombre de rotations pour le granulat F augmentent (cf. Figure VIII.6, page 195). Ces évolutions des paramètres peuvent être expliquées par son faible MDE.

Les évolutions des paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ à l'échelle d'ondulation montrent de bonnes corrélations avec l'évolution du frottement pour le profil entier. Notamment, cette relation est très nette pour le granulat avec un PSV plus élevé.

La Figure V.16 montre les évolutions des paramètres d'indenteur θ et Cot α en fonction du frottement $\mu_{ws}$ à l'échelle d'ondulation pour le profil entier. Nous avons représenté les paramètres θ et Cot α à trois stades de polissage avec le frottement $\mu_{ws}$. On constate que les paramètres θ et Cot α suivent la tendance du frottement, mais avec un $R^2$ faible.

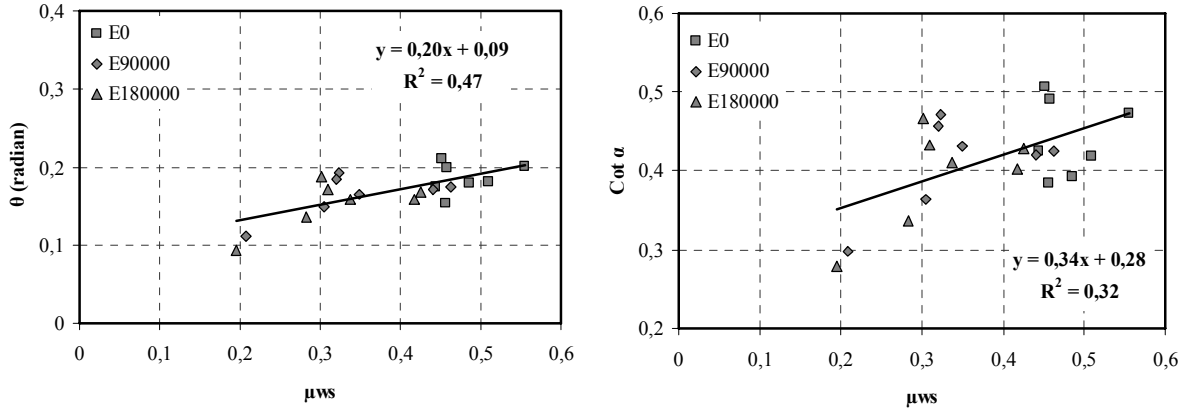



*Figure V.16 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle d'ondulation)*

La Densité d'indenteur en fonction du frottement $\mu_{ws}$ est donnée à la Figure V.17. Une assez bonne relation linéaire est observée entre les deux paramètres. Nous constatons la Densité d'indenteur augmente avec le polissage. La même interprétation qu'à l'échelle de rugosité expliquerait ce phénomène.

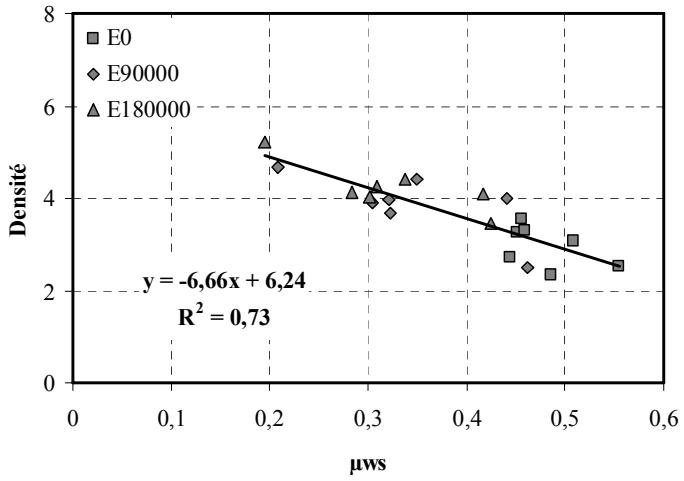



*Figure V.17 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle d'ondulation)*

Comme à l'échelle de rugosité, à l'échelle d'ondulation, les paramètres $R_a$ et $R_q$ évoluent à peine avec le coefficient de frottement et aucune tendance claire ne se dégage avec avec un $R^2$ faible (cf. Figure V.18, sauf le granulat A).

En résumé, seul la densité est bien corrélée au frottement au deux échelles étudiées.

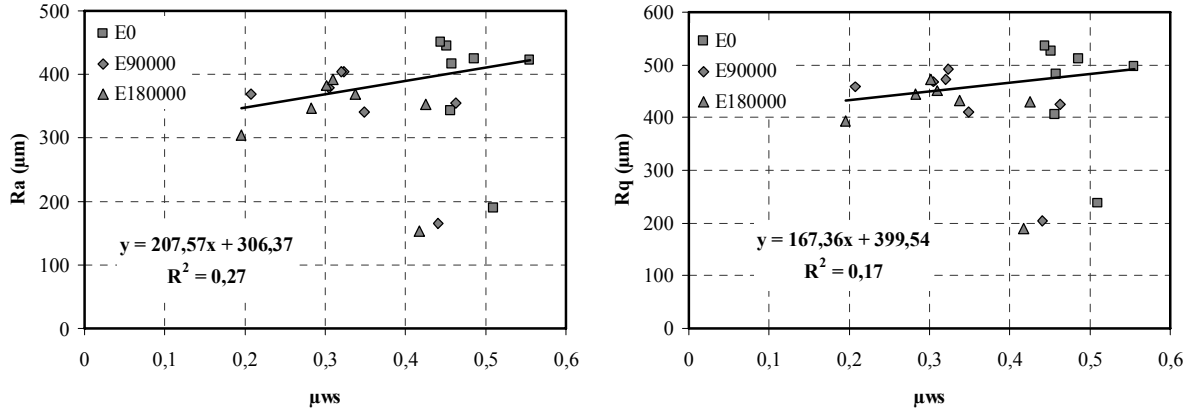



*Figure V.18 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle d'ondulation)*

Les valeurs des paramètres de rugosité et du frottement sont récapitulées dans le Tableau VIII.2 (cf. page 196). Dans ce tableau, le paramètre θ est exprimé en radian. La Densité est exprimée en nombre de points par millimètre. Les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ sont exprimés en microns. Le paramètre Cot α et le frottement $\mu_{ws}$ sont des paramètres sans dimension.

V.2.2.1.2 Profil seuillé

Échelle de rugosité

Tout d'abord, le profil seuillé est expliqué dans la section V.1.1. Les évolutions entre les paramètres de rugosité et le frottement en fonction du nombre de rotations à l'échelle de rugosité sont montrées à la Figure V.19 pour le granulat A et à la Figure VIII.7 (cf. Annexe C, page 197) pour les autres granulats.

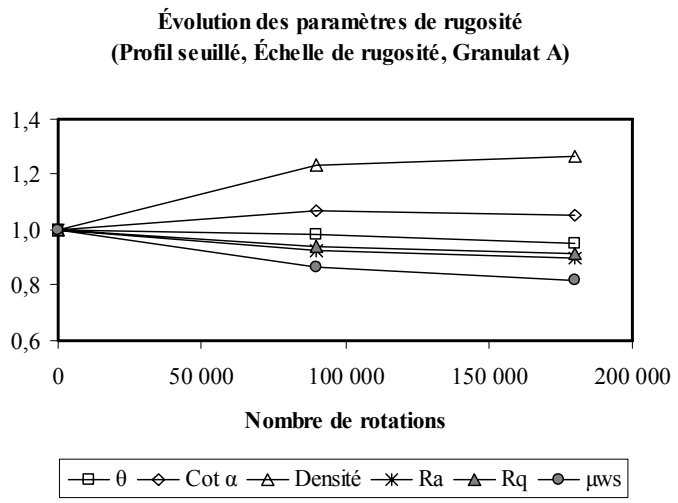



*Figure V.19 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un granulat A*

De manière générale, on observe que les paramètres d'indenteur θ et Cot α en fonction du nombre de rotations évoluent d'une manière identique. Les paramètres $R_a$ et $R_q$ sont presque constants et proches de 1. Enfin, la Densité augmente avec le nombre de rotations.

Puis on analyse en détails les évolutions des paramètres d'indenteur θ et Cot α en fonction du frottement $\mu_{ws}$ à l'échelle de rugosité sont données dans la Figure V.20. Comme dans le cas du profil entier, les paramètres d'indenteur θ et Cot α sont moins bien corrélés au frottement $\mu_{ws}$ à l'échelle de rugosité que par rapport à l'échelle d'ondulation.

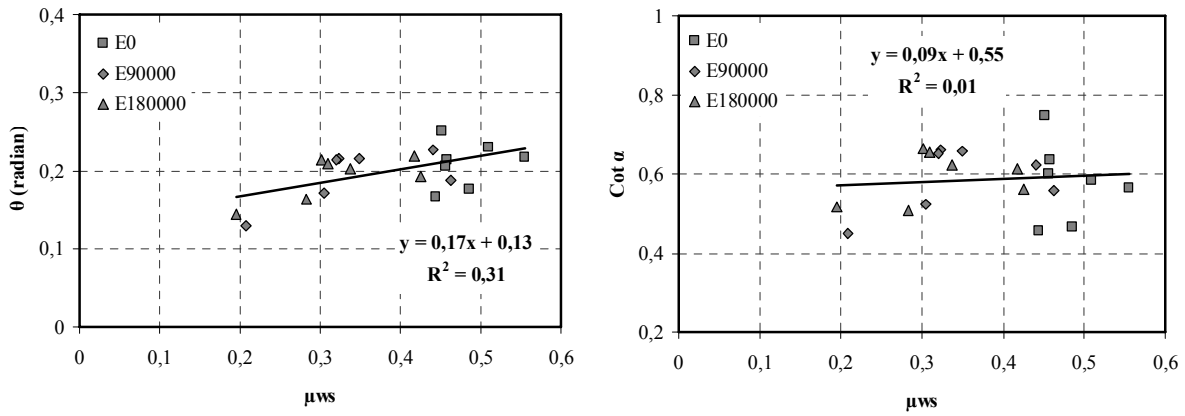



*Figure V.20 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle de rugosité)*

La Figure V.21 montre l'évolution de la Densité en fonction du frottement $\mu_{ws}$ à différents stades de polissage pour le profil seuillé à l'échelle de rugosité. Par rapport au profil entier, cette relation est plus évidente. Les paramètres de la Densité d'indenteur sont bien corrélés au frottement pour le profil seuillé.

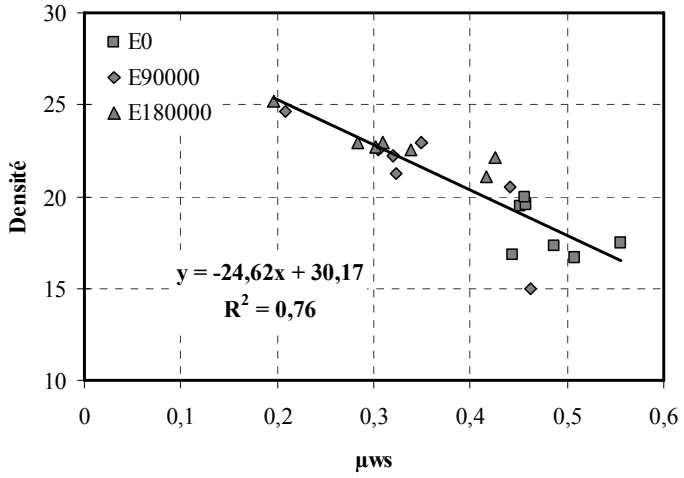



*Figure V.21 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle de rugosité)*

Les relations entre les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ et le frottement $\mu_{ws}$ ne sont pas évidentes si l'on se réfère à la Figure V.22. Les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement $\mu_{ws}$ sont presque stables comme on peut le vérifier à l'aide des résultats du Tableau VIII.3 (cf. page 198).

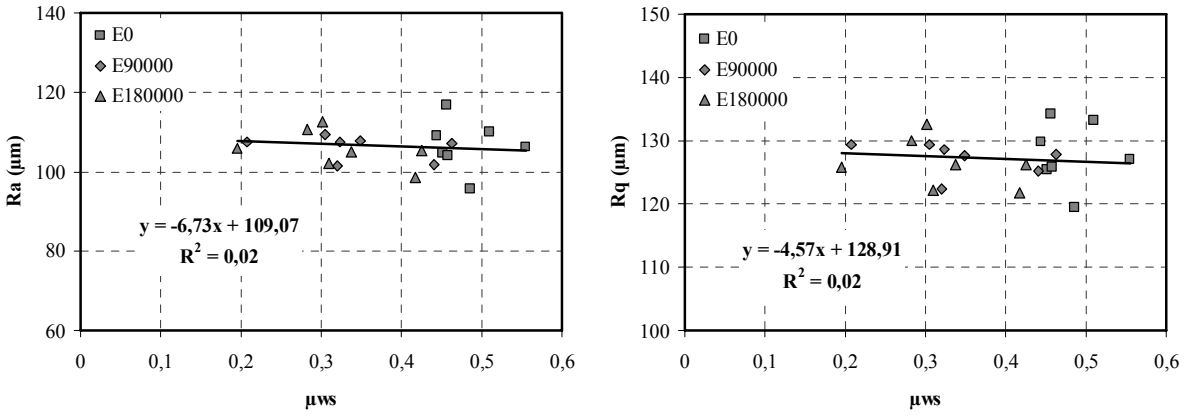



*Figure V.22 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle de rugosité)*

Échelle d'ondulation

Les évolutions des paramètres de rugosité à l'échelle d'ondulation pour le profil seuillé sont montrées à la Figure V.23 pour le granulat A et la Figure VIII.8 de l'Annexe C (cf. page 199) pour les autres granulats. Tout d'abord, les paramètres θ et Cot α sont liés au frottement. Les courbes des évolutions pour ces paramètres θ et Cot α sont identiques. Par

rapport aux évolutions pour le profil entier, les évolutions pour ce profil seuillé ont une meilleure corrélation avec l'évolution du frottement.

Dans le paragraphe V.2.2.1.1, les résultats montrent que les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ sont reliés au frottement $\mu_{ws}$ pour le profil entier. Par contre, pour le profil seuillé, la courbe des paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ en fonction du nombre de rotations est presque stable. Les valeurs relatives de ce groupe de paramètres se situent autour de 1, voir sur la Figure V.23 (autres granulats, cf. Figure VIII.8, Annexe C page 199). Cette évolution est logique car le profil seuillé est limité à 500 µm au-dessous du maximum des aspérités pour chaque stade de polissage. Il est donc difficile de distinguer la variation de la hauteur sur le profil.

La Densité évolue d'une manière croissante avec le nombre de rotations. Ceci est confirmé avec les résultats effectués pour le profil entier.

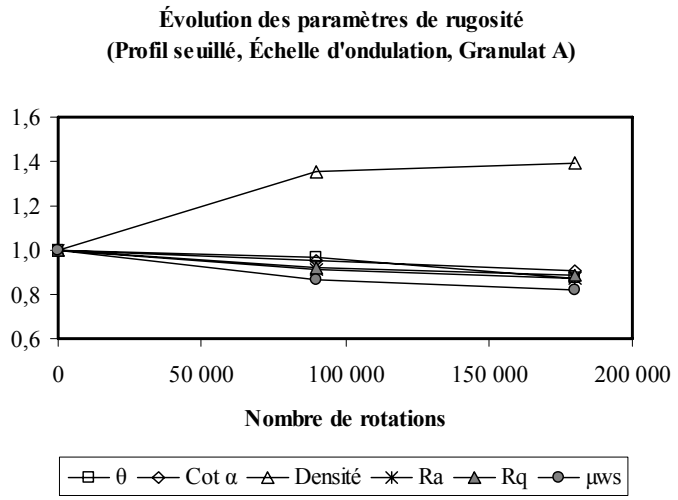



*Figure V.23 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un granulat A*

La Figure V.24 nous montre les évolutions des paramètres d'indenteur θ et Cot α en fonction du frottement $\mu_{ws}$ pour sept granulats à l'échelle d'ondulation pour le profil seuillé. Les trois groupes de points exprimés en différentes couleurs correspondent à différents stades de polissage. A partir de ces résultats, on note que les paramètres d'indenteur θ et Cot α sont une meilleure corrélation au frottement $\mu_{ws}$ pour le profil seuillé par rapport au profil entier. Les valeurs de $R^2$ sont de 0,59 et 0,42 pour le profil seuillé par rapport à 0,47 et 0,32 pour le profil entier. Les évolutions des paramètres d'indenteur θ et Cot α pour le profil seuillé sont plus représentatives pour lier au frottement.

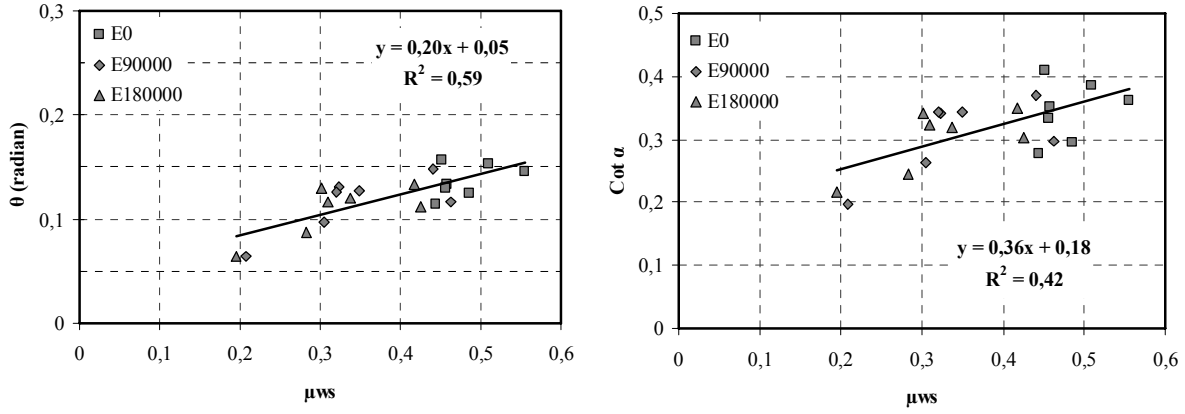



*Figure V.24 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle d'ondulation)*

L'évolution du paramètre Densité en fonction du frottement est illustrée à la Figure V.25. Nous remarquons une très bonne corrélation avec une valeur de $R^2$ = 0,86 entre la densité d'indenteur θ et Cot α et le frottement $\mu_{ws}$. Comme dans le cas du profil entier, le frottement $\mu_{ws}$ augmente lorsque la densité diminue.

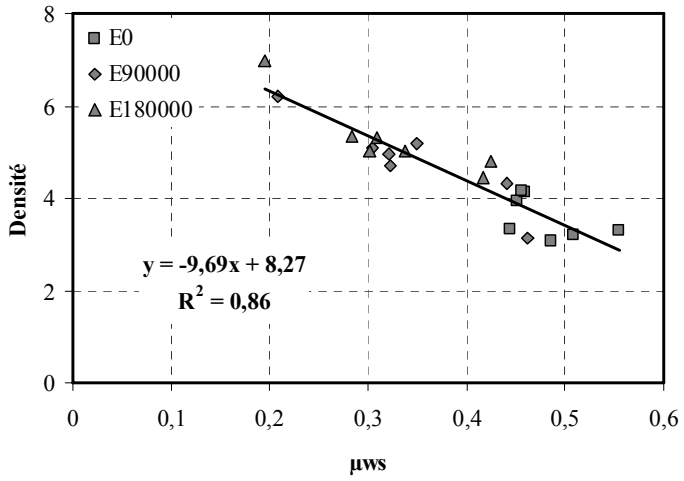



*Figure V.25 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle d'ondulation)*

Il semble qu'aucune relation linéaire n'existe entre les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ et le frottement $\mu_{ws}$, voir Figure V.26. L'explication est donnée au début de ce paragraphe. Le profil seuillé est limité à 500 µm au-dessous du maximum des aspérités pour chaque stade de polissage. Il est donc difficile de distinguer la variation de la hauteur sur le profil.

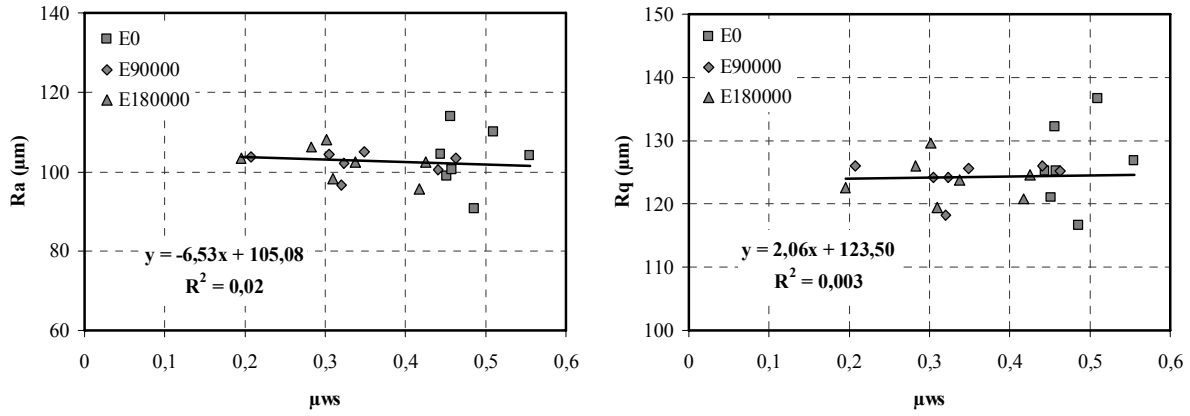



*Figure V.26 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle d'ondulation)*

Le Tableau VIII.4 (cf. page 200) donne les valeurs des paramètres de rugosité et le frottement $\mu_{ws}$ pour sept granulats à l'échelle d'ondulation pour le profil seuillé.

Nous constatons que les valeurs des paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ varient entre 1 et 16 µm. Comme déjà dit, ces paramètres sont presque constants par rapport à ceux du profil entier, (variation entre 24 et 141 µm).

### V.2.2.2 Enrobés

V.2.2.2.1 Profil entier

Échelle de rugosité

Les mêmes analyses sont aussi effectuées pour le cas de mélanges bitumineux. D'abord, il est montré que les courbes des paramètres d'indenteur θ et Cot α en fonction du nombre de rotations sont bien liées aux évolutions du frottement $\mu_{ws}$. Ensuite, les distributions de ces paramètres sont présentées et discutées.

Les évolutions des paramètres d'indenteur θ et Cot α pour le profil entier sont présentées dans la Figure V.27. Elles sont identiques et sont bien reliés au frottement $\mu_{ws}$ au delà du maximum atteint qui se situe pour un nombre de rotations voisin de 11 000.

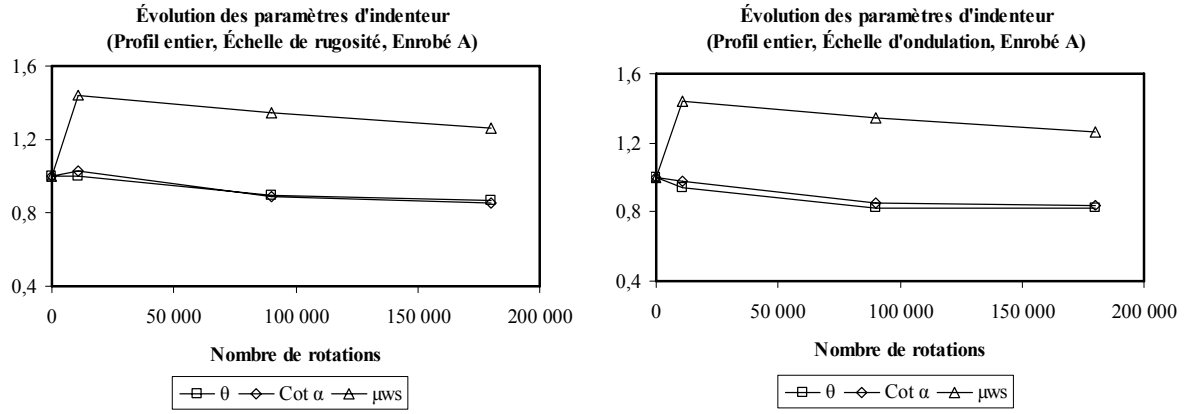



*Figure V.27 : Évolutions des paramètres d'indenteur et du frottement dans le cas d'un enrobé A*

Après cette première observation, nous avons examiné les évolutions des paramètres de rugosité et du frottement $\mu_{ws}$ en fonction du nombre de rotations à partir du décapage dans les figures suivantes et l'Annexe D (cf. page 201).

Les évolutions des paramètres de rugosité et les évolutions du frottement $\mu_{ws}$ en fonction du nombre de rotations à l'échelle de rugosité sont données dans la Figure V.28 pour le granulat A, et à la Figure VIII.9 (cf. Annexe D, page 201) pour les autres granulats.

A partir de la Figure V.28, les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ et les paramètres d'indenteur θ et Cot α varient avec le frottement.

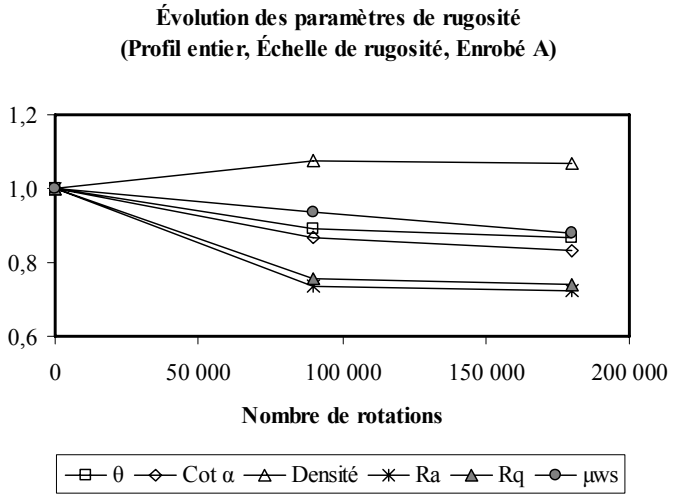



*Figure V.28 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un enrobé A*

Sur la Figure V.29, les évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement $\mu_{ws}$ peuvent être observées. Par rapport à l'échelle d'ondulation, les paramètres d'indenteur θ et Cot α sont moins reliés au frottement $\mu_{ws}$.

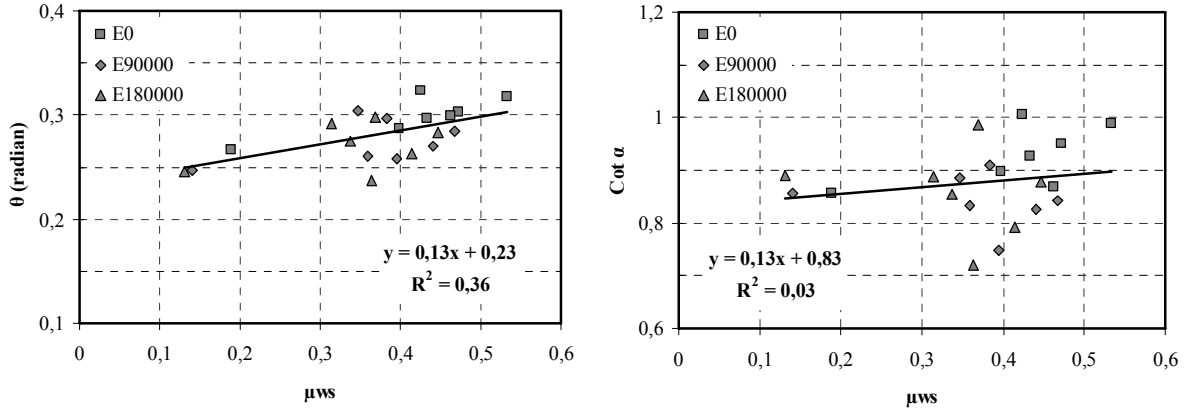



*Figure V.29 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle de rugosité)*

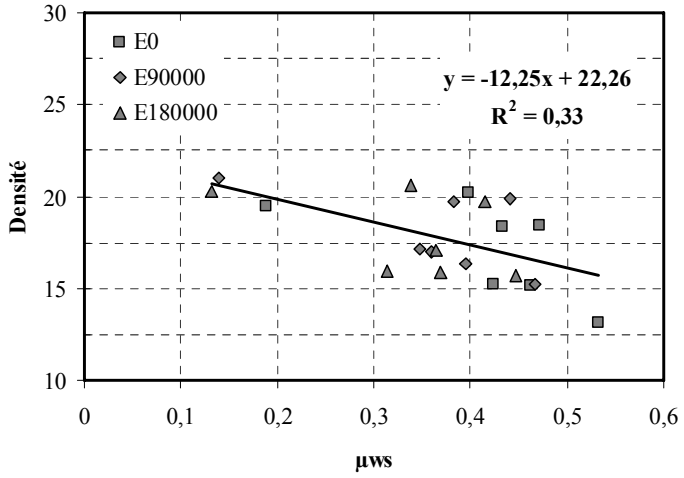



*Figure V.30 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle de rugosité)*

Si l'on considère la Figure V.30 pour la densité et la Figure V.31 pour les paramètres de hauteur, les évolutions de rugosité en fonction du frottement $\mu_{ws}$ à l'échelle de rugosité, on peut observer qu'aucune régression linéaire ne convient.

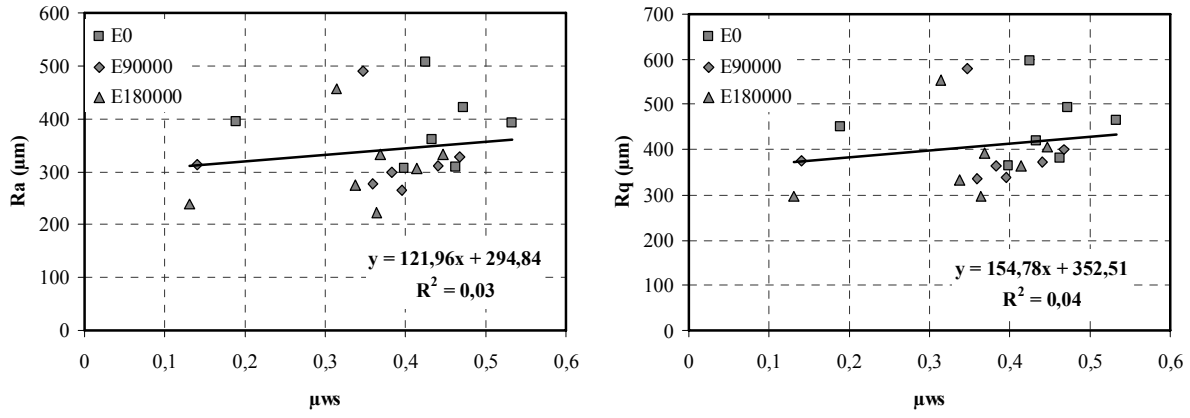



*Figure V.31 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle de rugosité)*

Les valeurs des paramètres de rugosité et du coefficient de frottement $\mu_{ws}$ sont rassemblées dans le Tableau VIII.5 (cf. page 202). Les valeurs du paramètre Cot α sont plus élevées que celles à l'échelle d'ondulation pour les enrobés. Cette variation peut être expliquée par la présence du sable. Le sable comporte des petites aspérités influençant la forme d'indenteur.

Échelle d'ondulation

D'abord, les évolutions des paramètres d'indenteur θ et Cot α sont reliées aux évolutions du frottement au-delà du maximum observé à l'échelle d'ondulation pour le profil entier dans la plupart des cas (cf. Figure V.32 et Figure VIII.10 en Annexe D, page 203). De même les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ sont aussi liés au frottement $\mu_{ws}$. Les paramètres de la Densité varient de manière inverse avec le frottement $\mu_{ws}$.

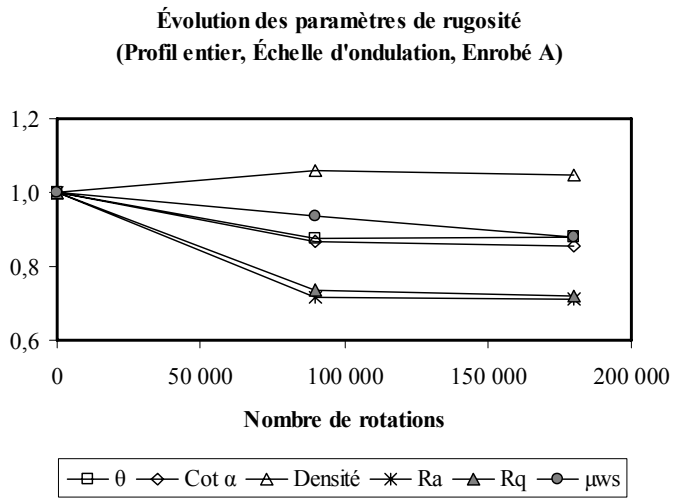



*Figure V.32 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un enrobé A*

La Figure V.33 montre les évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement $\mu_{ws}$ pour différents mélanges bitumineux à différents stades de polissage. A partir de ces résultats, les relations linéaires qui s'en dégagent sont exprimées entre les paramètres d'indenteur θ et Cot α et le frottement $\mu_{ws}$. Comme pour les granulats, cette relation est nette. Quand les paramètres d'indenteur θ et Cot α augmentent, le coefficient de frottement $\mu_{ws}$ augment aussi. Nous n'avons pas constaté que les paramètres de rugosité à l'échelle d'ondulation étaient mieux corrélés avec le frottement $\mu_{ws}$ que ceux de l'échelle de rugosité.

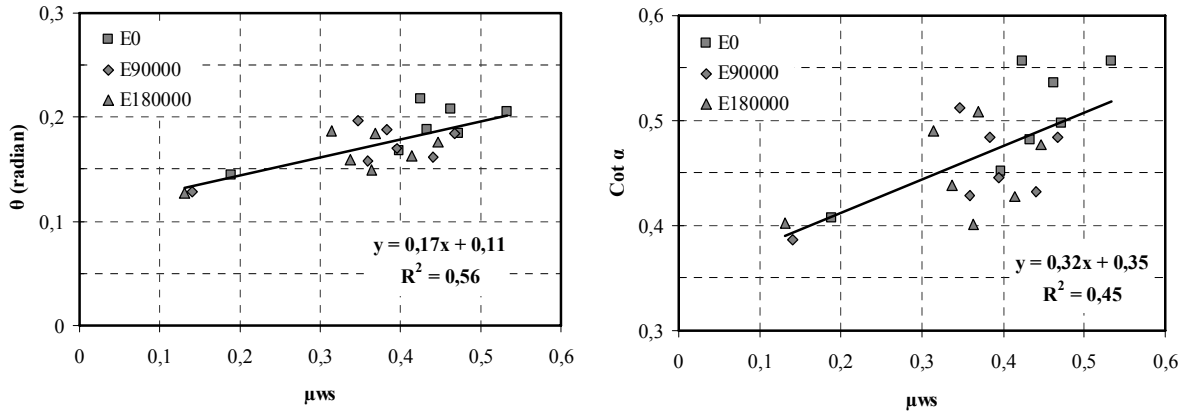



*Figure V.33 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés, (Profil entier, Échelle d'ondulation)*

L'évolution du coefficient de frottement $\mu_{ws}$ en fonction de la Densité est illustrée à la Figure V.34. Plus la Densité diminue, plus le coefficient de frottement $\mu_{ws}$ augmente. Par rapport au résultat obtenu pour les granulats ($R^2$ = 0,73), cette relation linéaire s'avère bonne ($R^2$ = 0,53).

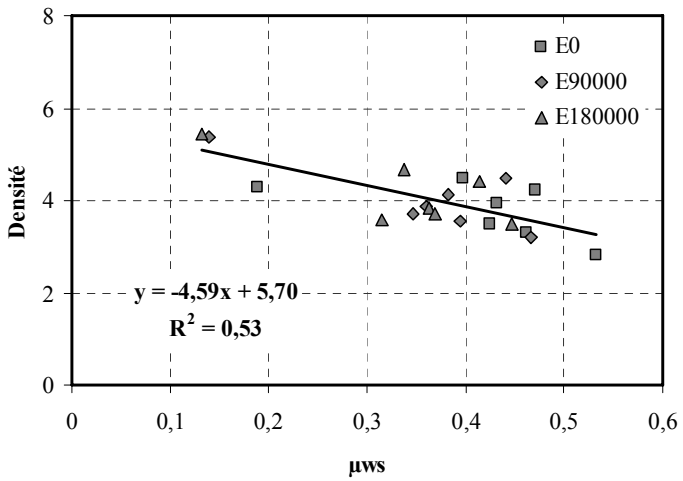



*Figure V.34 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle d'ondulation)*

De même que les résultats obtenus pour les granulats, les relations entre le frottement $\mu_{ws}$ et les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ ne sont pas linéaires pour le profil entier à l'échelle d'ondulation. Car les coefficients de détermination restent très faibles dans ce cas (cf. Figure V.35).

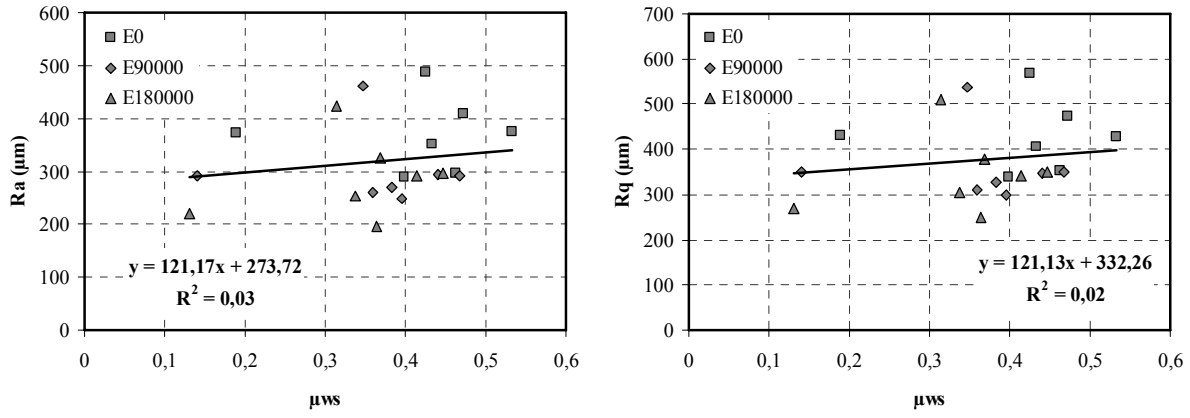



*Figure V.35 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle d'ondulation)*

Le Tableau VIII.6 (cf. page 204) récapitule les valeurs de tous les paramètres de rugosité utilisés et le frottement $\mu_{ws}$. Nous pouvons constater que tous les paramètres varient rapidement dans la première période de 90 000 rotations, i.e. après de la phase du décapage. La variation est moins évidente dans la période allant de 90 000 rotations à 180 000 rotations. Cette évolution est logique, car l'effet du polissage est plus efficace au début du processus.

V.2.2.2.2 Profil seuillé

Échelle de rugosité

Dans ce paragraphe, les évolutions des paramètres de rugosité et du frottement $\mu_{ws}$ pour le profil seuillé sont de nouveau analysées. Comme les résultats obtenus pour le profil entier, deux échelles : 1) ondulation et 2) rugosité sont considérées. Les évolutions des paramètres de rugosité et du frottement $\mu_{ws}$ à l'échelle de rugosité en fonction du nombre de rotations sont illustrées dans la Figure V.36 pour le granulat A et à la Figure VIII.11 (cf. Annexe D, page 205) pour les autres granulats. Les relations entre les paramètres de rugosité et le frottement $\mu_{ws}$ sont établies de la même façon que par le profil entier.

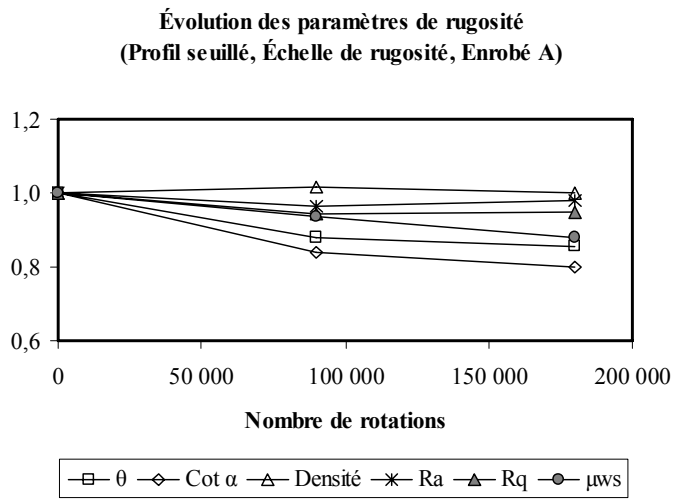



*Figure V.36 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement dans le cas d'un enrobé A*

Nous constatons que les évolutions des paramètres d'indenteur θ et Cot α en fonction du frottement $\mu_{ws}$ sont moins bonnes à l'échelle de rugosité dans la Figure V.37. Les coefficients de détermination $R^2$ sont très faibles dans ce cas.

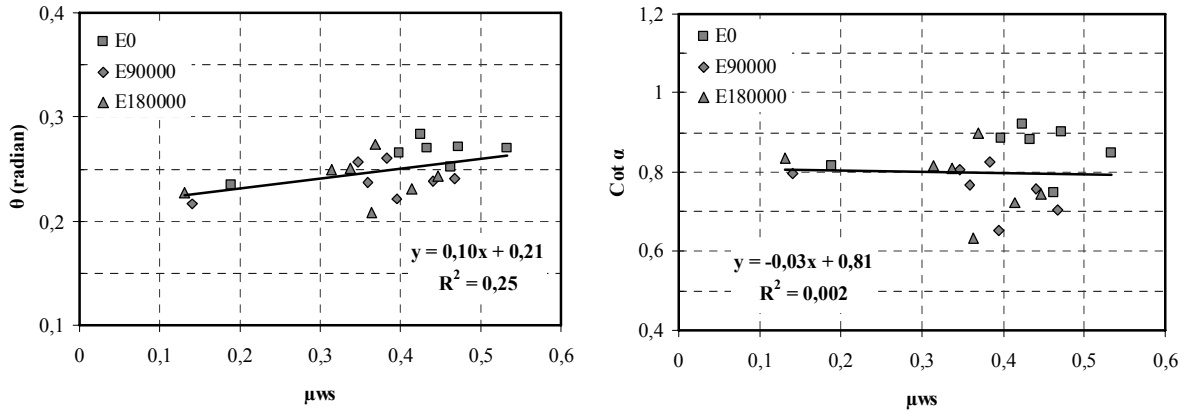



*Figure V.37 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle de rugosité)*

Comme pour les résultats obtenus pour les paramètres d'indenteur θ et Cot α, la relation entre la Densité d'indenteur et le frottement $\mu_{ws}$ est aussi moins bonne, ceci est observé à la Figure V.38, ($R^2 = 0,49$)

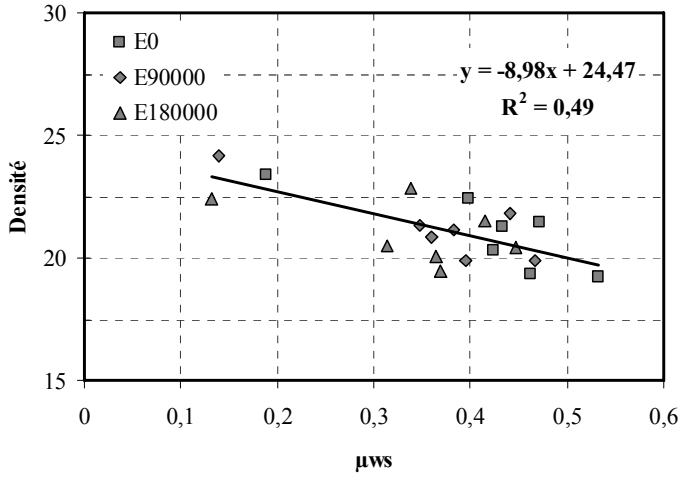



*Figure V.38 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle de rugosité)*

Nous avons de bonnes relations entre les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ et le frottement $\mu_{ws}$ à la Figure V.39. Pour le profil entier, les relations sont moins bonnes que pour le profil seuillé. Ceci amène la différence des comparaisons entre les granulats et les enrobés. Les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ sont mieux corrélés au frottement $\mu_{ws}$ pour le profil entier que pour le profil seuillé.

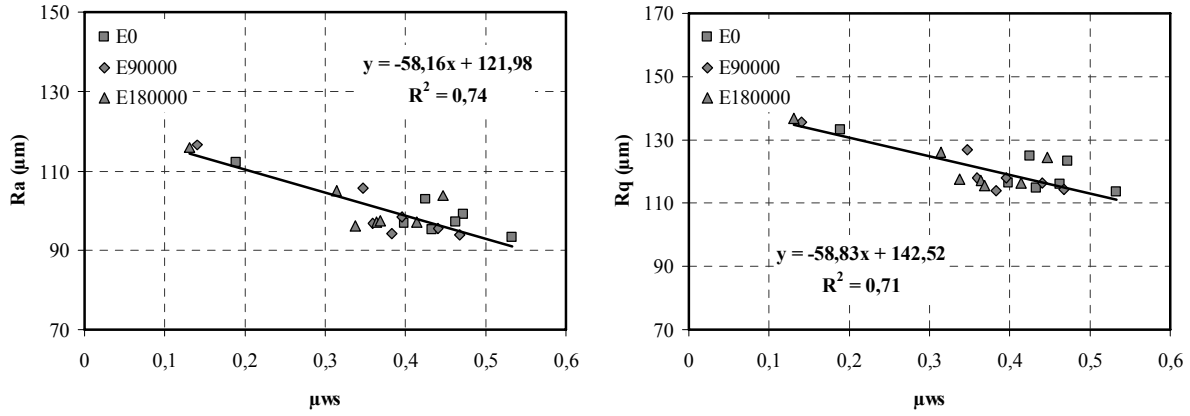



*Figure V.39 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle de rugosité)*

Dans le Tableau VIII.7 (cf. page 206), nous avons regroupé les valeurs des paramètres de rugosité et du frottement $\mu_{ws}$ à l'échelle de rugosité. Comme pour le profil entier, les valeurs des paramètres θ, Cot α et Densité dans le cas de l'échelle de rugosité sont supérieures à celles de l'échelle d'ondulation (cf. Tableau VIII.8, page 208). Les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ sont identiques pour l'échelle de rugosité et pour l'échelle d'ondulation.

## Échelle d'ondulation

Tout d'abord, la Figure V.40 montre les évolutions des paramètres de rugosité et du frottement $\mu_{ws}$ en fonction du nombre de polissage à l'échelle d'ondulation.

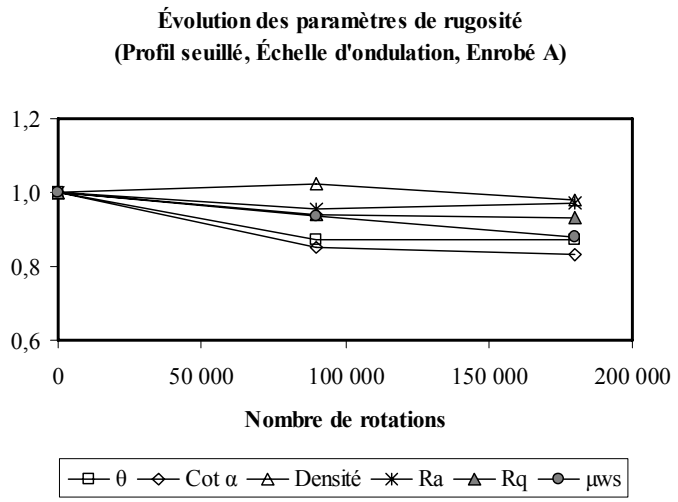



*Figure V.40 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement pour le cas d'un enrobé A*

Les paramètres de rugosité présente une meilleure corrélation avec le frottement $\mu_{ws}$ pour le profil seuillé que pour le profil entier. Mais, par rapport aux résultats obtenus pour les granulats, ce résultat n'est pas toujours évident. Les coefficients de détermination sont de 0,56 et 0,45 pour le profil entier.

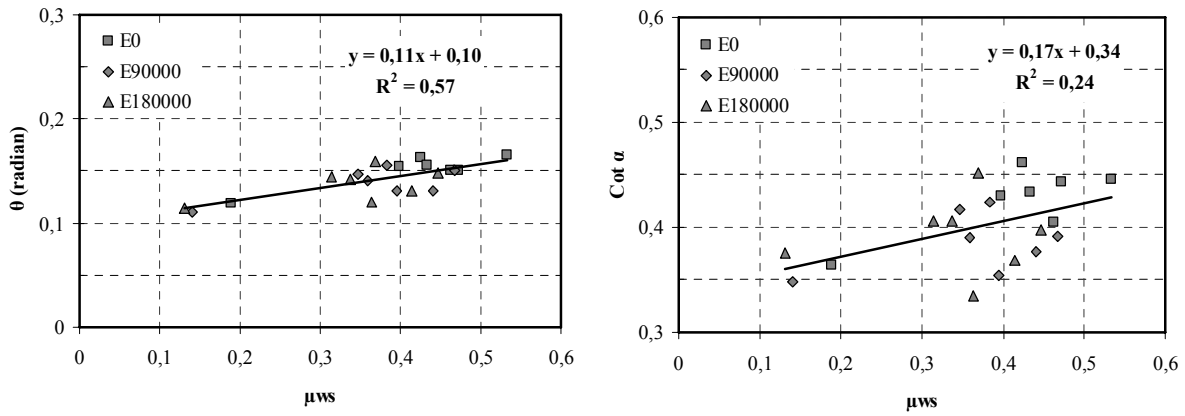



*Figure V.41 : Évolutions des paramètres θ et Cot α en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle d'ondulation)*

La relation entre la Densité d'indenteur et le frottement $\mu_{ws}$ est meilleure pour le profil seuillé que celle observée pour le profil entier à la Figure V.42, car le coefficient de détermination $R^2$ est égal à 0,62 par rapport à 0,53 pour le profil entier.

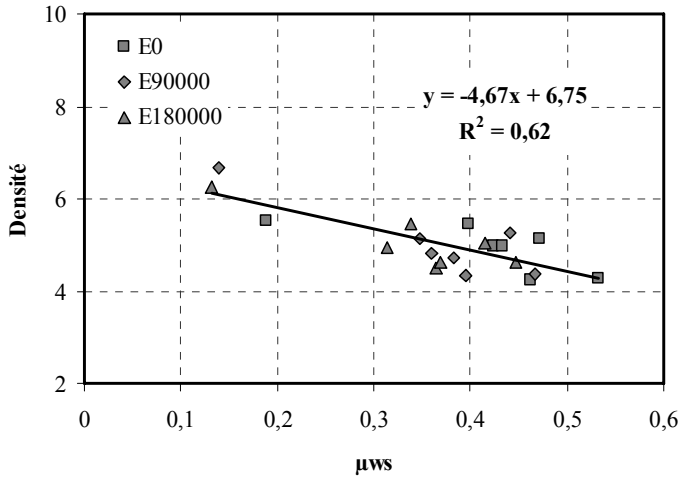



*Figure V.42 : Évolution du paramètre Densité en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle d'ondulation)*

De meilleures relations entre les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ et le frottement $\mu_{ws}$ sont trouvées comme l'atteste la Figure V.43. Ce résultat est différent de celui obtenu pour les granulats. Dans le cas des granulats, les relations entre les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ et le frottement $\mu_{ws}$ ne sont pas évidentes. Si l'on compare les résultats pour le profil entier et pour le profil seuillé, les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ ont une corrélation meilleure avec le frottement $\mu_{ws}$ pour le profil entier que pour le profil seuillé. En effet, les paramètres évoluent vite au début du processus de polissage pour les enrobés que pour les granulats.

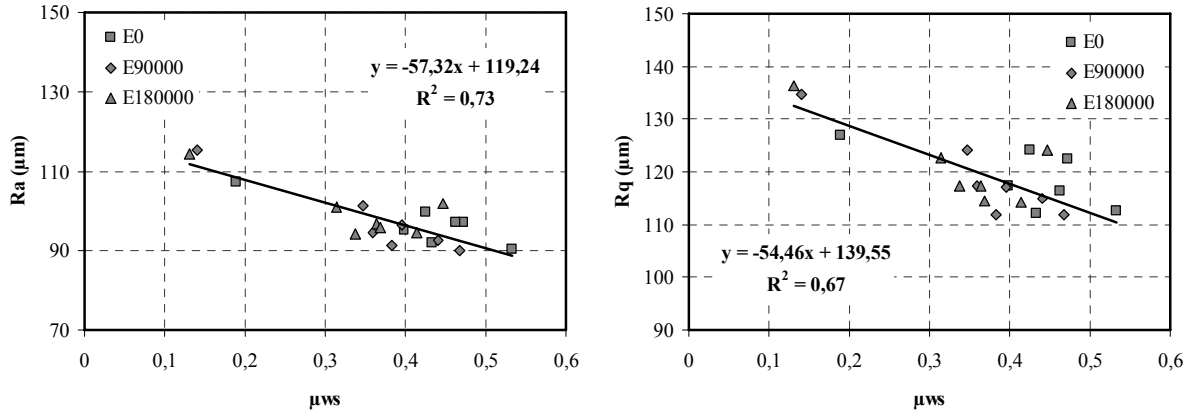



*Figure V.43 : Évolutions des paramètres $R_a$ et $R_q$ en fonction du frottement dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle d'ondulation)*

L'ensemble des résultats est consigné dans le Tableau VIII.8 (cf. page 208). Il donne l'ensemble des valeurs des paramètres de rugosité et du coefficient de frottement.

### V.2.2.3 Étude comparative entre granulats/enrobés

Dans le chapitre précédent, le rôle du granulat sur l'évolution de l'adhérence a été démontré. Il est observé que la courbe de l'évolution du frottement $\mu_{ws}$ pour le granulat est très proche de celle de l'enrobé après le décapage de l'enrobé composé du même granulat [155]. En plus, il est aussi montré dans les paragraphes précédents que les paramètres d'indenteur θ (pour le relief) et Cot α (pour la forme) évoluent avec le frottement $\mu_{ws}$ pour le granulat et pour l'enrobé. Donc, nous pouvons a priori supposer que les évolutions des paramètres d'indenteur sont les mêmes pour une galette de granulats et une carotte d'enrobés composés avec ce même granulat. Les résultats précédents ont aussi permis d'observer que les évolutions de deux paramètres en fonction du nombre de rotations sont identiques dans la plupart des cas. Nous allons donc nous concentrer sur le relief θ dans les études suivantes.

La Figure V.44 pour le profil entier et la Figure V.45 pour le profil seuillé montrent l'évolution du paramètre θ et l'évolution du frottement $\mu_{ws}$ pour le granulat et pour l'enrobé, pour le granulat B. A partir de ces figures, nous observons que :

- les évolutions du paramètre θ suivent assez bien l'évolution du frottement $\mu_{ws}$ pour le granulat et l'enrobé ;
- les paramètres θ pour le granulat et l'enrobé varient identiquement ;
- les évolutions des paramètres sont plus corrélées à l'évolution du frottement $\mu_{ws}$ pour le profil seuillé que pour le profil entier ;
- les évolutions du paramètre à l'échelle d'ondulation sont plus proches de l'évolution du frottement $\mu_{ws}$ que celles de l'échelle de rugosité.

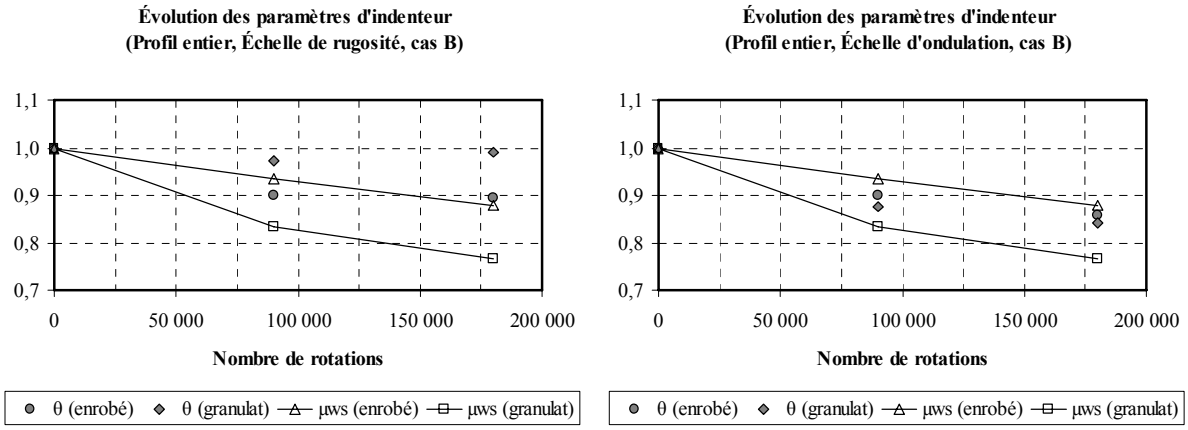



*Figure V.44 : Comparaisons des évolutions du paramètre θ et du frottement WS (Profil entier, Échelles de rugosité et d'ondulation, Granulat B et Enrobé B après décapage)*

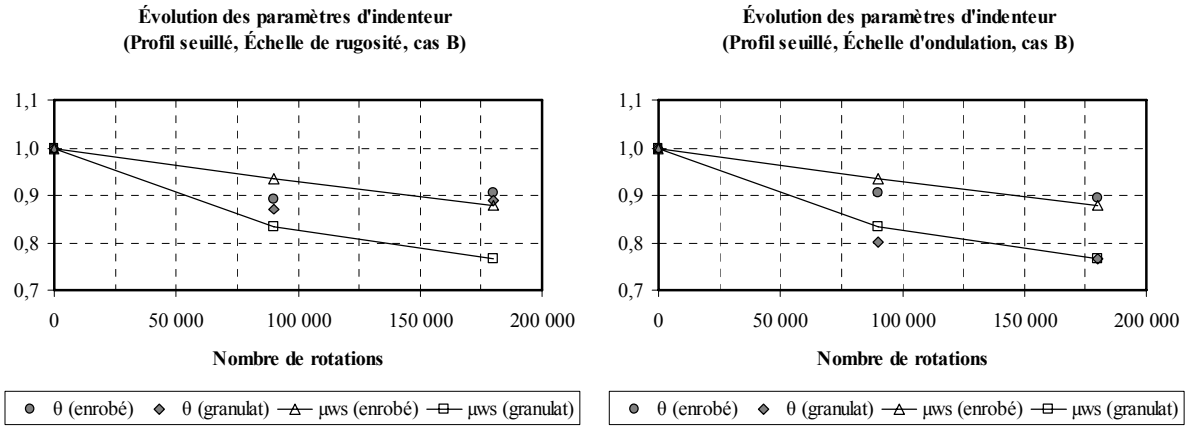



*Figure V.45 : Comparaisons des évolutions du paramètre θ et du frottement WS (Profil seuillé, Échelles de rugosité et d'ondulation, Granulat B et Enrobé B après décapage)*

Jusqu'à présent, il est clair que les paramètres d'indenteur θ et Cot α à l'échelle d'ondulation pour le profil seuillé sont reliés au frottement $\mu_{ws}$. Les évolutions des paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ à l'échelle d'ondulation pour le profil entier suivent également le frottement $\mu_{ws}$. Et l'évolution de la Densité influence aussi l'évolution du frottement $\mu_{ws}$. Quel paramètre choisir en priorité ? Quelles relations existent entre ces grandeurs ? On tente de répondre à ces questions dans les paragraphes suivants.

Nous comparons deux granulats A et G qui comportent les deux valeurs extrêmes PSV. Les évolutions des paramètres d'indenteur θ et Cot α et les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ sont illustrées à la Figure V.46 pour le granulat A et à la Figure V.47 pour le granulat G. Les paramètres d'indenteur θ et Cot α et les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ sont à relier au frottement $\mu_{ws}$ pour le granulat A. Deux évolutions des paramètres représentent indépendamment l'évolution du frottement $\mu_{ws}$. Par contre, cette observation n'est pas confirmée pour le granulat G. Les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ sont moins bien reliés au frottement $\mu_{ws}$ pour ce granulat. A partir de ces observations, nous obtenons [158] :

- les paramètres d'indenteur θ et Cot α et les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ sont liés au frottement $\mu_{ws}$. Leurs représentations dépendent de leur PSV ;
- pour un granulat avec PSV élevé comme le granulat A, deux types de paramètres sont très fortement corrélés au frottement (cf. Figure V.46). Les évolutions de ces deux types sont indépendantes. En particulier, les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ sont corrélés au frottement $\mu_{ws}$ par rapport aux paramètres d'indenteur θ et Cot α ;
- pour un granulat avec PSV faible comme le granulat G, deux types de paramètres ont une moins bonne liaison avec le frottement $\mu_{ws}$ que dans le cas d'un granulat avec PSV élevé. Les évolutions de ces paramètres se complètent l'un et l'autre pour se lier au frottement $\mu_{ws}$. La liaison entre un seul paramètre et le frottement $\mu_{ws}$ n'est pas parfaite.

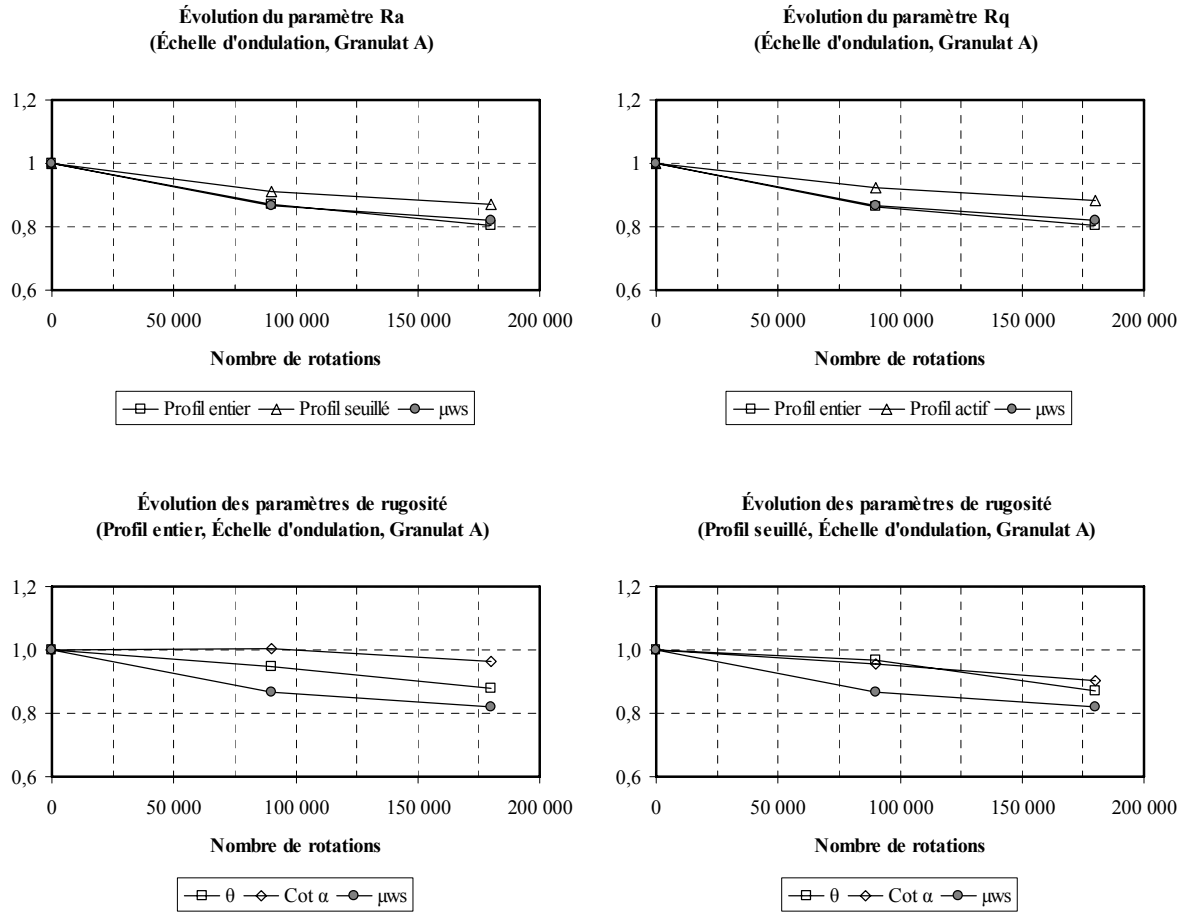



*Figure V.46 : Évolutions des paramètres de la microtexture (cas du granulat A)*

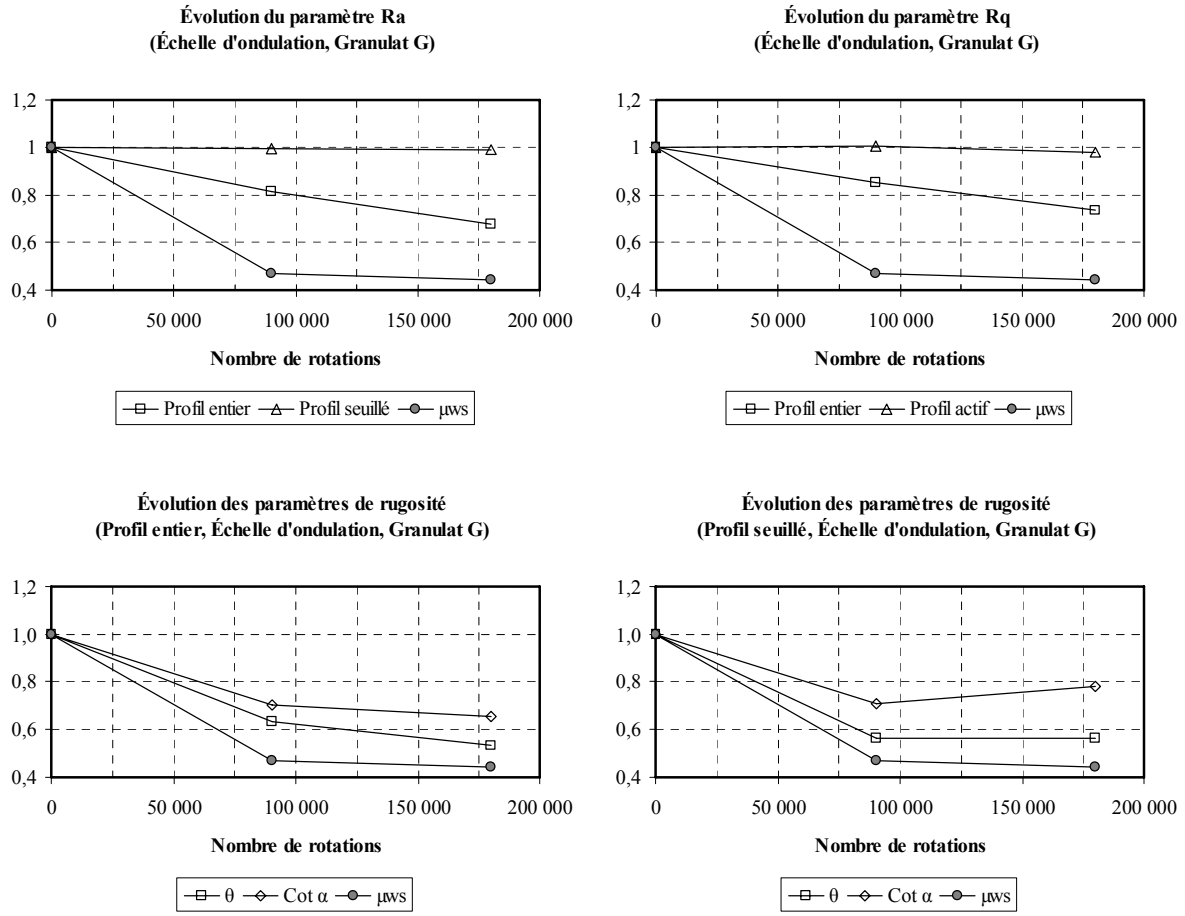



*Figure V.47 : Évolutions des paramètres de la microtexture (cas du granulat G)*

### V.2.3 Étude de l'effet du polissage sur les paramètres de rugosité par rapport aux caractéristiques des granulats

Après les analyses détaillées données dans le paragraphe précédent, les paramètres de rugosité liés au frottement $\mu_{ws}$ ont été étudiés. Les relations entre ces paramètres de rugosité et les caractéristiques des matériaux sont effectuées dans ce paragraphe.

Sur les figures présentées dans ce paragraphe, on a assimilé les courbes à une droite à deux pentes pour la courbe des évolutions des paramètres de rugosité en fonction du nombre de rotations (cf. Figure V.48). Elles concernent les différentes courbes : $R_q$-N, θ-N, cotgα-N et Densité-N. Cette pente exprime la vitesse de variation en fonction du nombre de rotations.

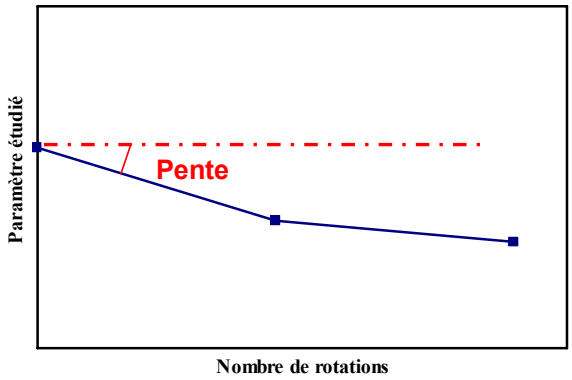



*Figure V.48 : Schématisation des courbes avec une pente à l'origine*

### V.2.3.1 Taille (Rq)

Les évolutions des paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ étant similaires, un seul paramètre $R_q$ est utilisé dans cette étude. Les figures ci-dessous montrent la pente à l'origine dans les courbes $R_q$-N en fonction du MDE (Micro-Deval), LA (Los Angeles) et leur combinaison (MDE + LA) pour sept granulats. Il faut rappeler que leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau III.15. Dans ces figures, les paramètres de hauteur sont calculés à l'échelle de rugosité pour le profil entier.

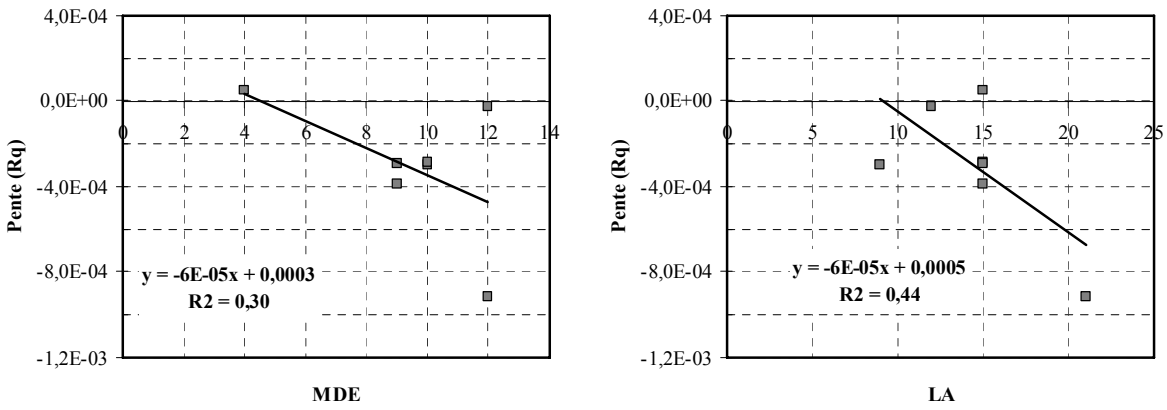



*Figure V.49 : Évolutions du paramètre de hauteur $R_q$ en fonction de MDE et LA pour le cas de l'ensemble des granulats*

Les évolutions du paramètre de hauteur $R_q$ en fonction de MDE et LA sont montrées à la Figure V.49. Nous constatons qu'il n'y pas des bonnes relations entre la pente et les valeurs MDE et LA ($R^2$ = 0,30 et $R^2$ = 0,44). Cependant, il est mentionné que la combinaison des deux paramètres mécaniques des granulats est souvent utilisée pour caractériser

les matériaux. Donc, une autre relation entre la pente de $R_q$ et (MDE + LA) est montrée à la Figure V.50.

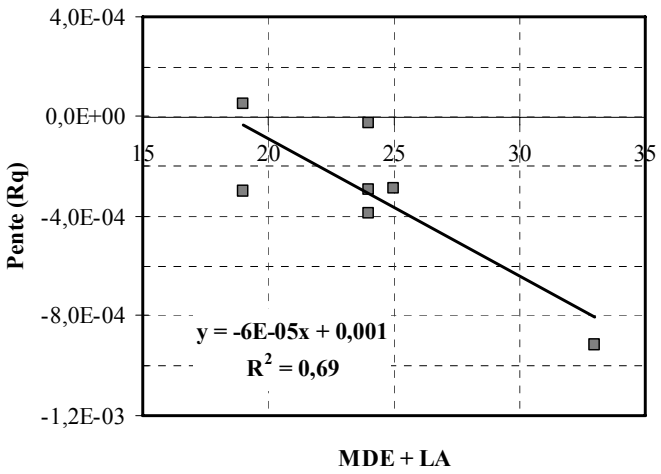



*Figure V.50 : Évolution du paramètre de hauteur $R_q$ en fonction de (MDE + LA) pour le cas de l'ensemble des granulats*

A partir de cette figure, on voit que la liaison avec la somme (MDE + LA) est plus nette. La valeur absolue de la pente est plus élevée. Le granulat avec une valeur (MDE + LA) élevée perd plus rapidement ses aspérités, par rapport au granulat ayant une valeur (MDE + LA) faible. Ceci permet d'affirmer que la somme (MDE + LA) est un paramètre lié à la diminution des aspérités de la surface. Elle peut caractériser la capacité du granulat à s'opposer à l'usure.

Puis, la comparaison entre la pente de la courbe $R_q$-N et le PSV est proposée à la Figure V.51. Comme pour les relations entre la pente et MDE ou la pente et LA, cette corrélation est moins bonne ($R^2$ = 0,27).

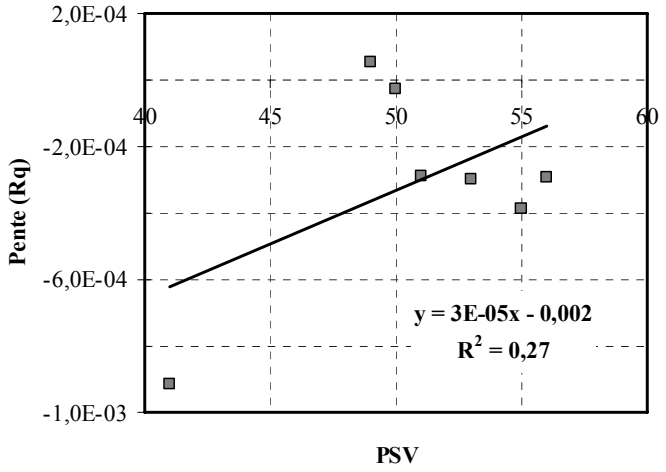
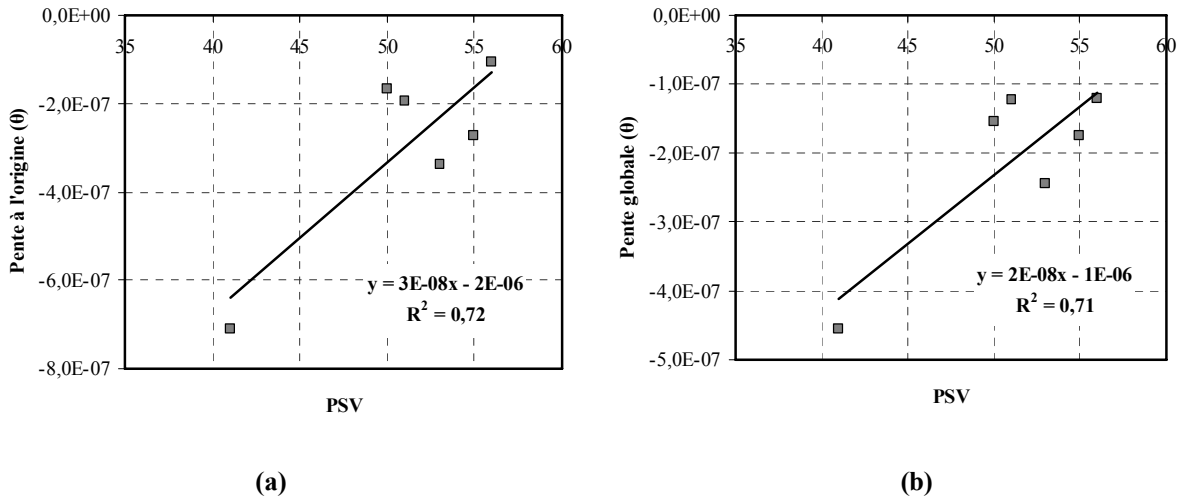



*Figure V.51 : Évolution du paramètre de hauteur $R_q$ en fonction de PSV pour le cas de l'ensemble des granulats*

### V.2.3.2 Relief (θ)

Six granulats ont été retenus pour cette analyse (en effet, on a éliminé le granulat F). La valeur correspondant à ce granulat est très éloignée de celles confondues pour l'analyser. La Figure V.52 montre les pentes de la courbe θ en fonction du PSV. Il faut mentionner que le paramètre θ est calculé à l'échelle d'ondulation pour le profil entier. A partir de cette figure, on constate que le paramètre θ est proportionnel au PSV. Un plus faible PSV amène une valeur absolue élevée pour le paramètre θ. Le PSV est donc un paramètre caractérisant la capacité du granulat à garder sa rugosité de surface.

Puis on note que les relations entre les pentes et le PSV calculées de deux façons. La pente à l'origine a été définie dans la Figure V.48. La pente globale est le quotient de l'évolution totale du paramètre étudié entre 0 et 180 000 rotations, par le nombre total de cycles. La même liaison entre la pente (ou la variation du paramètre) et le PSV est établie sur toute la courbe de l'évolution.




**(a)** **(b)**

*Figure V.52 : Évolutions du paramètre de relief θ en fonction du PSV pour le cas de six granulats, excepté le granulat F*

On recherche à présent une relation entre la pente de θ et les autres caractéristiques des matériaux (MDE et LA) est représentée à la Figure V.53. Les régressions linéaires se semblent par très probantes car les coefficients de détermination $R^2$ sont faibles ($R^2$ = 0,27 et $R^2$ = 0,37). La relation entre la pente à l'origine et la somme (MDE + LA) est montrée à la Figure V.54 ; la corrélation est un peu meilleure, mais reste modérée.

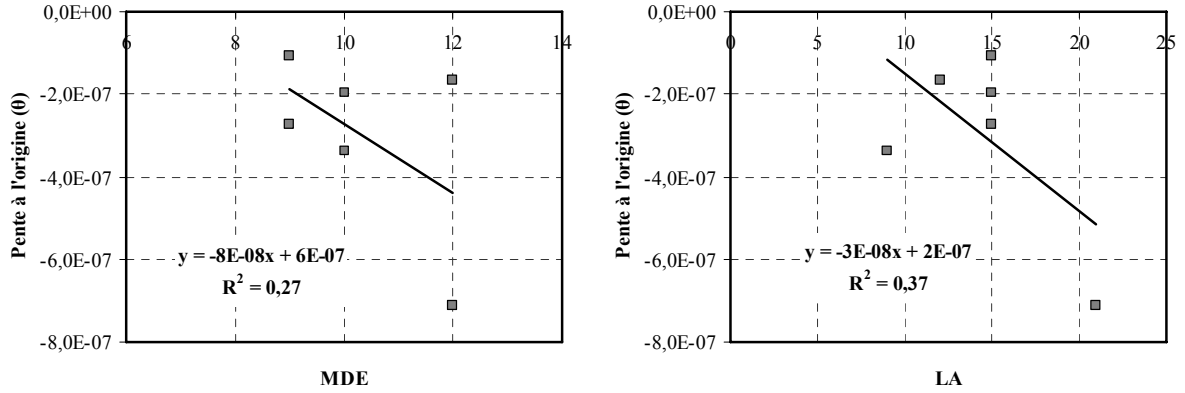



*Figure V.53 : Évolutions du paramètre de relief θ en fonction du MDE et LA pour le cas de six granulats, excepté le granulat F*

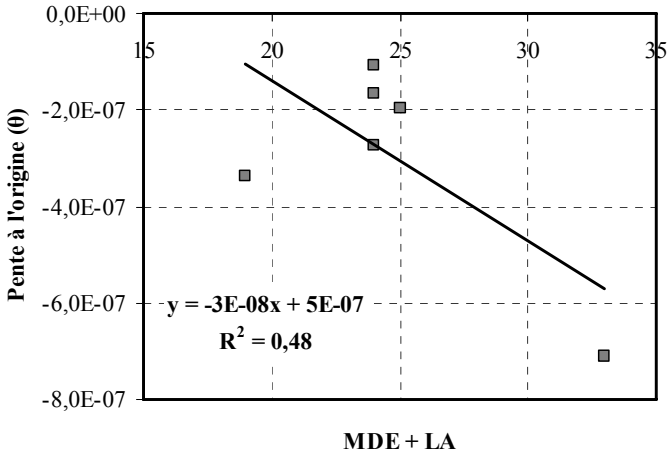



*Figure V.54 : Évolution du paramètre de relief θ en fonction du (MDE + LA) pour le cas de six granulats, excepté le granulat F*

### V.2.3.3 Forme (Cot α)

Le profil et l'échelle d'analyse sont les mêmes que pour le relief θ. Les comparaisons entre ce paramètre et le PSV sont d'abord montrées dans la Figure V.55. Dans cette figure, une bonne corrélation est observée. Quand le PSV est plus faible, la valeur absolue de la pente (à l'origine ou globale) est plus élevée.

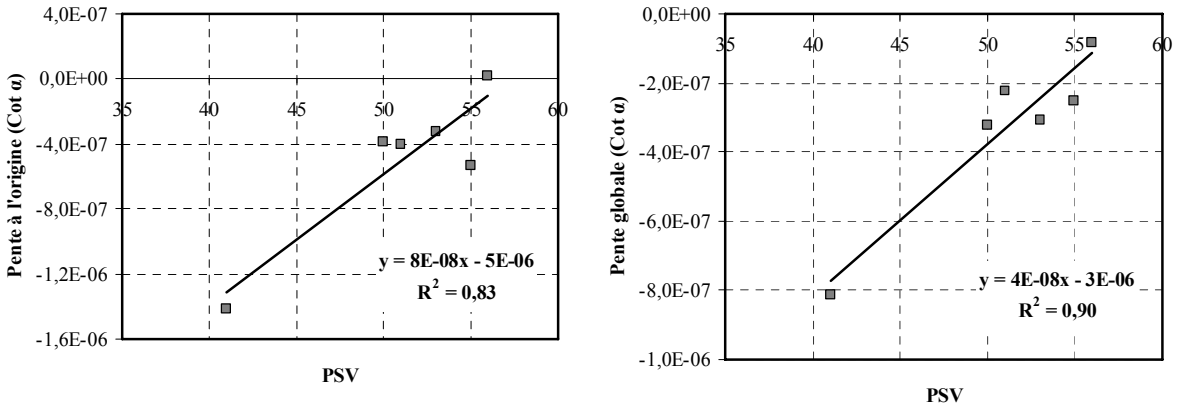



*Figure V.55 : Évolutions du paramètre de forme Cot α en fonction du PSV pour le cas de six granulats, excepté le granulat F*

Puis, les relations entre la forme Cot α et les paramètres mécaniques (MDE et LA) sont étudiées à la Figure V.56. Les corrélations sont faibles.

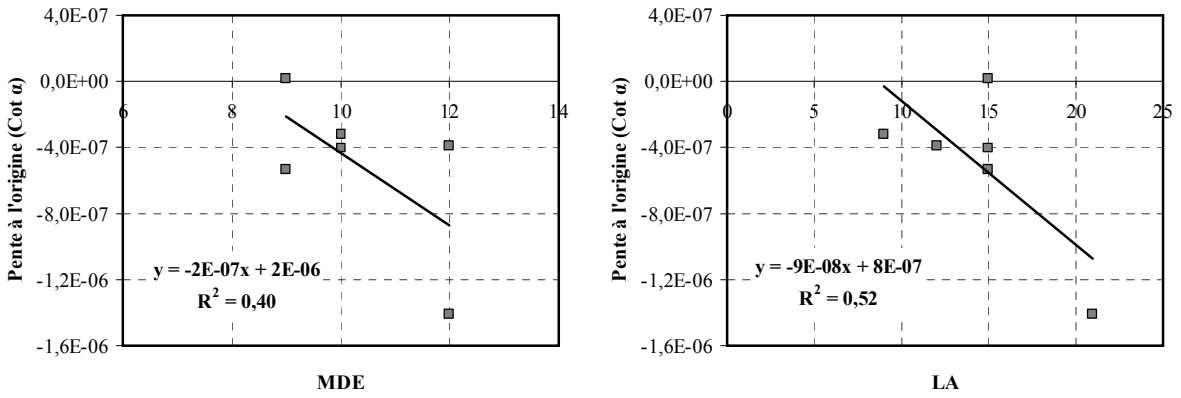



*Figure V.56 : Évolutions du paramètre de forme Cot α en fonction du MDE et LA pour le cas de six granulats, excepté le granulat F*

Selon la Figure V.57, on constate que la pente à l'origine dans la courbe du paramètre Cot α en fonction du nombre de rotations fournit une meilleure corrélation avec la somme (MDE + LA).

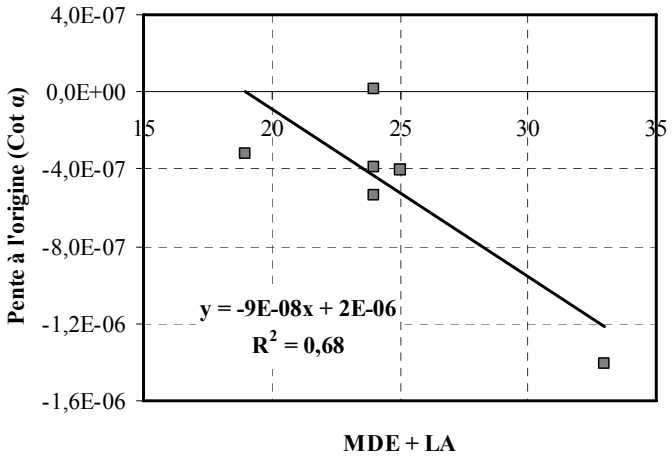



*Figure V.57 : Évolution du paramètre de forme Cot α en fonction du (MDE + LA) pour le cas de six granulats, excepté le granulat F*

### V.2.3.4 Densité (D)

Les relations concernant les caractéristiques des matériaux (MDE, LA et PSV) et la Densité sont montrées à la Figure V.58. Il faut mentionner que les paramètres sont calculés à l'échelle d'ondulation pour le profil seuillé. A partir de cette figure, aucune relation linéaire ne peut pas être établie avec les caractéristiques des matériaux choisis.

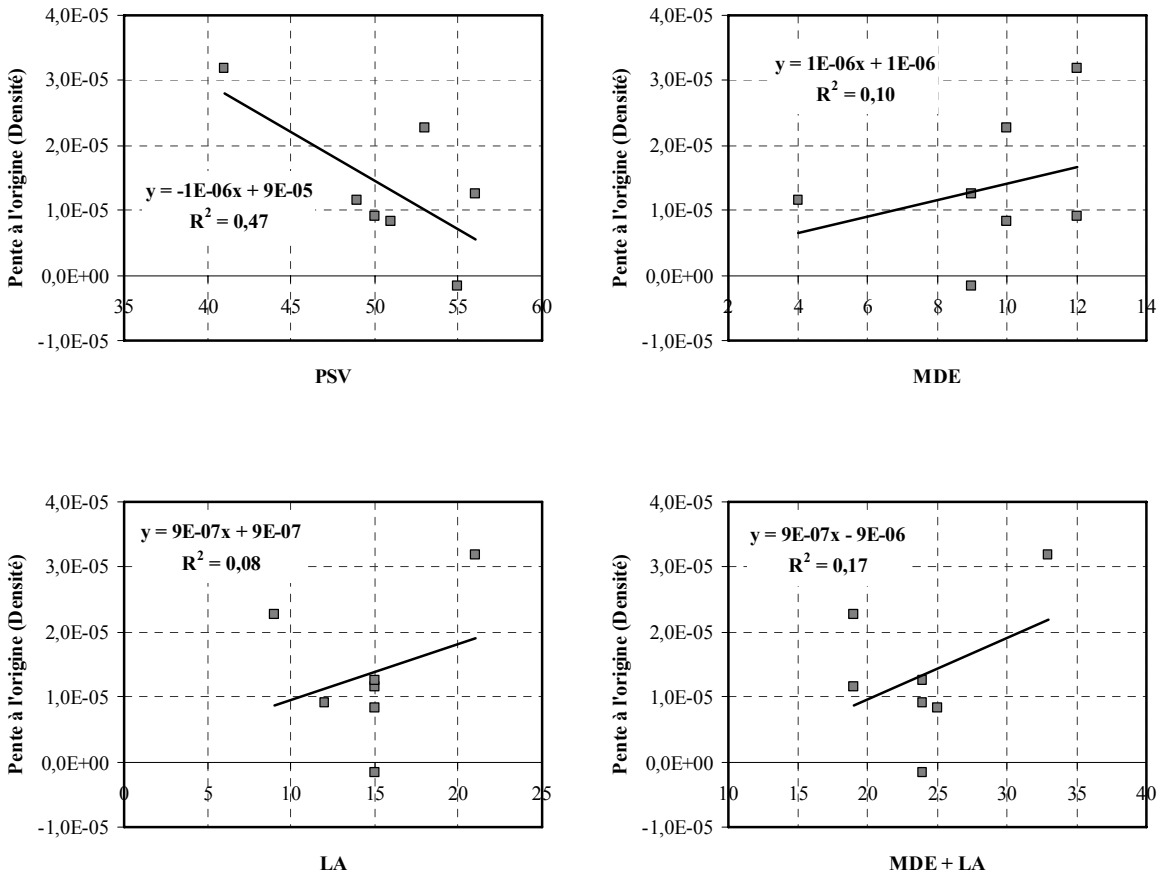



*Figure V.58 : Évolutions du paramètre Densité en fonction des caractéristiques des matériaux pour le cas de granulats*

## V.3 Synthèse sur l'analyse de la microtexture

Dans ce chapitre, on a tenté d'analyser l'influence de la microtexture sur l'évolution de l'adhérence. Quatre familles de paramètres de rugosité dont la hauteur ($R_a$ et $R_q$), la forme (Cot α), le relief (θ) et la Densité ont été étudiées. Tous les paramètres sont calculés à deux échelles d'analyse (ondulation et rugosité) et deux profils (entier et seuillé). En plus des comparaisons concernant les différentes échelles et les différents profils, les analyses sont aussi effectuées sur les échantillons à partir des différentes caractéristiques des matériaux, pour des mélanges bitumineux et les granulats seuls.

Les résultats montrent que tous les paramètres étudiés sont liés au frottement. D'un côté, les paramètres de hauteur ($R_a$ et $R_q$) et les paramètres d'indenteur (le relief θ et la forme Cot α) sont proportionnels au frottement $\mu_{ws}$. De l'autre côté, le paramètre Densité est inversement proportionnel au frottement $\mu_{ws}$.

Puis, les choix du profil et de l'échelle d'analyse sont effectués pour étudier chaque paramètre de rugosité. A partir de ces résultats, on a trouvé que les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ influencent principalement le frottement pour le profil entier. Pour les paramètres d'indenteur θ et Cot α, les évolutions relatives à l'échelle d'ondulation pour le profil seuillé sont plus représentatives de l'évolution du frottement.

Pour un granulat à fort le PSV, les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ affectent principalement l'évolution du frottement. Pour un granulat à PSV plus faible, les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ et les paramètres d'indenteur θ et Cot α sont bien liés au frottement. Globalement, les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ semblent les plus significatifs. Par ailleurs, la Densité influence moins l'évolution du frottement.

Pour mieux comprendre les variations des paramètres d'indenteur θ et Cot α, leurs distributions ont été étudiées, pour les granulats et les mélanges bitumineux. Il apparaît que les distributions du relief θ pour les granulats et les mélanges bitumineux (après décapage) sont très semblables, à différents stades de polissage. Pour le paramètre de forme Cot α, une légère différence est constatée entre les deux courbes de la distribution. Les courbes de distribution pour les mélanges bitumineux et les granulats montrent que :

- les paramètres d'indenteur θ et Cot α sont liés au frottement car les courbes de l'évolution du frottement pour les granulats et pour les enrobés, après avoir atteint un maximum, sont très proches ;
- ceci confirme le rôle important du granulat sur l'évolution du frottement.

Enfin, nous avons tenté de relier les paramètres de rugosité aux caractéristiques des matériaux. Les paramètres de hauteur $R_a$ et $R_q$ sont liés à la somme (MDE + LA). Quand la somme (MDE + LA) est plus grande, la hauteur des aspérités diminue plus rapidement avec le polissage. Puis, les paramètres d'indenteur (la forme Cot α et le relief θ) sont liés au PSV. Plus le PSV est plus faible, plus cite la courbe des paramètres d'indenteur θ et Cot α en fonction du nombre de rotations décroit. En parallèle, aucune relation n'est trouvée entre la Densité et les caractéristiques des matériaux.

# VI Lois d'évolution

Dans le chapitre précédent, nous avons tenté de relier l'évolution de la microtexture à celle du frottement. A partir des résultats obtenus, nous avons bien observé que les paramètres de rugosité étaient effectivement en relation avec le frottement, et ce en fonction du polissage. Les paramètres de rugosité sont associés aux caractéristiques mécaniques des granulats.

Un des objectifs de ce chapitre est de proposer un modèle analytique représentant les courbes d'évolution du frottement, qui sont simulées par la machine Wehner et Schulze. Afin de rendre le modèle plus opérationnel, par exemple pour prédire l'évolution de l'adhérence à partir des caractéristiques des matériaux, les relations entre les paramètres du modèle et les caractéristiques de matériaux sont d'abord établies.

Ensuite, pour simuler l'évolution de l'adhérence par le trafic en laboratoire, une relation entre la durée de polissage et le trafic réel est proposée. Cette relation linéaire empirique est proposée pour trois sites expérimentaux (Angers, Clisson et Coëx) suivis depuis leur construction et deux sites supplémentaires (Saint-Fulgent et Fontenay).

## VI.1 Modèles d'ajustement

### VI.1.1 Modèles existants

On constate à ce stade que le modèle prévoit une évolution monotone de l'adhérence, alors que nous avons vu précédemment que l'adhérence des chaussées bitumineuses présente généralement une phase croissante (correspondant au décapage des granulats) puis une phase décroissante (expliquée par le phénomène de polissage).

Rappelons que le modèle Huschek (cf. § II.2.5), seul modèle existant actuellement dans la littérature, a été construit à l'aide d'essais effectués par les appareils SRM et SCRIM sur route circulée pendant 10 ans.

$$\mu = a(t+1)^b \qquad \text{(VI.1)}$$

Cependant, il ne prend pas du tout en compte la partie « décapage » de l'enrobé. Sachant l'étude que nous menons dans cette thèse concerne l'ensemble des phases d'évolution de l'adhérence, notamment la partie décapage et polissage.

### VI.1.2 Proposition d'un nouveau modèle : le modèle LCPC

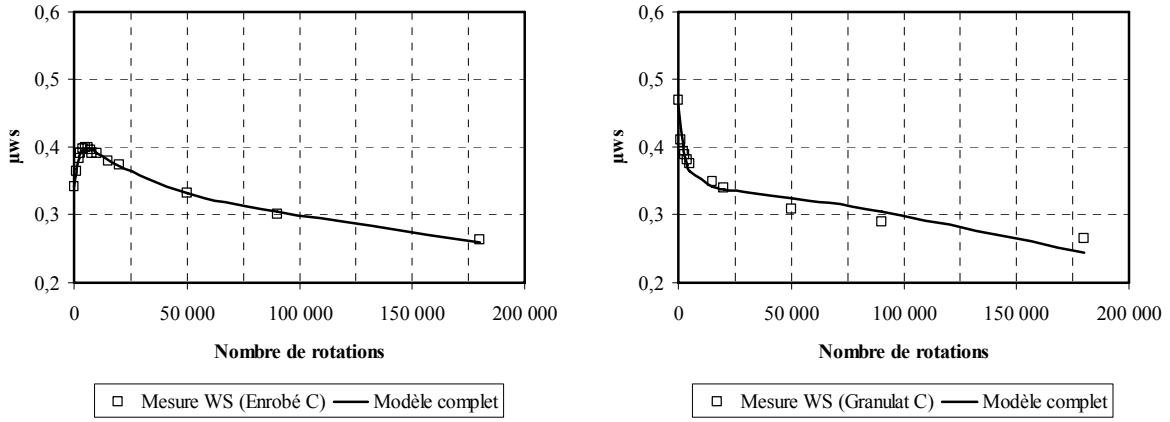
Après une série de rotations de polissage suivie de la mesure d'adhérence effectuée sur des carottes prélevées à la livraison de chantiers (cf. § III.2.1.1, page 78), la tendance générale d'évolution de l'adhérence avec le nombre de rotations de polissage qui s'en est dégagée peut être approchée par une expression analytique. Nous avons constaté selon la Figure IV.2 (cf. page 96) que le coefficient de frottement varie de la façon suivante : il croît, dans un premier temps, jusqu'à une valeur maximale, puis, il décroît avec le nombre de rotations (ou le trafic) jusqu'à atteindre une valeur limite. Cette évolution est constatée sur tous les échantillons neufs.

Ainsi, cette tendance nous a amené à proposer un modèle empirique d'évolution du coefficient de frottement avec le nombre de rotations de polissage [149] :

$$\mu_{WS} = a_1\left(e^{(-a_2 N)} - e^{(-a_3 N)}\right) - a_4 N + a_5 \qquad \text{(VI.2)}$$

où $\mu_{ws}$ est le coefficient de frottement mesuré avec la machine Wehner et Schulze ; $N$ est le nombre de rotations de polissage (ou le trafic) ; $a_i$ (i=1,… 4) sont les paramètres à déterminer par ajustement ; $a_5$ est le coefficient de frottement initial.

Ce modèle sera appelé par la suite « modèle complet ». L'ajustement de la formule (VI.2) aux résultats expérimentaux est satisfaisant (comme l'atteste la Figure VI.1a dans le cas d'un BBSG 0/10). Les ajustements relatifs aux autres échantillons pour les sites de Clisson, Coëx, Saint-Fulgent, Fontenay et les granulats sont présentés dans l'Annexe F (cf. pages 225 à 231).




**(a) Cas d'un BBSG 0/10, site d'Angers** **(b) Cas du granulat C (PSV = 53)**

*Figure VI.1 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »*

La corrélation pour tous les points de mesure au total de 364 points, et les ajustements de ce dernier par la formule (VI.2) est montrée à la Figure VI.2. A partir de cette corrélation, nous pouvons dire que le modèle complet est tout à fait justifié ($R^2$ = 0,98).

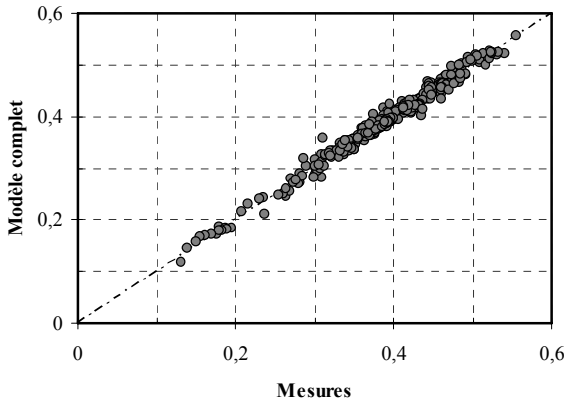



*Figure VI.2 : Corrélation entre les valeurs mesurées et ajustées à partir du modèle complet*

## VI.2 Vers une modélisation physique

### VI.2.1 Description du modèle

Dans la section II.2 (cf. page 49), nous avons déjà mentionné que l'évolution de l'adhérence est influencée par le décapage du liant, le polissage du granulat, l'effet du vieillissement et l'effet des variations saisonnières. Cette évolution pourrait être exprimée comme suit :

$$\mu(t, N) = \mu_B(t) + \mu_G(N) + \mu_s(t) \qquad \text{(VI.3)}$$

où $\mu(t, N)$ est le coefficient de frottement d'enrobé ; $\mu_B(t)$ est le coefficient de frottement de liant ; $\mu_G(N)$ est le coefficient de frottement de granulat ; $\mu_s(t)$ est la variation du coefficient de frottement due aux variations saisonnières.

La surface d'une chaussée neuve est complètement recouverte de bitume. Au cours du décapage, les granulats sont en partie découverts, puis complètement découverts après décapage (cf. Figure VI.3).

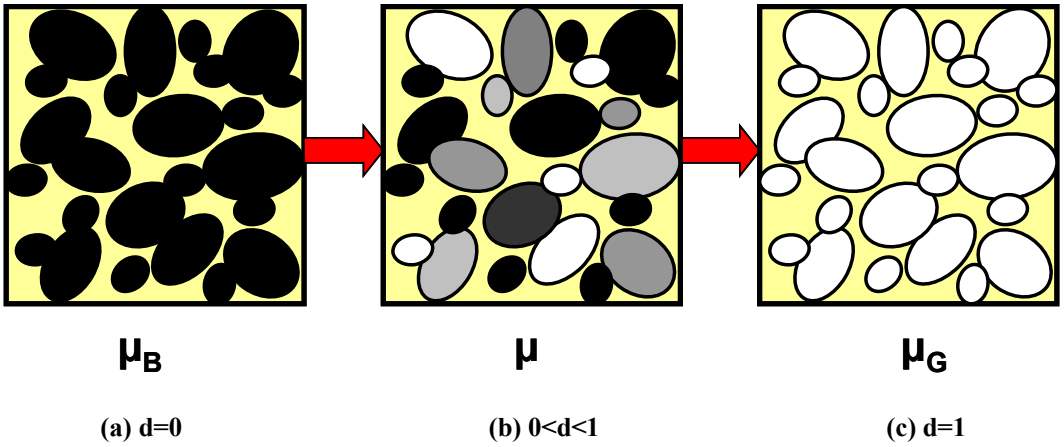



*Figure VI.3 : Processus de décapage*

Pour aborder la modélisation physique, nous formulons ainsi l'hypothèse stipulant que le frottement provient de l'effet des granulats et de celui du bitume. Nous supposons que l'aire de contact est répartie entre les granulats et le bitume. La répartition est exprimée par la fonction de décapage « *d* » qui doit être égale à 0 pour un enrobé neuf puis égale à 1 lorsque le liant est décapé. Pour prendre en compte le décapage du bitume par le polissage, « *d* » doit dépendre du cycle de polissage et éventuellement du temps (pour prendre en compte le durcissement de ce dernier par le vieillissement). De même, pour les mêmes raisons que la fonction de décapage, la fonction de frottement dû à l'effet du bitume doit aussi dépendre du nombre de cycles de polissage et du temps, alors que celle dû à l'effet des granulats ne dépendra que du nombre de cycles de polissage. L'effet des variations saisonnières est exclu dans cette étude, ainsi, toutes les mesures ont été prises à la même date de l'année. Cette hypothèse conduit à la formule suivante.

$$\mu(t, N) = [1 - d(t, N)]\,\mu_B(t) + d(t, N)\,\mu_G(N) \qquad \text{(VI.4)}$$

où $\mu(t, N)$ est le coefficient de frottement d'enrobé ; $\mu_B(t)$ est le coefficient de frottement de liant ; $\mu_G(N)$ est le coefficient de frottement de granulat ; $d(t, N)$ est une fonction de décapage, présente le pourcentage du granulat sur la surface d'enrobé. La valeur de cette fonction est égale à 0 avant le polissage pour un enrobé neuf (cf. Figure VI.3a). Elle est égale à 1 lorsque le liant est décapé (cf. Figure VI.3c).

On aurait pu procéder par identification, par rapport au modèle LCPC proposé plus haut, pour retrouver les fonctions « *d* » et « $\mu_B$ ». Mais nous avons opté pour une identification directe de ces fonctions par rapport aux résultats de mesure.

## VI.2.2 Identification des fonctions élémentaires

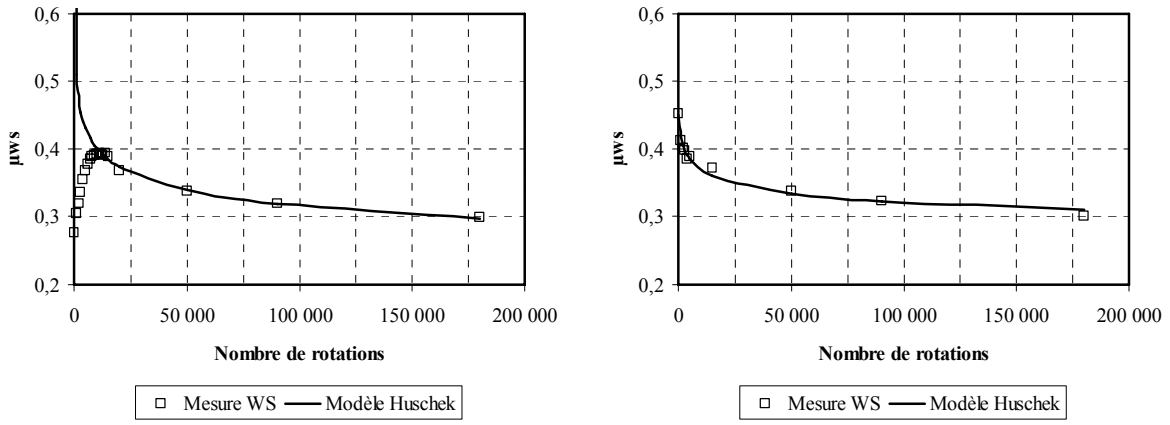
### VI.2.2.1 Fonction d'usure

Nous avons donc essayé d'appliquer le modèle Huschek avec nos résultats obtenus sur des carottes prélevées *in situ*. En effet, la relation entre la durée de polissage et le trafic n'est pas explicitée dans son travail. Nous supposons que l'évolution du frottement en fonction du nombre de rotations peut se décrire à l'aide de la formule (VI.1). Le modèle Huschek est donc adapté comme suit :

$$\mu = a(N + b)^c \qquad \text{(VI.5)}$$

où $\mu$ est le coefficient de frottement mesuré par des appareils d'auscultation ; $N$ est le nombre de rotations de la machine Wehner et Schulze ; $a$, $b$, $c$ sont les coefficients à déterminer par ajustement.

La Figure VI.4 montre une comparaison des courbes d'évolution entre la mesure et l'ajustement donné par le modèle Huschek modifié. Les autres comparaisons sont données dans l'Annexe G. Nous pouvons constater que les ajustements avec le modèle Huschek modifié sont satisfaisants pour le granulat et pour l'enrobé après le décapage.




**(a) Cas d'un BBTM 0/10, site de Clisson** **(b) Cas du granulat D (PSV = 51)**

*Figure VI.4 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek modifié*

Une autre possibilité est de simplifier le modèle d'ajustement à cinq paramètres (modèle LCPC complet). Ce nouveau modèle d'ajutement à quatre paramètres, dit « Modèle LCPC simplifié », est présenté dans l'Annexe H (cf. page 242). Parallèlement, on a tenté de relier les paramètres de ce modèle aux caractéristiques des matériaux (cf. Annexe I, page 252).

### VI.2.2.2 Fonction du vieillissement

Les sites expérimentaux suivis sont ceux du site d'Angers (granulat C), du site de Clisson (granulat D) et du site de Coëx (granulat B). Pour identifier la fonction de vieillissement, des carottes ont prélevées à l'état neuf du revêtement, puis exposées sur le toit d'un local situé sur la piste du LCPC ou prélevées directement sur la rive (carottes extraites sur la bande d'arrêt d'urgence, en supposant qu'il n'y a pas de trafic sur cette partie de la chaussée). Nous supposons le variation du frottement est due exclusivement au vieillissement. La Figure VI.5 montre les évolutions des carottes des sites expérimentaux prélevées directement sur rive.

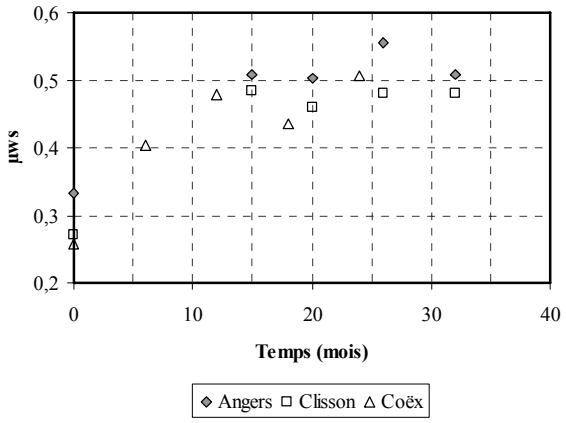



*Figure VI.5 : Évolution du frottement en rive sur la route*

Pour chaque site, nous constatons une augmentation marquée des coefficients de frottement en fonction du temps. Cette augmentation du coefficient de frottement est d'environ de 0,2 unité. On peut noter que l'effet du vieillissement sur les trois sites est le même dans les premiers 15 mois. Les gains engendrés sont légèrement différents en fonction du type d'enrobé et ils semblent se stabiliser après une période de 15 à 20 mois.

Parallèlement le vieillissement des carottes exposées sur la piste de glissance du LCPC donne à peu de chose près les mêmes évolutions (cf. Figure VI.6).

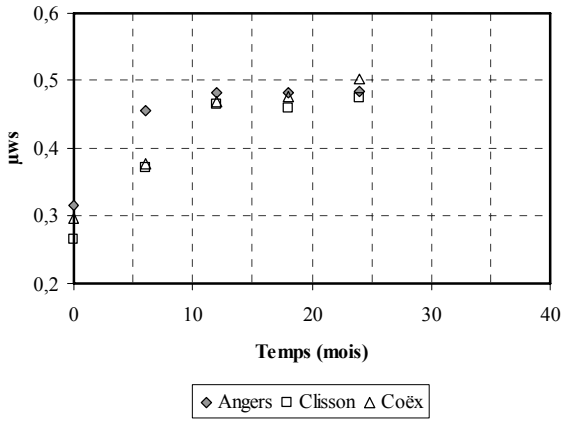



*Figure VI.6 : Évolution du frottement sur la piste de glissance du LCPC Nantes*

En comparant les évolutions du frottement par site (cf. Figure VI.7), on peut raisonnablement supposer que le vieillissement a le même effet sur les enrobés quel que soit le site.

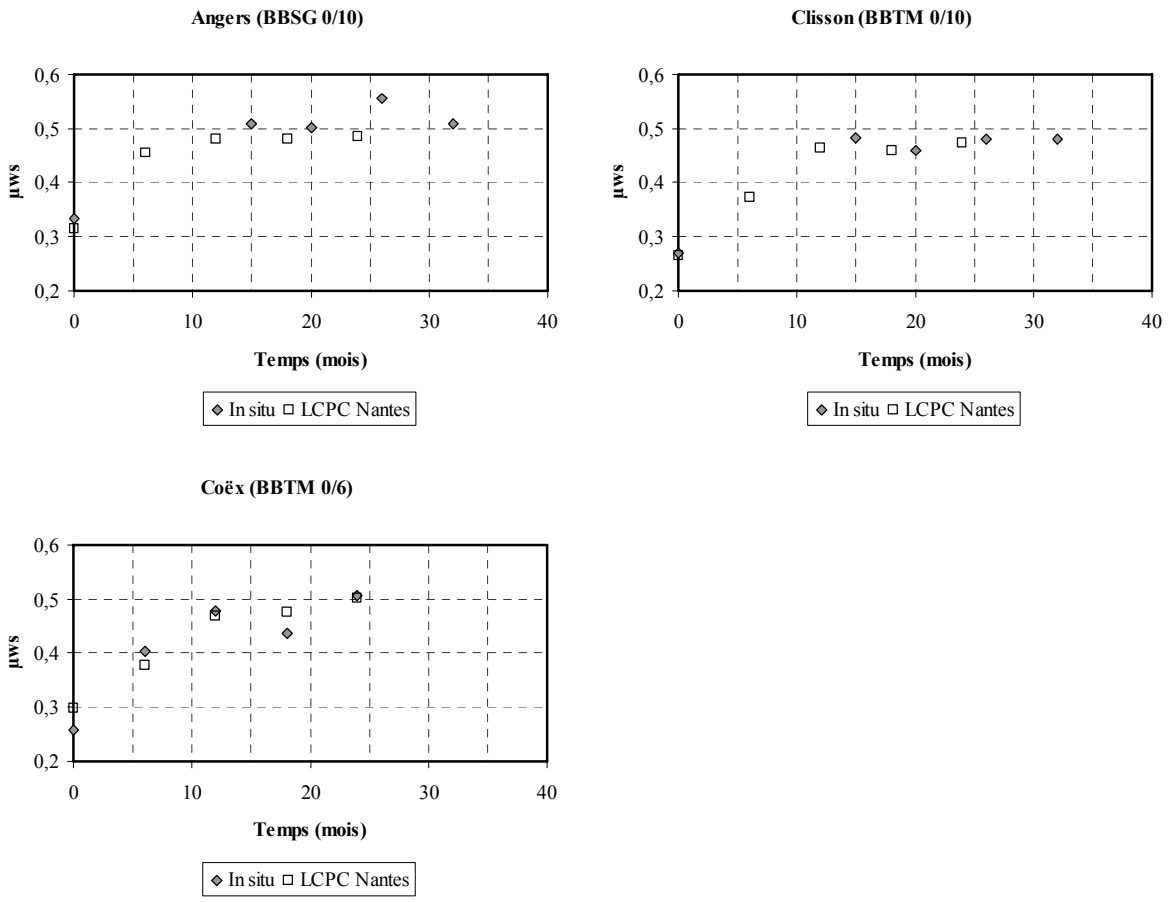



*Figure VI.7 : Comparaison entre les courbes d'évolution du frottement sur la piste de glissance du LCPC Nantes et en rive sur la route*

A partir de la forme des courbes d'évolution du frottement du bitume, la loi proposée est :

$$\mu_B = \mu_0 + \mu_v \qquad \text{(VI.6)}$$

Avec $\mu_v$, fonction de vieillissement représentée par l'expression suivante :

$$\mu_v = \mu_1 \left[ 1 - e^{\left(-\frac{t}{\alpha}\right)} \right] \qquad \text{(VI.7)}$$

où $\mu_0$ est le coefficient de frottement de bitume initial, mesuré sur un enrobé neuf ; $\mu_v$ est le supplément de coefficient de frottement de bitume dû au vieillissement ; $t$ est le temps, exprimé en mois ; $\mu_1$ est la valeur limite de $\mu_v$ ; $\alpha$ est le temps caractéristique, à déterminer par ajustement.

La Figure VI.8 montre que la courbe d'évolution de la formule (VI.7) représente bien les mesures de frottement obtenues sur les carottes prélevées en rive pour les trois sites.

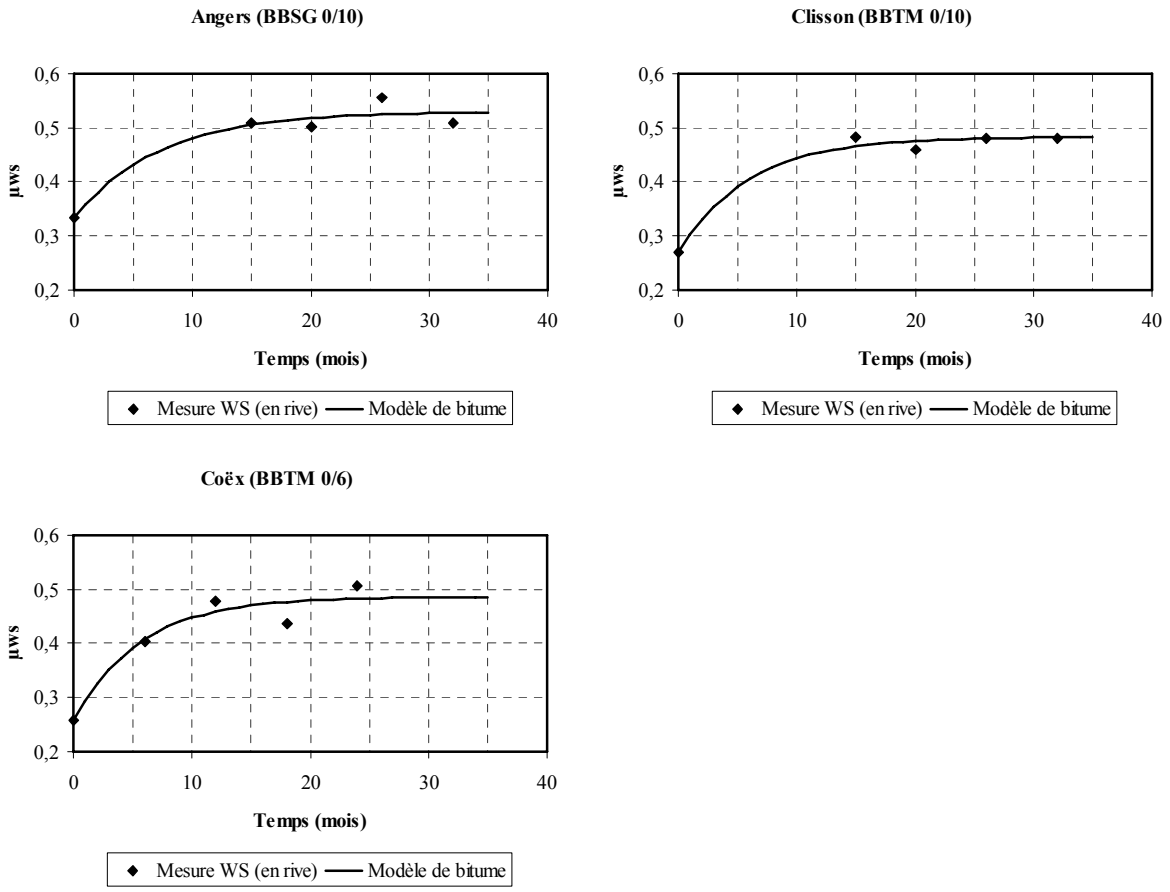



*Figure VI.8 : Expression de la fonction du bitume $\mu_B$ tenant compte du vieillissement*

Les paramètres $\mu_1$ et $\alpha$ dans la formule (VI.7) sont donnés dans le Tableau VI.1. Nous constatons que le paramètre $\mu_1$ est d'environ 0,2. Ce paramètre représente l'incrément du

coefficient de frottement par l'effet du vieillissement. Nous supposons qu'il dépend du liant, et des conditions extérieures

| Site | $\mu_1$ | $\alpha$ |
|---|---|---|
| Angers | 0,20 | 7,14 |
| Clisson | 0,21 | 6 |
| Coëx | 0,23 | 5,62 |

*Tableau VI.1 : Paramètres $\mu_1$ et $\alpha$ de la fonction d'évolution du bitume*

### VI.2.2.3 Fonction de décapage

Pour évaluer la fonction de décapage, nous disposons d'essais de polissage sur les carottes neuves prélevées sur les sites expérimentaux et sur des galettes composées des mêmes granulats. Dans ce contexte, il n'y en a pas encore de vieillissement. Ainsi la fonction de décapage est déduite des résultats d'essai à partir de l'expression suivante, déduite de la formule générale du frottement :

$$d = \frac{\mu - \mu_0}{\mu_G - \mu_0} \qquad \text{(VI.8)}$$

Rappelons que l'essai de polissage et la mesure de frottement $\mu$ sont faits en laboratoire. Avant le polissage, la première mesure de frottement sur la carotte d'enrobé est nommée $\mu_0$. Le polissage et la mesure de frottement $\mu_G$ sont faits sur la galette de gravillons (cf. § III.2.2.3, page 87).

En théorie, la variable « d » commence à 0. A ce moment, le coefficient de frottement d'enrobé $\mu$ est égal à celui du bitume $\mu_0$. Ensuite, il augmente jusqu'au décapage du liant. Après le décapage, la courbe d'évolution pour l'enrobé relie à celle du granulat. Le $\mu$ est égal au coefficient de frottement de granulat $\mu_G$. La variable « d » est donc égale à 1.

Cependant, la variable « d » n'évolue pas toujours suivant cette variation dans la réalité (cf. Figure VI.9). Pour les cas de Clisson et Coëx, la variable « d » ne reste pas à la valeur 1 après le décapage. En effet, les points de mesure sur les échantillons d'enrobé et de granulat ne se rapprochent pas parfaitement (cf. Figure IV.2, page 96). Pour les cas d'Angers et Saint-Fulgent, la variable « d » augmente énormément avant le décapage car la courbe d'évolution du granulat descend très vite au début du polissage. Elle est au dessous de la courbe d'évolution d'enrobé. Pour le site de Saint-Fulgent, la courbe d'évolution du granulat frotte sur celle d'enrobé. Pour simplifier cette question, nous proposons une fonction exponentielle avec la limitation de la variable « d » ($0 \leq d \leq 1$) :

$$d = 1 - e^{\left(-\frac{N}{\beta}\right)} \qquad \text{(VI.9)}$$

où $N$ est le nombre de rotations WS ; $\beta$ est un paramètre à déterminer par ajustement.

Après l'ajustement, le paramètre β peut être donné pour ces trois sites : 1100 (Angers), 3600 (Clisson), 6100 (Coëx) et 580 (Saint-Fulgent).

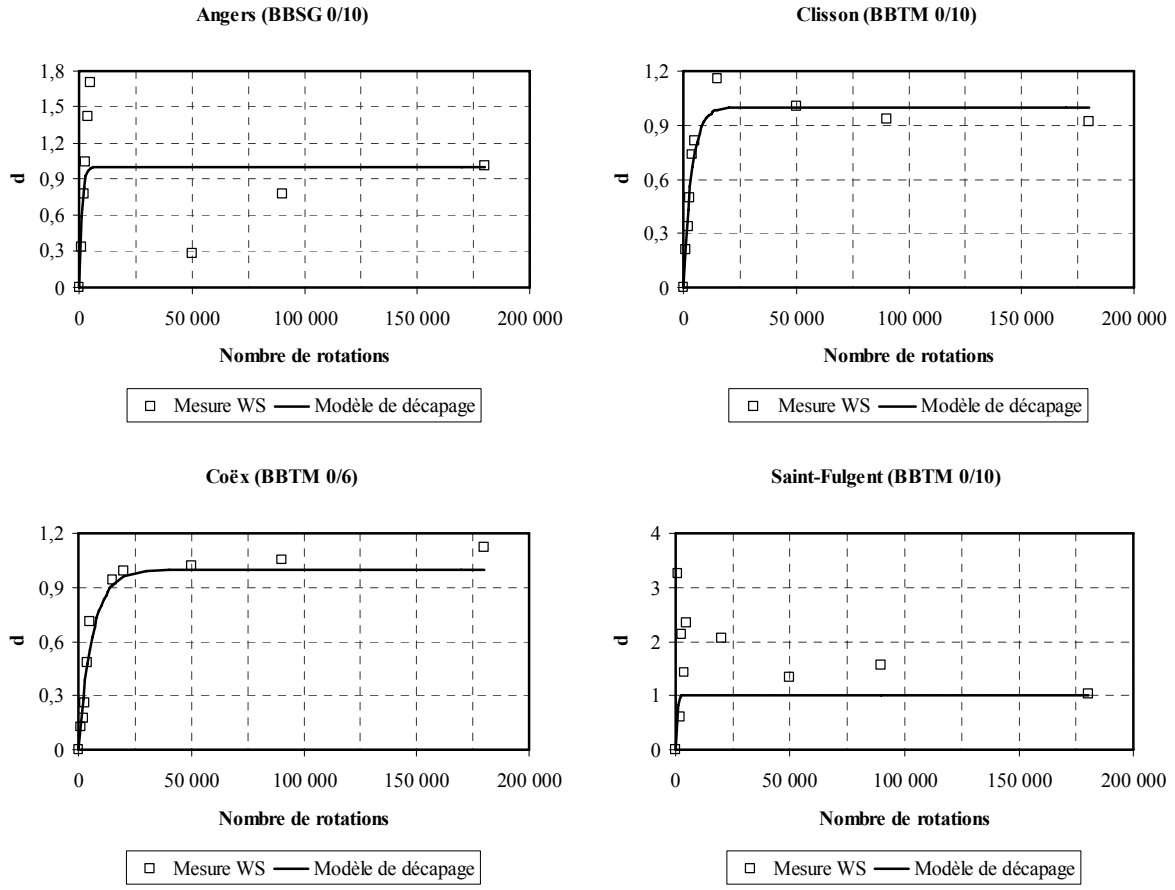



*Figure VI.9 : Expression de la fonction « d »*

### VI.2.3 Validation du modèle

Nous avons proposé une formule physique (VI.4) pour exprimer l'évolution de l'adhérence, qui prend en compte les phénomènes de décapage et de vieillissement, mais pas les variations saisonnières. Toutes les fonctions ont été calibrées sur des essais qui permettent de séparer les phénomènes : le vieillissement du bitume (VI.6), l'usure du granulat (VI.5) et le décapage (VI.9). Dans cette section, les comparaisons entre le modèle physique et les mesures de frottement WS en laboratoire sont faites sur les sites (Angers, Clisson, Coëx et Saint-Fulgent). Rappelons que les mesures de frottement WS en laboratoire sont faites sur les échantillons d'enrobé neufs pour trois sites (Angers, Clisson et Coëx). Elles sont faites sur les échantillons prélevés en rive après six ans de trafic pour le site de Saint-Fulgent. Donc, nous allons séparer deux cas pour valider le modèle physique. En effet, on cale d'abord le terme $\mu_G$ sur l'essai de granulat, puis le terme $\mu_B$ sur l'essai effectué sur les carottes extraites des BAU, puis on cale la vitesse de décapage.

### VI.2.3.1 Angers, Clisson et Coëx

Pour ces trois sites, il n'y a pas de terme du vieillissement dans la formule (VI.4). Le terme $\mu_0$ est le coefficient de frottement initial pour l'échantillon d'enrobés neuf. La Figure VI.10 montre que ce modèle physique fonctionne bien pour simuler la courbe de simulation après le décapage. Pour le site de Coëx, l'accord est très bon. Pour les sites d'Angers et Clisson, la courbe du modèle rejoint la courbe de simulation au début du polissage. Puis, la courbe du modèle atteint un maximum plus vite que cette de simulation. En outre, le maximum de la courbe du modèle est inférieur à celui de la courbe de simulation. En effet, la courbe d'évolution pour le granulat descend très vite (cf. Figure IV.2, page 96). Elle tombe au dessous de la courbe d'évolution de l'enrobé. Car la courbe du modèle physique reprend la courbe du granulat après le décapge. C'est pourquoi la courbe du modèle physique évolue différemment par rapport à celle de simulation.

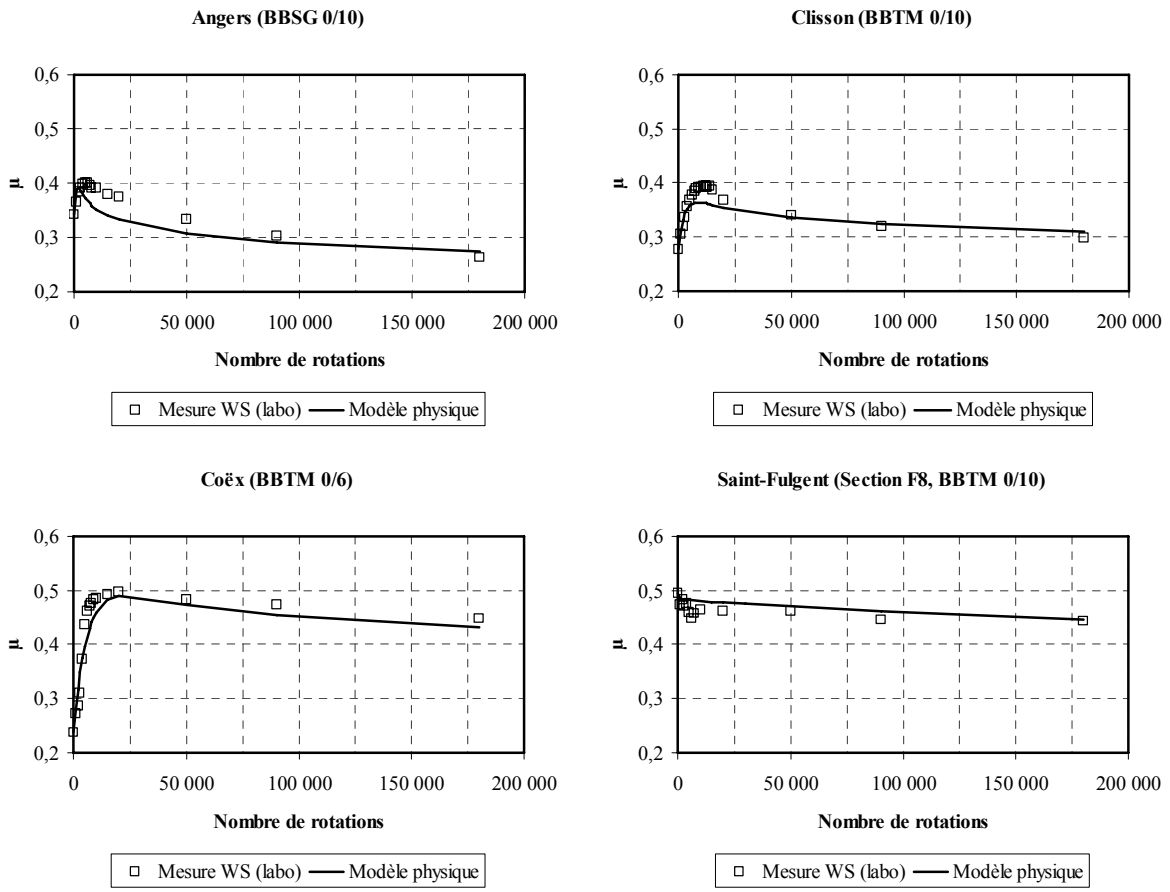



*Figure VI.10 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle physique*

### VI.2.3.2 Site de Saint-Fulgent

Pour le site de Saint-Fulgent, le coefficient de frottement initial est plus élevé sur l'échantillon d'enrobé prélevé *in situ* (à six ans de trafic) que celui sur l'échantillon

neuf. L'effet du vieillissement doit être pris en compte. Dans la formule (VI.4), le terme $\mu_B$ est mesuré sur l'échantillon d'enrobé prélevé en rive à six ans de trafic. La courbe du modèle relie très bien à celle de la courbe de simulation.

## VI.3 Relation entre la durée de polissage et le trafic

### VI.3.1 Démarche

Pour appliquer le modèle d'évolution aux chaussées soumises au trafic réel, il est nécessaire de trouver une relation entre la durée de polissage WS et le trafic. Pour ce faire, une carotte (Ai) est prélevée à la livraison d'une chaussée, c'est-à-dire avant l'ouverture à la circulation, puis cette carotte est soumise au polissage WS. Après la mise en circulation, de cette même chaussée, une carotte (Bi) est prélevée tous les six mois dans la bande de roulement (BDR) et le frottement WS est mesuré. Ainsi, la comparaison entre les courbes d'évolution issues des carottes (Ai) et (Bi) permettent de corréler le nombre de rotations WS et le trafic.

La carotte (Ai) est prélevée avant ouverture à la circulation; aucun effet de vieillissement ni des variations saisonnières n'influence les essais de polissage pratiqués. En outre, l'influence de l'effet du vieillissement doit être considérée sur le frottement relatif à la carotte (Bi). Donc, les résultats d'essai sur la carotte (Ai) doivent être corrigés en y rajoutant l'effet du vieillissement.

Nous formulons l'hypothèse de proportionnalité entre le trafic de poids lourds (TCPL) et le nombre de cycle de polissage WS (N). Ainsi, la relation proposée est la suivant :

$$N = k \times TCPL \qquad \text{(VI.10)}$$

où *TCPL* est le trafic poids lourd cumulé, *i.e.* nombre de véhicules poids lourds par voie ; *N* est le nombre de rotations de la machine WS ; *k* est le paramètre à déterminer par ajustement.

Dans ce chapitre, le travail est principalement focalisé sur la détermination du paramètre « k ». Dans un premier temps, nous tentons de trouver le paramètre variable « k » pour bien superposer les points de mesure WS en BDR sur la courbe de simulation en laboratoire. Rappelons que la courbe de simulation en laboratoire est présentée par le modèle d'ajustement. Pour les sites d'Angers, Clisson et Coëx, il faut ajouter le terme du vieillissement sur la courbe simulée. Pour les sites de Saint-Fulgent et Fontenay, le terme du vieillissement n'est pas pris en compte; comme les carottes sont vieilles de plus de 6 ans, le veillissement est déjà effectué.

Puis, dans un deuxième temps, nous utilisons une seule valeur du paramètre « k » pour tous les sites. A chaque fois, cinq sites expérimentaux sont testés.

Les valeurs de « k » sont obtenues en minimisant, par la méthode des « moindres carrés », la distance de l'ensemble des points $\mu$(TCPL) et $\mu_{ws}$ pour chaque site (cf. Figure VI.11.) :

$$S^2 = \sum_{i=1}^{n} \left[\mu_i^m(\text{BDR, TCPL}) - \mu_i^c(\text{BDR, TCPL})\right]^2 \qquad \text{(VI.11)}$$

où $S^2$ est la somme des carrés des résidus $S_i$ ; $S_i$ est la distance du point de mesure WS en BDR à la courbe de simulation ; $n$ est le nombre de points de mesure WS en BDR ; $\mu_i^m(BDR, TCPL)$ est le coefficient de frottement mesuré WS au i$^{ème}$ point, mesuré sur la carotte prélevée en BDR après un certain trafic (exprimé en TCPL) ; $\mu_i^c(BDR, TCPL)$ est le coefficient de frottement corrigé WS au i$^{ème}$ point, correspondant à la valeur mesurée sur la courbe de simulation.

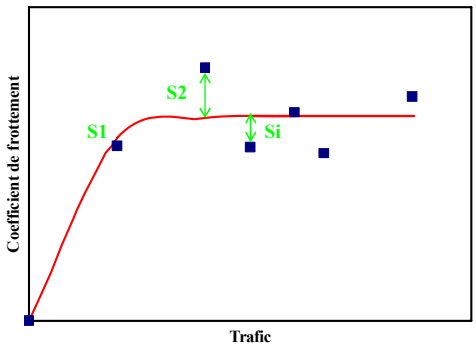



*Figure VI.11 : Schéma de superposition*

### VI.3.1.1 Sites d'Angers, Clisson et Coëx

Pour ces trois sites, la courbe de simulation en laboratoire est obtenue sur les carottes prélevées *in situ* avant la circulation. L'effet du vieillissement n'existe pas sur cette courbe de simulation. Or, les mesures de frottement WS sur les carottes prélevées en BDR sont influencées par l'effet du vieillissement. Un terme de vieillissement « $(1 - d)\ \mu_v$ » est donc ajouté aux valeurs de $\mu_{ws}$ obtenues en laboratoire.

### VI.3.1.2 Sites de Saint-Fulgent et Fontenay

Pour ces deux sites, la courbe de simulation sur la carotte prélevée en rive est une fonction décroissante. Nous n'observons pas de partie de décapage. En effet, les carottes sont prélevées après quelques années de circulation. Le liant de ces échantillons est fragile à cause du vieillissement. Lorsque les échantillons sont soumis à la mesure du frottement, le liant est enlevé par la tête de mesure au premier contact. La mesure du frottement WS est directement effectuée sur la surface du granulat couvert. Donc, sur ces carottes en rive, nous n'observons ni le décapage du liant, ni l'effet du vieillissement. Pour les carottes prélevées en BDR, le liant a été décapé par le trafic, car le prélèvement a été fait après des années de circulation. Ainsi, nous n'avons pas, là non plus, à tenir compte du vieillissement.

Pour mieux comparer les résultats obtenus en laboratoire et sur le terrain, nous utilisons des mesures de frottement CFL et CFT obtenues à partir des campagnes de suivis d'adhérence annuels. Il est alors nécessaire de « convertir » les valeurs de $\mu_{ws}$ en valeur équivalente de CFL et de CFT. Nous utilisons pour cela un modèle proposé par Huschek [109], qui relie le frottement CFL(80) mesuré par l'appareil allemand au frottement WS :

$$\mathrm{CFL}(80) = 1{,}037\mu_{ws} - 0{,}013 \qquad \text{(VI.12)}$$

où *CFL(80)* est le coefficient de frottement longitudinal mesuré par l'appareil allemand à la vitesse de 80 km/h et $\mu_{ws}$ le coefficient de frottement mesuré par la machine WS.

Rappelons que le frottement CFL est mesuré par l'appareil allemand SRM dans cette relation. Dans notre étude, nous avons accepté pour la relation entre le frottement CFL mesuré par l'appareil ADHERA et le frottement WS. Pour ces deux sites, les frottements CFL sont mesurés à la vitesse de 40, 60 et 90 km/h. Cependant, nous appliquons la formule (VI.12) aux frottements mesurés à la vitesse de 80 km/h. Il est nécessaire d'interpoler le frottement CFL(80) à l'aide des mesures CFL(60) et CFL(90). Cette expression est donnée :

$$\mathrm{CFL}_i^{ip}(\mathrm{TCPL}, 80) = \mathrm{CFL}_i(60) + \frac{(80-60)}{(90-60)}\left[\mathrm{CFL}_i(90) - \mathrm{CFL}_i(60)\right] \qquad \text{(VI.13)}$$

où $CFL_i^{ip}(TCPL, 80)$ est le coefficient de frottement longitudinal corrigé au $i^{ème}$ point en BDR après un certain nombre de passages de poids lourds (exprimé en TCPL), à la vitesse de 80 km/h, estimé par interpolation ; $CFL_i(60)$ et $CFL_i(90)$ sont les coefficients de frottement longitudinaux aux vitesses de 60 km/h et 90 km/h, respectivement.

Pour valider la relation de Huschek (VI.12), nous avons utilisé les deux sites de Saint-Fulgent et de Fontenay. Rappelons que les carottes de ces deux sites sont prélevées en BDR après un certain trafic. On peut donc convertir les mesures de frottement WS sur ces carottes en frottement CFL80 par la formule (VI.12), et les comparer aux mesures de suivi annuel. A l'exception de deux cas (BBSG et BBTM type 1 de Fontenay ; voir Annexe J), on constate dans la Figure VI.12 que les points WS suivent bien la tendance d'évolution des points CFL.

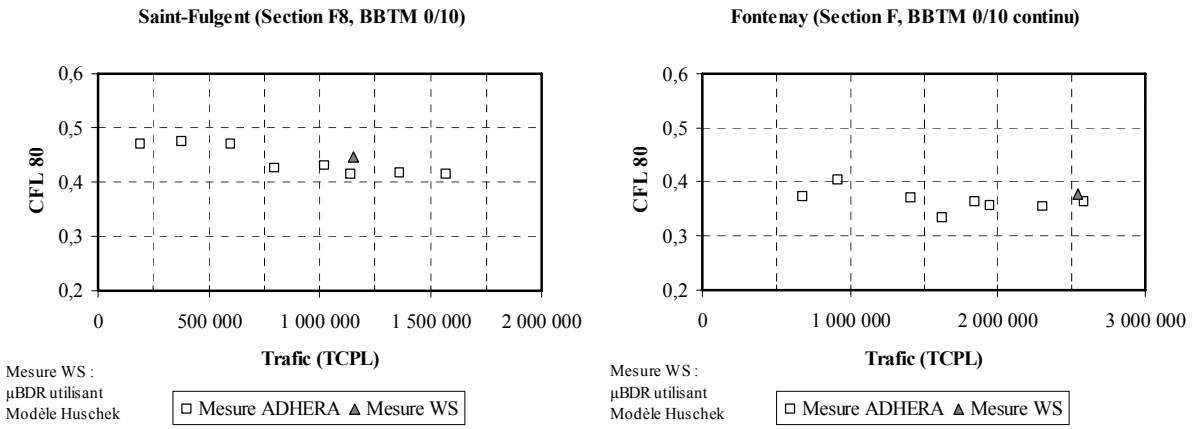



*Figure VI.12 : Validation de la relation CFL80/$\mu_{ws}$*

## VI.3.2 Relation avec le paramètre « k » variable

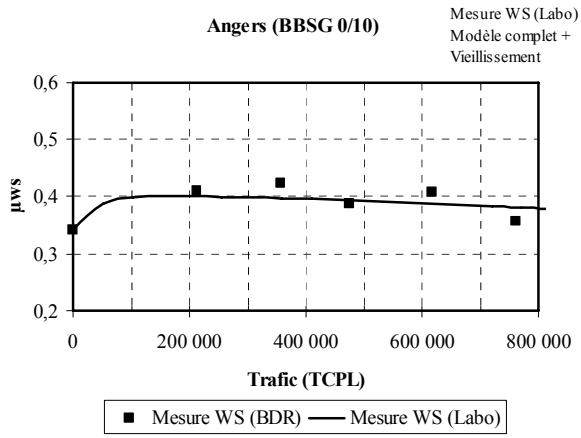
Nous cherchons le paramètre « k » en minimisant la somme des $Si^2$ pour chaque site. Une fois le paramètre « k » déterminé, nous pouvons prédire l'évolution de l'adhérence *in situ* à l'aide de la courbe de simulation en laboratoire.

### VI.3.2.1 Sites d'Angers, Clisson et Coëx

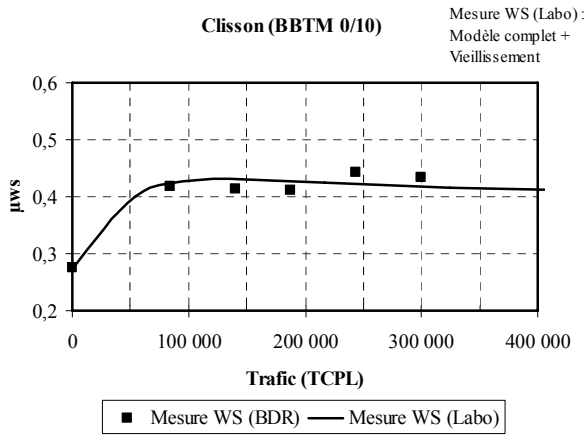
Les caractéristiques de ces trois sites expérimentaux ont été déjà données dans le chapitre III (cf. page 78). Les sites d'Angers (BBSG 0/10) et Clisson (BBTM 0/10) sont suivis depuis deux ans et demi et celui de Coëx (BBTM 0/6) depuis deux ans. Les coefficients de la formule (VI.2) sont récapitulés du Tableau VIII.9 au Tableau VIII.13 (cf. Annexe F, page 232). ). L'évolution de frottement pour chaque site a été montrée.

Les points de mesure de frottement WS en BDR sont superposés sur la courbe de simulation pour chaque site (cf. Figure VI.13). La superposition est faite par ajustement du paramètre « k ». A partir de ces figures, nous constatons que les points de mesure de frottement en BDR suivent bien à la courbe de simulation.

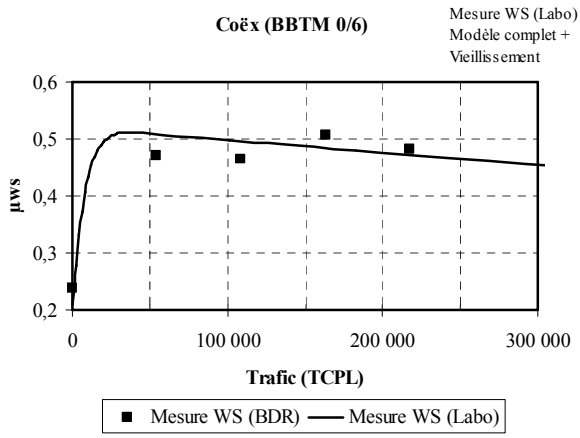
Par ailleurs, du Tableau VIII.25 au Tableau VIII.27 (cf. Annexe K, page 268) montrent les valeurs calculées du coefficient de frottement WS (cf. § VI.3.1) et les résidus de la formule (VI.11).




**k = 0,019, écart-type : 0,015**




**k = 0,018, écart-type : 0,015**




**k = 0,493, écart-type : 0,032**

*Figure VI.13 : Comparaisons entre les évolutions réelles et simulées des sites d'Angers, Clisson et Coëx avec les paramètres « k » variables*

### VI.3.2.2 Site de Saint-Fulgent

Les carottes de ce site sont prélevées en BDR (bande de roulement) et en rive (bande d'arrêt d'urgence) après six ans de circulation. Les descriptions de cinq revêtements BBTM 0/10 de ce site ont été déjà montrées dans la section III.2.1.5 (cf. page 81). Les essais de polissage et les mesures de frottement sont effectués sur les carottes prélevées en rive. Notons que leur évolution de l'adhérence sur les courbes est de nature décroissante (cf. Figure VIII.35, Annexe F, page 226). Une mesure de frottement est effectuée sur les carottes prélevées en BDR.

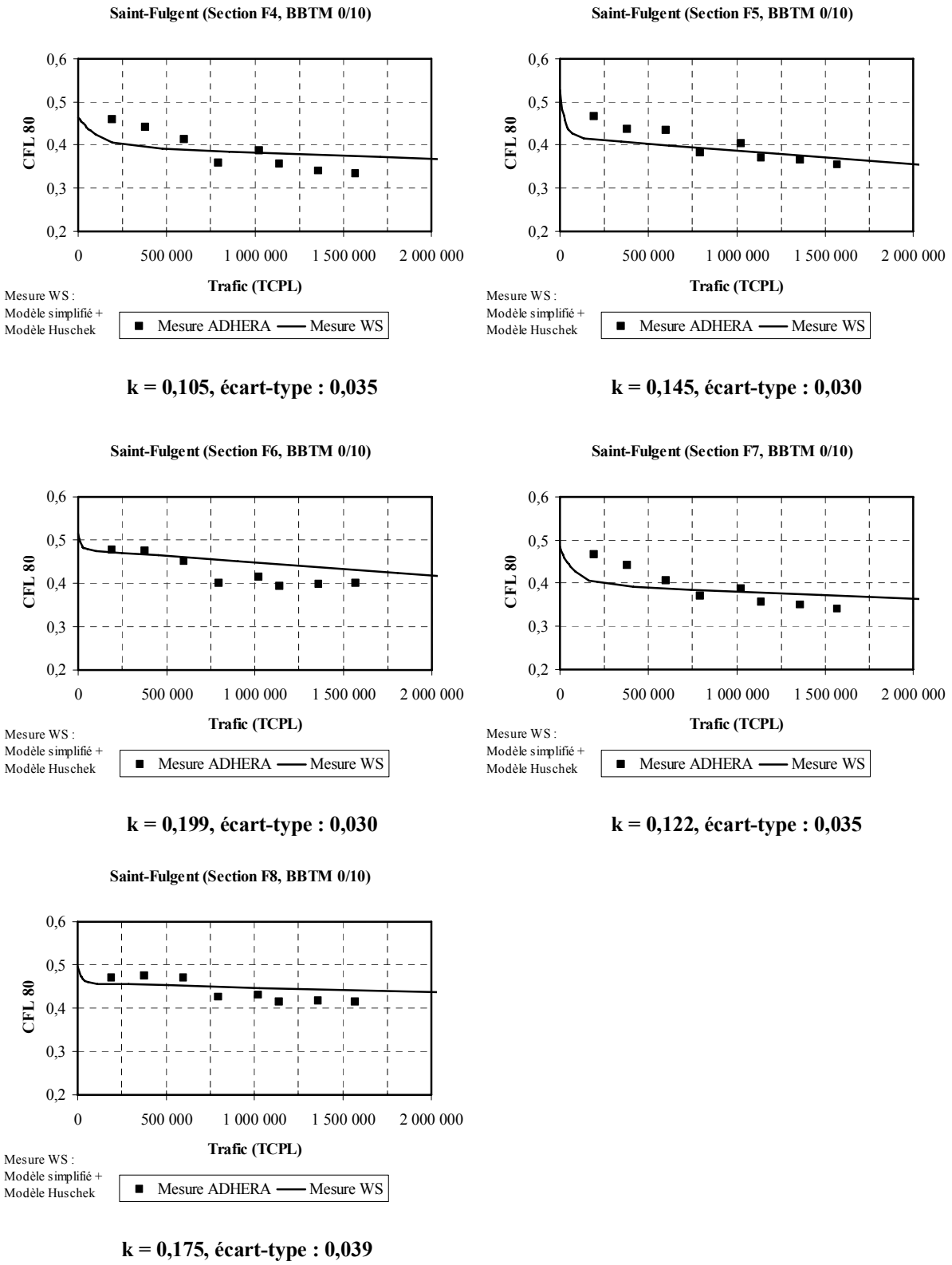



*Figure VI.14 : Comparaisons entre les évolutions réelles et simulées du site de Saint-Fulgent avec les paramètres « k » variables*

Les points de mesure de frottement CFL(80) ont été superposés sur la courbe de simulation pour chaque revêtement, comme montré à la Figure VI.14. Rappelons que le pneu de mesure

a été changé à partir du quatrième point dans la figure (à TCPL = 795 000). Les valeurs de mesures avec le nouveau pneu sont plus basses que celles avec l'ancien pneu. Les écart-types sont calculés à partir des points de mesure de frottement CFL(80) dans la figure.

Les valeurs de frottement CFL(80) par la formule (VI.13) *in situ* et aussi calculées par le mdodèle d'ajustement à quatre paramètres prenant en compte le terme du vieillissement en laboratoire sont identiques du Tableau VIII.28 au Tableau VIII.32 (cf. Annexe K, page 269). Bien que, les courbes soient bien superposées, nous constatons que les valeurs du paramètre « k » de cinq revêtements peuvent être scindées en deux groupes : 1) F4 (k = 0,105), F5 (k = 0,145) et F7 (k = 0,122) ; 2) F6 (k = 0,199) et F8 (k = 0,175), dans les tableaux. Ces cinq revêtements ont été confectionnés avec la même famille d'enrobé, la même dimension maximale de granulat, la même granulométrie, etc. Ils ont également été soumis au même trafic. La seule différence entre ces deux groupes est la nature des granulats, surtout pour le PSV. Nous supposons que le paramètre « k » dépend du PSV.

#### VI.3.2.3 Site de Fontenay

Sur ce site, les carottes de cinq types de revêtements sont prélevées en BDR et en rive après onze ans et demi de circulation pour les essais en laboratoire. Les essais *in situ* ont été commencés à partir de la circulation. Leurs descriptions ont été données dans la section III.2.1.6 (cf. page 82). Ce site comporte trois différentes familles de revêtement : BBSG 0/10, BBTM 0/10 et BBDr 0/10. Comme le site de Saint-Fulgent, les carottes ont été déjà décapées lorsque nous les avons prélevés. Les courbes d'adhérence évoluent d'une manière décroissante (cf. Figure VIII.36, page 227).

Les coefficients de frottement CFL et CFT sont mesurés *in situ*. Comme pour le site de Saint-Fulgent, les coefficients de frottement CFL(80) *in situ* sont interpolés à l'aide de la formule (VI.13), ce qui permet de placer les points de mesure *in situ* sur les courbes de laboratoire (cf. Figure VI.15). Rappelons que le pneu de mesure a été changé dans la même période, comme pour le site de Saint-Fulgent. Les mesures de frottement CFL à partir du quatrième point en BDR (TCPL = 1 620 000) sont mentionnées dans la figure. Rappelons que les écart-types sont obtenus à l'aide des points de mesure CFL.

Dans la Figure VI.15, nous constatons que la superposition du revêtement BBSG 0/10 ne se fait pas très bien (cf. Tableau VIII.37, page 272). Ceci résulte peut-être de la limitation de la formule (VI.12). Les calculs des coefficients de frottement par la formule (VI.12) pourraient ne pas convenir pour le revêtement BBSG 0/10 de ce site.

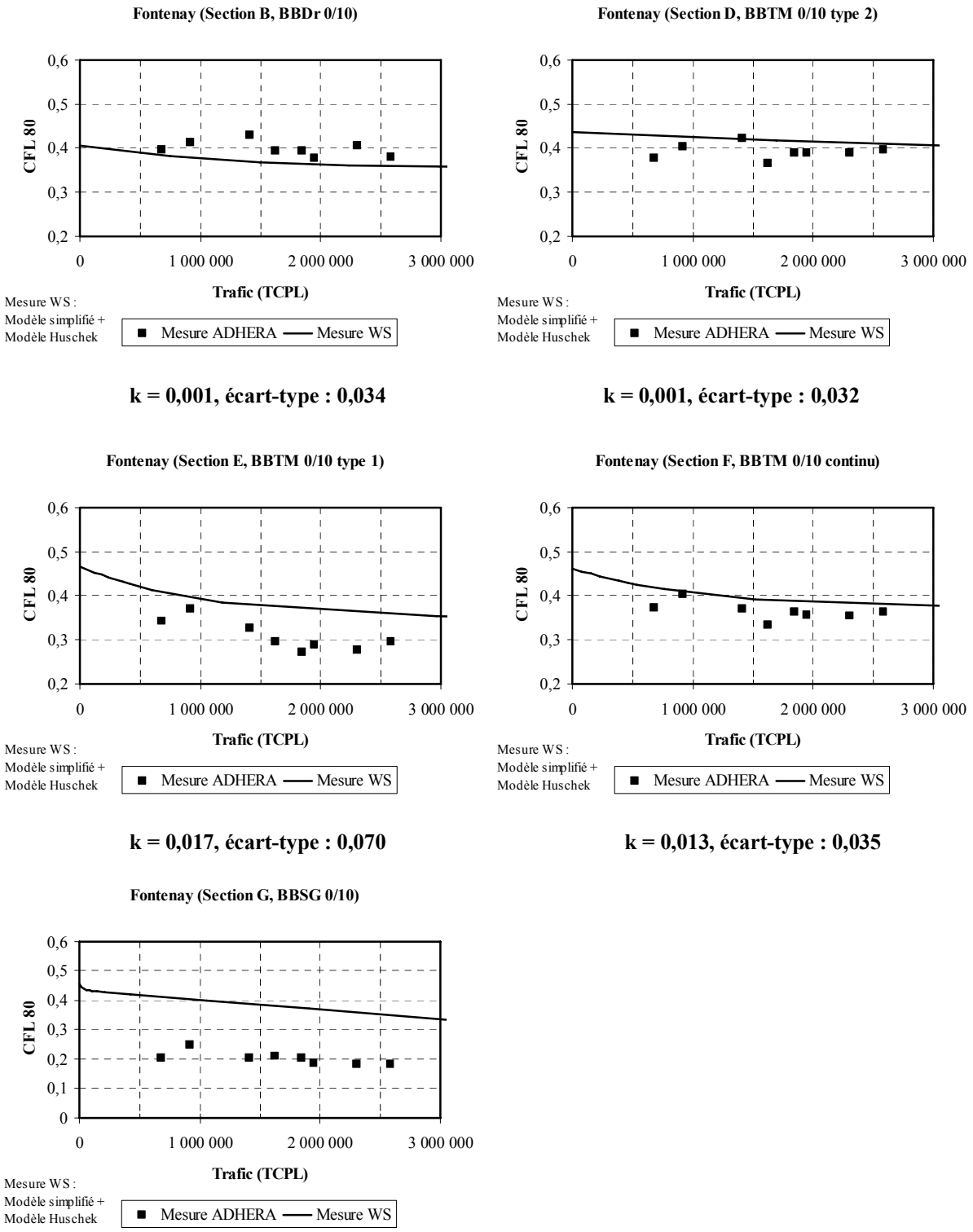



*Figure VI.15 : Comparaisons entre les évolutions réelles et simulées du site de Fontenay avec les paramètres « k » variables*

### VI.3.3 Relation avec le paramètre « k » constant

#### VI.3.3.1 Démarche

En pratique, plusieurs valeurs du paramètre « k » compliquent l'utilisation du modèle. Il serait plus intéressant d'utiliser un seul paramètre « k » pour tous les revêtements. Or, la distribution donnée à Figure VI.16 du paramètre « k » est très différente pour les différents revêtements. Nous allons tenter de minimiser la somme des carrés des résidus ($Si^2$) pour l'ensemble des points de tous les revêtements. Rappelons que le calcul de la somme des carrés des résidus $Si^2$ est donné dans la formule (VI.11). La valeur de k = 0,024, sera alors utilisée.

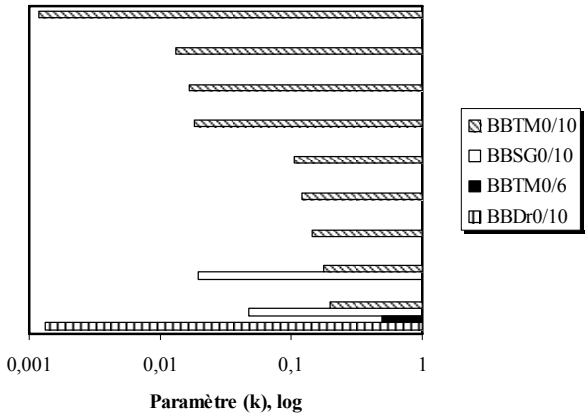
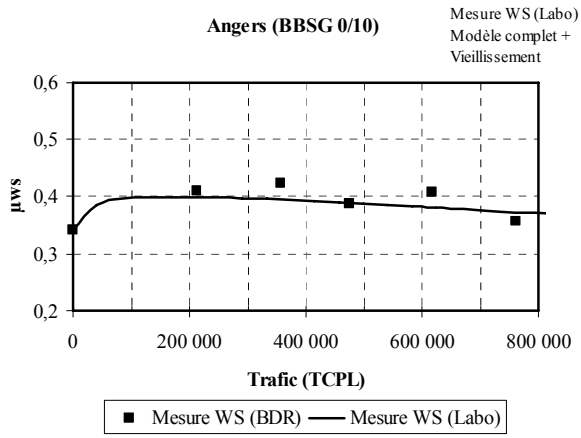



*Figure VI.16 : Distribution du paramètre (k)*

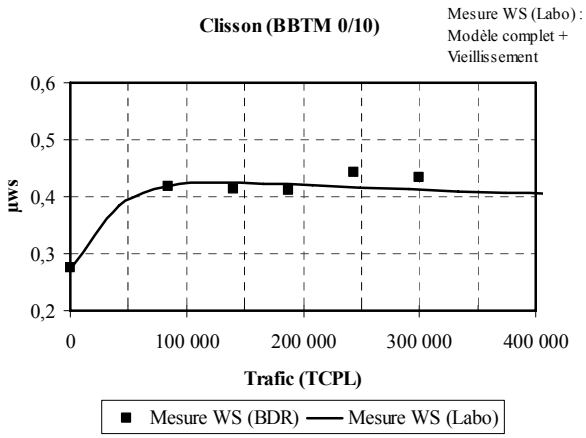
#### VI.3.3.2 Sites d'Angers, Clisson et Coëx

Si le paramètre « k » est fixé, nous pouvons directement calculer les résidus par la formule (VI.11). A partir de la Figure VI.17, nous constatons que les superpositions pour ces trois sites sont satisfaisantes.

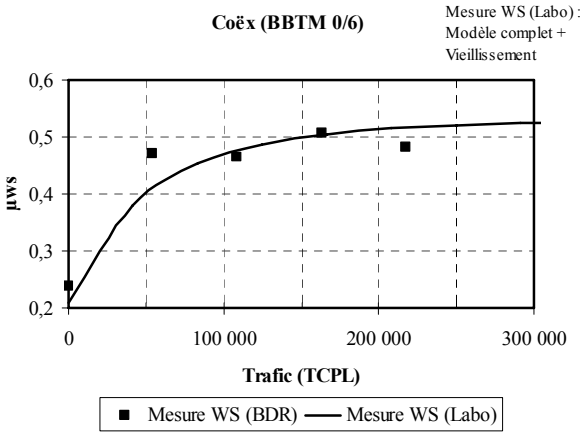
Les coefficients de frottement sur la courbe de simulation correspondant à ceux mesurés en BDR sont calculés. Leurs valeurs et les résidus sont donnés du Tableau VIII.38 au Tableau VIII.40 (cf. page 273).




**k = 0,024, écart-type : 0,018**




**k = 0,024, écart-type : 0,015**

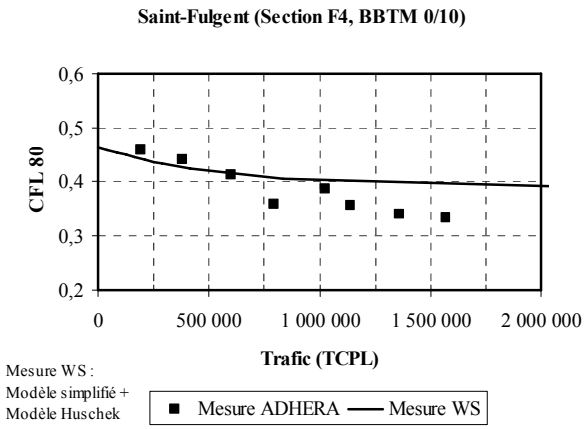



**k = 0,024, écart-type : 0,036**

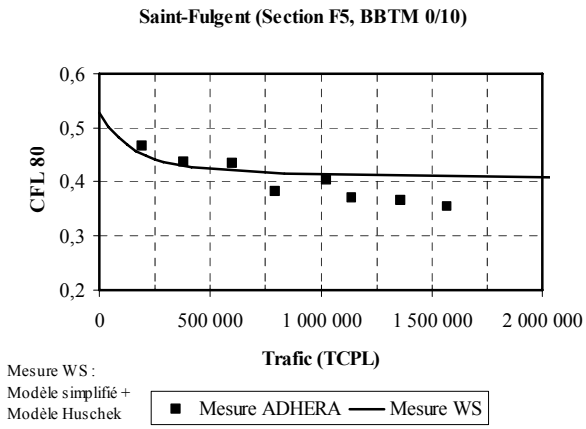
*Figure VI.17 : Comparaisons entre les évolutions réelles et simulées des sites d'Angers, Clisson et Coëx avec un paramètre constant k=0,024*

### VI.3.3.3 Site de Saint-Fulgent

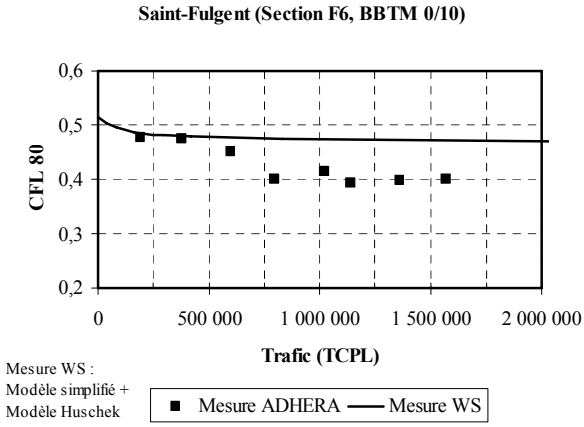
Pour ce site, les calcules des coefficients de frottement CFL(80) sont présentées dans la section VI.3.1.2. Comme précédemment pour les sites précédents, les superpositions sont effectuées à l'aide d'un seul paramètre « k ». D'après l'observation visuelle de la Figure VI.18, nous trouvons que les points de mesure se positionnent raisonnablement sur la courbe de simulation. Rappelons que les écart-types dans la figure sont obtenus à l'aide des points de mesure CFL.



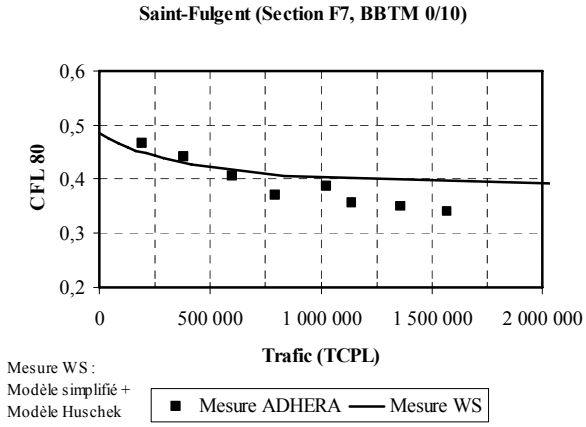

**k = 0,024, écart-type : 0,041**



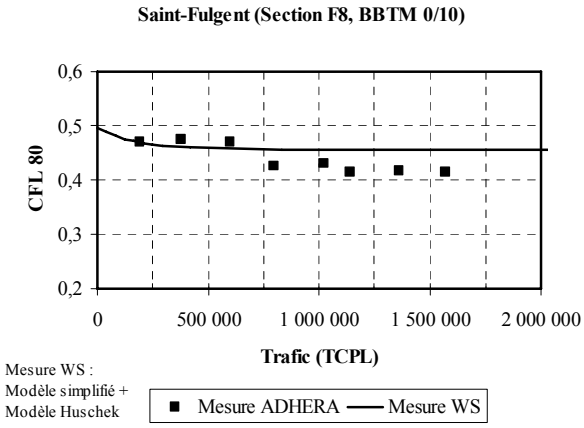

**k = 0,024, écart-type : 0,034**




**k = 0,024, écart-type : 0,058**




**k = 0,024, écart-type : 0,033**




**k = 0,024, écart-type : 0,033**

*Figure VI.18 : Comparaisons entre les évolutions réelles et simulées du site de Saint-Fulgent avec un paramètre constant k=0,024*

### VI.3.3.4 Site de Fontenay

Comme pour le site de Saint-Fulgent, les coefficients de frottement CFL(80) sont calculés. Après les superpositions sont effectuées par k = 0,024, la Figure VI.19 nous montre que les superpositions ne sont pas satisfaisantes pour les cas de BBSG et BBDr.

Les tableaux (du Tableau VIII.46 au Tableau VIII.50, page 275) donnent les coefficients de frottement calculés et les résidus pour le site de Fontenay. Il apparaît que les écart-types sont plus élevés pour deux cas (section B, et G).

Les données de l'écart-type sont données dans le Tableau VI.2 suivant pour le paramètre « k » variable et constant. Rappleons que les écart-types sont calculés à l'aide des points de mesure de frottement WS.

| Site | | Écart-type k variable | Écart-type k constant |
|---|---|---|---|
| **Angers** | | 0,015 | 0,018 |
| **Clisson** | | 0,015 | 0,015 |
| **Coëx** | | 0,032 | 0,036 |
| **Saint-Fulgent** | **F4** | 0,035 | 0,041 |
| | **F5** | 0,030 | 0,034 |
| | **F6** | 0,030 | 0,058 |
| | **F7** | 0,035 | 0,033 |
| | **F8** | 0,039 | 0,033 |
| **Fontenay** | **B** | 0,034 | 0,061 |
| | **D** | 0,032 | 0,036 |
| | **E** | 0,070 | 0,061 |
| | **F** | 0,035 | 0,023 |
| | **G** | 0,179 | 0,206 |

*Tableau VI.2 : Comparaison de l'écart-type*

Dans ce tableau, on constate que l'écart-type pour le paramètre « k » constant est meilleure que celui variable du site de Coëx. Il est moins bon par rapport au paramètre « k » variable des autres sites.

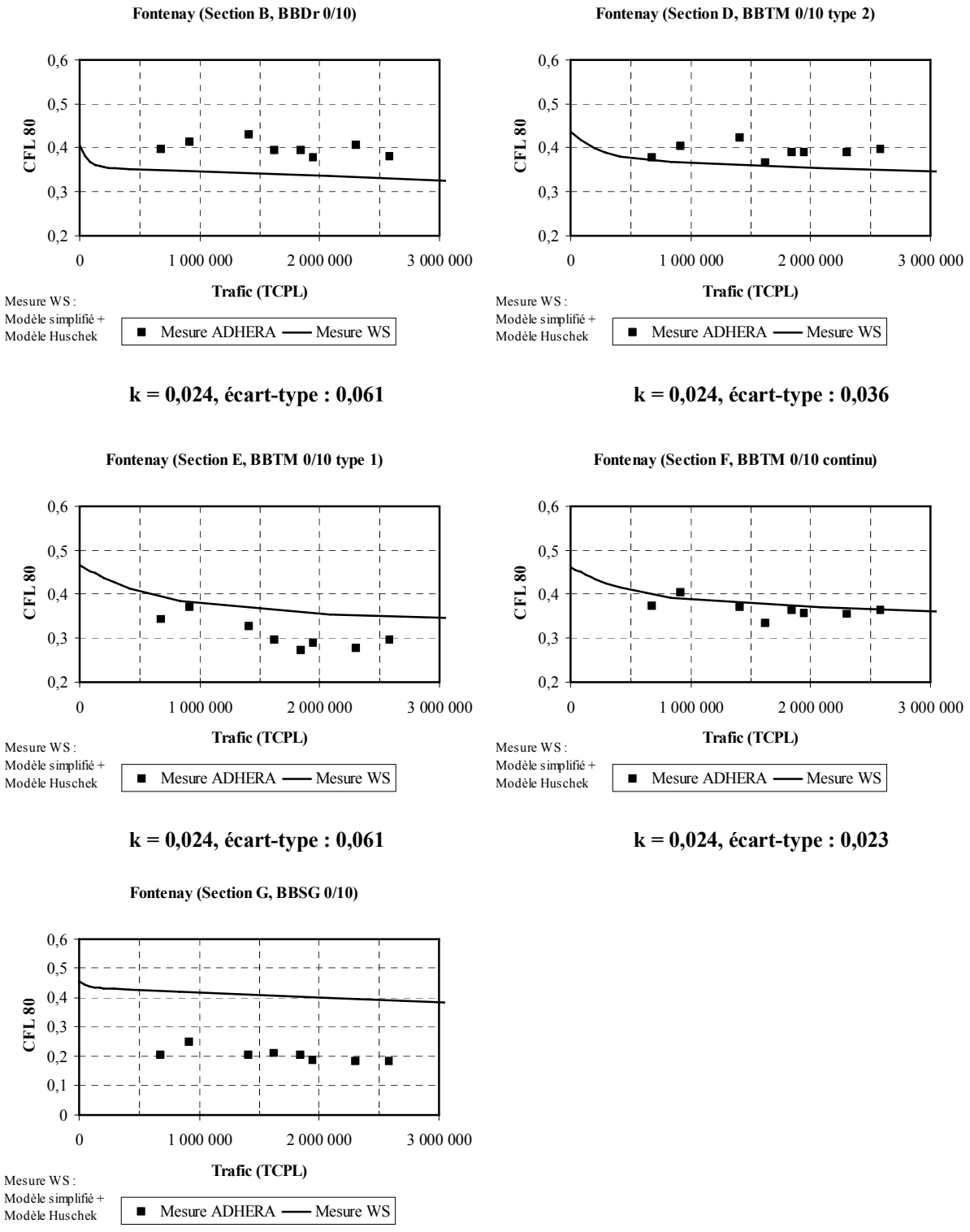



*Figure VI.19 : Comparaisons entre les évolutions réelles et simulées du site de Fontenay avec k=0,024*

## VI.4 Applications

Ce travail de recherche avait pour objectif de prédire l'évolution de l'adhérence à partir de l'essai en laboratoire ou du modèle physique. Grâce au développement d'un essai en laboratoire et d'un modèle physique, deux applications peuvent être envisagées :

- pour les gestionnaires routiers, il serait intéressant de prédire l'évolution de l'adhérence d'une couche de roulement neuve avant de la soumettre au trafic. Ceci permettrait de planifier l'entretien et la durée de service pour la sécurité routière ;
- pour les concepteurs routiers, il devient possible de choisir la formulation et les matériaux utilisés dans la couche de surface de la chaussée, selon des critères liés à l'adhérence. Nous pouvons traiter des questions économiques et stratégiques par le modèle physique.

### VI.4.1.1 Pour les gestionnaires routiers

Lorsqu'une chaussée neuve est mise en service, nous nous demandons comment l'adhérence évoluera en fonction du temps et du trafic. Ceci permet d'envisager l'entretien et la durée de service à partir d'un trafic donné. Dans la littérature existante, il existait jusqu'à présent peu de travaux permettant de répondre à cette question.

Aujourd'hui, nous pouvons répondre cette question selon nos travaux réalisés. En effet, l'échantillon d'enrobé neuf est d'abord prélevé *in situ* avant la circulation. Puis, les essais de polissage et les mesures du frottement sont effectués sur cet échantillon neuf à l'aide de la machine Wehner et Schulze. Une courbe d'évolution de l'adhérence en fonction du nombre de rotations WS peut être obtenue. Cependant, cette courbe obtenue est établie en laboratoire sans prendre en compte le vieillissement. Pour simuler l'évolution *in situ*, un terme présentant l'effet du vieillissement est ajouté. Avec la relation entre le trafic et la durée de polissage WS (cf. formule VI.10), nous obtenons la courbe de prédiction d'évolution de l'adhérence. Rappelons que le paramètre « k » est constant, k = 0,024. Cependant, cette valeur n'est pas garantie pour les enrobés autres que les BBTM (qui sont aujourd'hui en France les plus courants pour les chaussées à fort trafic).

La Figure VI.21 montre les comparaisons entre les mesures réalisées sur les carottes en BDR et la courbe de simulation prenant en compte l'effet du vieillissement en laboratoire. Rappelons que les courbes « Mesure WS (labo) » sont obtenues à partir des mesures de frottement WS ajoutant le vieillissement en laboratoire sur les échantillons neufs pour les sites d'Angers, Clisson et Coëx. Le terme du vieillissement « $(1-d)\mu_v$ » et la fonction de décapage sont donnés par les formules (VI.7) et (VI.9). Le nombre de rotations WS est traduit en trafic par la formule (VI.10). Pour les sites Saint-Fulgent et Fontenay, les mesures de frottement WS sur les carottes prélevées en rive après quelques années de trafic sont directement utilisées sans ajouter de terme du vieillissement. Cependant, les mesures de frottement sont effectuées par la machine WS ; les données doivent donc être transformées en frottement CFL par la formule d'Huschek (VI.12). Parallèlement, les

frottements CFL(80) *in situ* sont calculés par la formule (VI.13). Dans la Figure VI.21, nous constatons que la courbe de mesure WS avec prise en compte du vieillissement se superpose bien aux points de mesure en BDR.

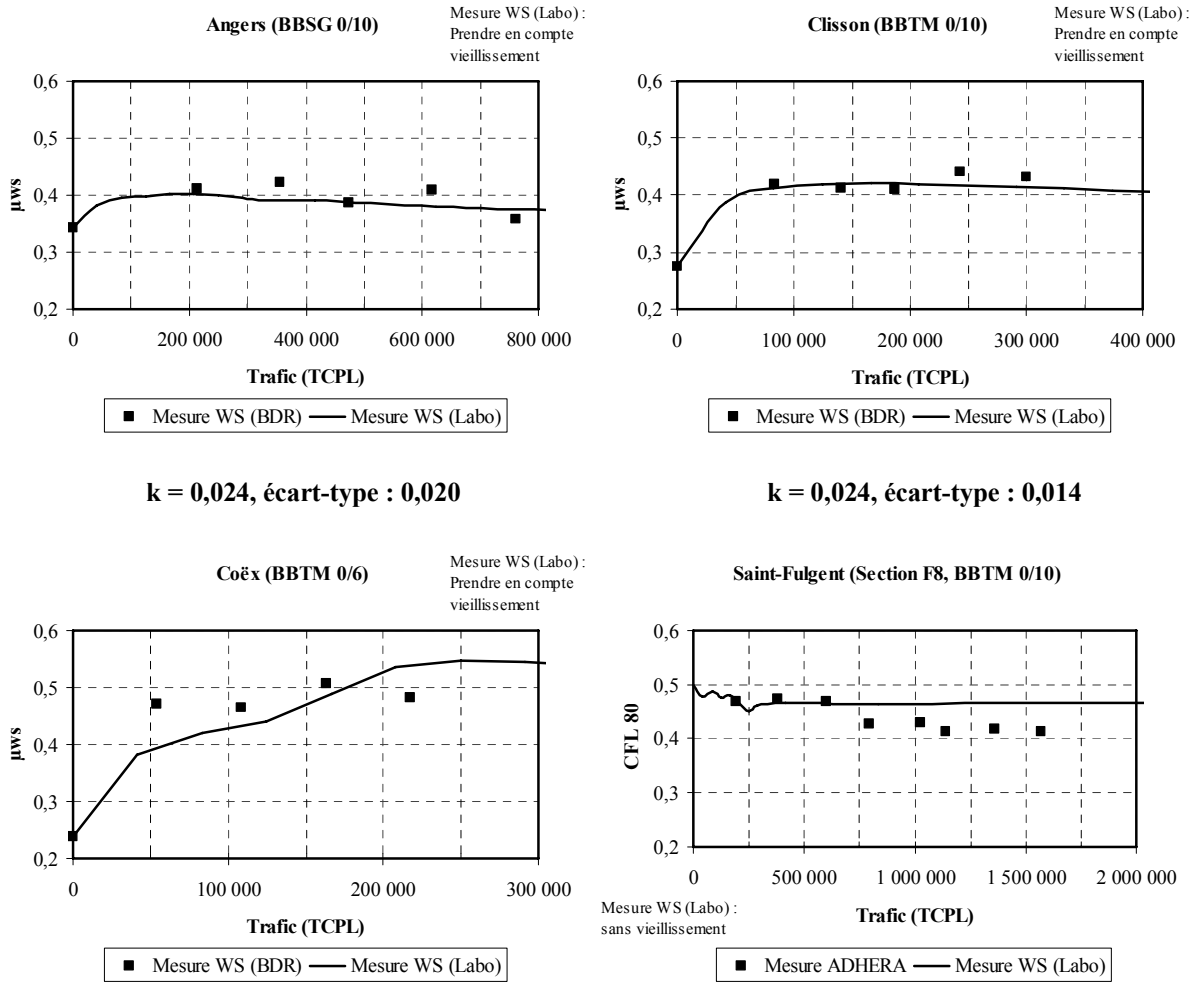



*Figure VI.20 : Prédiction de l'évolution de l'adhérence à partir de l'essai en laboratoire*

### VI.4.1.2 Pour les concepteurs routiers

Les choix du type d'enrobé et des matériaux utilisés en BDR est effectué par les ingénieurs routiers lors de la conception. Or on a vu qu'on pouvait prédire l'évolution de l'adhérence à partir de la formulation et des granulats choisis. Pour répondre à ce besoin, le modèle physique peut être utilisé. On utilise le modèle d'ajustement sur la mesure d'une galette des gravillons et les hypothèses qui sont prises pour la contribution du bitume, le veillissement ect. La Figure VI.21 montre les comparaisons entre les frottements mesurés en BDR et les frottements calculés par le modèle physique (VI.4). Rappelons que les frottements en BDR sont mesurés en laboratoire avec la machine WS pour les sites d'Angers, Clisson et Coëx. Pour le site de Saint-Fulgent, les frottements CFL(80) sont interpolés par les

frottements CFL(60) et CFL(90) par la formule (VI.13). La courbe d'évolution par le modèle physique prend en compte le vieillissement pour les sites d'Angers, Clisson et Coëx. Le site de Saint-Fulgent est une chaussée déjà ancienne ; la fonction vieillissement n'est donc pas nécessaire.

Dans la Figure VI.21, on constate que le modèle physique reproduit assez bien l'évolution de l'adhérence en fonction du trafic pour les sites de Clisson et Coëx. Pour le site d'Angers, les points de mesure de frottement en BDR sont supérieurs à la courbe du modèle physique. En effet, le modèle physique est développé à l'aide de l'ajustement de la courbe d'évolution du granulat par la formule (VIII.1). Cette courbe d'évolution descend très vite au début du polissage. Ensuite, elle évolue toujours au dessous de la courbe d'évolution de l'enrobé après décapage. Ici, nous supposons que les macrotextures sont différentes pour un enrobé BBSG et pour sa galette de gravillons. La macrotexture d'enrobé amènerait plus d'adhérence que celle de granulats. Pour le site de Saint-Fulgent, les frottements à partir de quatrième point sont plus faibles, à cause du changement du pneu. Les trois premiers points sont superposés sur la courbe du modèle physique.

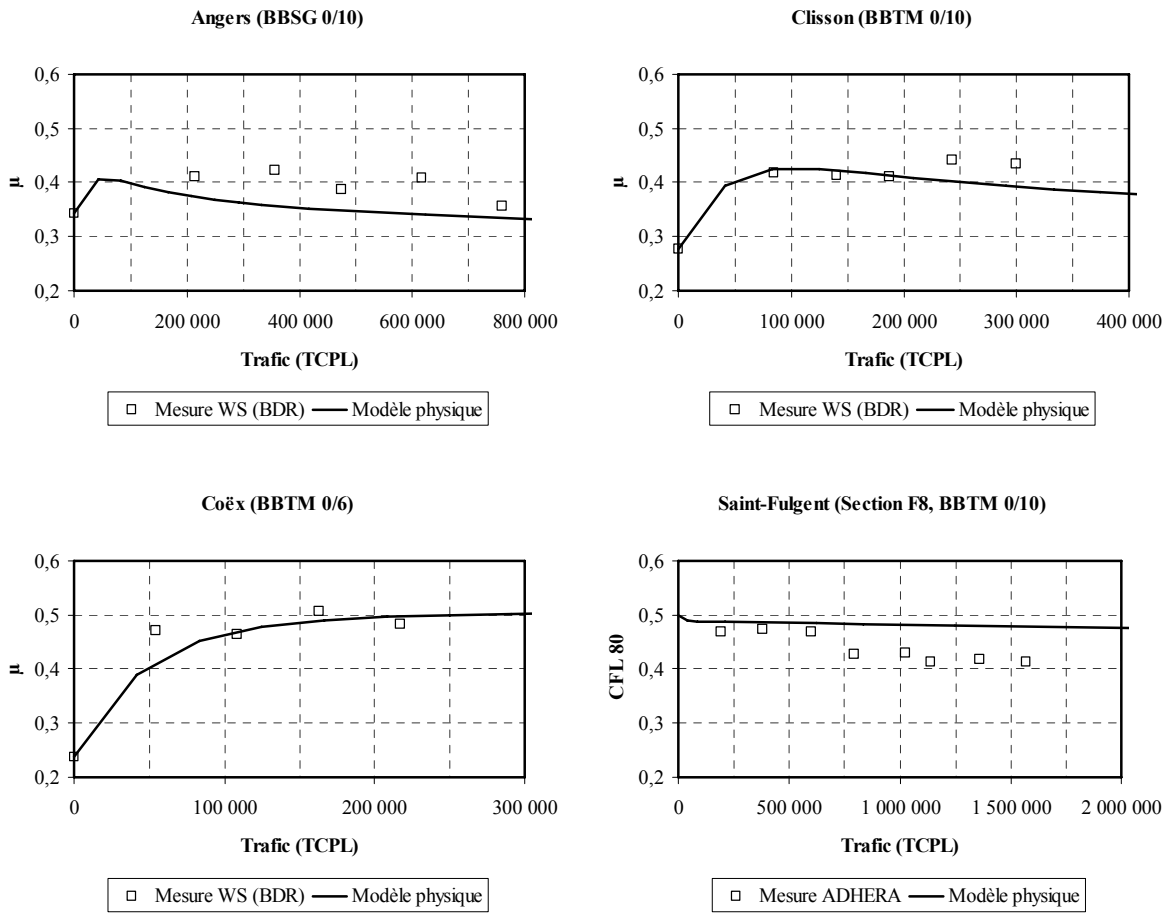



*Figure VI.21 : Prédiction de l'évolution de l'adhérence à partir du modèle physique*

Bien entendu, jusqu'à présent, l'effet des variations saisonnières n'a pas été pris en compte dans les courbes de simulation en laboratoire et dans le modèle physique. Or, ce phénomène influence fortement l'évolution de l'adhérence.

## VI.5 Synthèse sur la loi d'évolution

Un modèle d'ajustement avec cinq paramètres a d'abord été proposé pour la description des lois d'adhérence en fonction du nombre de cycle de frottement. Ce modèle simule la courbe de l'évolution du frottement, qui est composée de deux parties : la phase de décapage du liant et la phase de polissage du granulat.

Ensuite, nous avons développé un modèle physique prenant en compte les mécanismes prédominants, soit le décapage du liant, l'effet du vieillissement, et le polissage du granulat. L'effet des variations saisonnières n'a pu être décrit convenablement, car les mesures disponibles n'étaient pas suffisamment distribuées dans le cycle annuel ; il est donc absent du modèle, malgré son importance dans la pratique.

$$\mu = e^{-\frac{N}{\beta}}\left[\mu_0 + \mu_1\left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha}}\right)\right] + a\left(1 - e^{-\frac{N}{\beta}}\right)(N+b)^c$$

Excepté cela, à partir des résultats expérimentaux, le modèle physique reproduit assez bien l'évolution de l'adhérence en laboratoire. Les paramètres du modèle physique sont donnés dans le Tableau VI.3.

| Terme | Paramètre | Valeur | Moyen |
|---|---|---|---|
| **Usure du granulat** | **a** | variable | ajustement sur la courbe expérimentale du granulat |
| | **b** | variable | "idem" |
| | **c** | variable (négatif) | "idem" |
| **Vieillissement du bitume** | $\mu_0$ | coefficient initial | mesure de frottement sur l'enrobé neuf |
| | $\mu_1$ | 0,2 | |
| | $\alpha$ | 6 | |
| **Décapage** | $\beta$ | variable | ajustement sur la courbe expérimentale de l'enrobé |

*Tableau VI.3 : Paramètres dans le modèle physique*

Enfin, nous avons cherché à rapprocher l'évolution de l'adhérence en laboratoire (éprouvettes usées par la machine Wehner et Schulze) et sur le terrain (couche de chaussée usée par le trafic) pour prédire l'évolution de l'adhérence à partir de l'essai en laboratoire. Nous avons d'abord essayé de traduire la relation entre la durée de polissage en laboratoire et le trafic avec le paramètre « k » dépendant du revêtement. Puis, pour une mise

en œuvre plus pratique du modèle, un paramètre « k » universel (k = 0,024) a été calibré sur l'ensemble des sites suivis. La prévision d'évolution de l'adhérence est réalisée avec ce paramètre universel à partir de l'essai en laboratoire. Finalement, les applications possibles de ce modèle par les acteurs de la route sont récapitulées à la fin de ce chapitre.

# VII Conclusions générales et perspectives

## Conclusions

L'objectif de ce travail était de voir comment on pouvait prédire l'évolution de l'adhérence d'une route. Ainsi nos études se sont concentrées sur :

- le développement d'une méthode de simulation du processus de polissage, principal mécanisme à l'origine de la décroissance de l'adhérence avec le temps. La pertinence et les limites de la méthode sont jugées à travers la comparaison entre les simulations et des résultats obtenus sur des routes circulées ;
- le développement d'un modèle d'évolution de l'adhérence à partir d'une série d'essais.

Dans le premier chapitre, nous avons abordé essentiellement l'importance de l'adhérence vis-à-vis de la sécurité routière. A partir de cela, nous avons présenté les mécanismes physiques de contact pneu/chaussée. Le polissage de la texture, les variations saisonnières, le vieillissement du liant, etc., sont des facteurs influençant l'évolution de l'adhérence. Nous avons résumé les essais de mesure de l'adhérence et de mesure de la texture pratiqués actuellement dans le monde et, en particulier, en France. Egalement, les essais de polissage utilisables ont aussi été présentés. Cependant, les méthodes actuelles sont limitées pour effectuer l'essai de polissage sur les échantillons d'enrobés. Nous avons donc choisi un appareil qui permet de faire les essais sur les échantillons d'enrobés et de granulats.

Pour répondre au premier objectif, dans le deuxième chapitre, les efforts ont été focalisés sur la machine de Wehner et Schulze et sur la mise en place d'une méthode d'essai de simulation du polissage en laboratoire. L'essai de polissage par la machine Wehner et Schulze reproduit assez bien le polissage réel des chaussées soumises au trafic. Cette machine permet de polir et de mesurer le frottement. Les premiers résultats montrent que cette machine est adaptée au problème traité, à savoir qu'elle peut simuler des évolutions comparables aux évolutions réelles de l'adhérence. Une nouvelle méthode d'essai de simulation a été développée dans ce travail. Grâce à cette méthode, c'est la première fois que la courbe d'évolution de l'adhérence sur les enrobés est mesurée à partir de l'état neuf.

Dans le troisième chapitre, les analyses ont été consacrées aux essais de polissage sur les échantillons. L'essai de polissage sur des mélanges bitumineux et sur des granulats confirme le rôle important de la résistance au polissage des granulats, caractérisée par l'indicateur normalisé PSV. La taille maximale des granulats $D_{max}$ joue aussi un rôle important sur l'adhérence. Plus le $D_{max}$ est petit, meilleure est l'adhérence. Nous avons réalisé les essais de polissage sur trois sites expérimentaux. D'après la comparaison des mesures obtenues sur ces trois sites, on constate que les évolutions de l'adhérence sont très différentes selon le type de revêtement. Il faut plus de temps pour décaper un BBTM qu'un BBSG pour le même

trafic. Un revêtement 0/6 apporte une meilleure adhérence qu'un revêtement 0/10. Les résultats sur les échantillons d'une famille avec différents granulats, utilisés dans différentes fractions granulaires, confirment qu'un revêtement avec un bon niveau de PSV pour la seule fraction grossière des granulats entraîne une meilleure adhérence. Ceci permet le choix de revêtements durablement adhérents et économiques. Les résultats ont aussi montré que les échantillons compactés en laboratoire ont une meilleure adhérence que les échantillons compactés *in situ*.

Dans le quatrième chapitre, nous avons étudié dans quelle mesure l'état de surface influence l'adhérence. L'évolution de l'adhérence dépend des paramètres de la rugosité de surface. Les résultats montrent que le coefficient de frottement est bien lié aux paramètres de la rugosité calculés par le profil d'ondulation. Les variations des paramètres tels que la hauteur ($R_a$ et $R_q$), la forme (Cot $\alpha$), le relief ($\theta$) et la densité sont déterminées par les caractéristiques des granulats (PSV, MDE, LA, etc.). La valeur PSV est un paramètre caractérisant la capacité du granulat à garder sa rugosité de surface. Les pertes de hauteur dépendent davantage des paramètres tel que MDE et LA, qui caractérisent la capacité du granulat à s'opposer à l'usure.

Dans le dernier chapitre, un modèle de loi d'évolution empirique est d'abord déduit des courbes d'évolution simulées. Limité à la description de la variation du frottement avec le nombre de passages après le décapage du liant, ce modèle à quatre paramètres décrit bien les évolutions observées. A partir des essais, des facteurs jouant un rôle important sur les coefficients de la loi d'évolution ont été mis en exergue, notamment le PSV, la taille des grains, la microtexture, etc. Les relations entre les paramètres du modèle et les caractéristiques de l'enrobé ont été analysées. Ensuite, un modèle physique a été développé pour répondre au deuxième objectif de ce travail. Ce modèle physique se compose de quatre termes : le décapage du liant, le polissage du granulat, l'effet du vieillissement et l'effet des variations saisonnières. Dans ce travail, nous nous sommes cependant limités aux trois premiers termes. Nous avons aussi établi la relation entre le trafic (nombre de passages de poids lourds) et le nombre de cycles de polissage WS. Cette relation empirique permet d'établir une corrélation entre le trafic réel et la simulation en laboratoire. Ce paramètre «universel » est de 0,024 (rapport du nombre de cycle WS au nombre équivalent d'essieu de poids lourds). Sa validité doit être pour le moment restreinte aux revêtements de type BBTM, qui cependant constituent les couches de surface les plus courantes pour les chaussées françaises à fort trafic. Un nombre de 180 000 rotations WS est équivalent à un trafic poids lourd de 7 500 000. Ce nombre de rotations de la procédure « LCPC » dure une demi-journée en laboratoire. Le trafic équivalent se prolonge au moins pendant sept ans avec 1 000 000 véhicules poids lourd envisagés par an sur la route. À partir de cela, l'avantage de l'essai de polissage WS en laboratoire est évidemment. Enfin, deux applications sont proposées :

- la prévision de l'évolution de l'adhérence *in situ* à partir de l'essai en laboratoire, avant ouverture à la circulation. Ceci permet de prévoir l'entretien de chaussée et la durée de service ;

- choix des granulats et du type d'enrobé à partir du modèle physique, au stade de la conception du projet routier.

Perspectives

Les travaux futurs devraient, tout d'abord, se consacrer à la continuation des mesures, de façon à confirmer les tendances observées. En effet, les couches de roulement peuvent durer jusqu'à 15 ans sur le réseau français, alors que nos mesures ne s'échelonnent, pour le moment, que sur quelques années.

Il sera ensuite intéressant de mieux étudier les évolutions de l'adhérence pour les différentes formulations. Dans ce travail, le nombre des échantillons a été limité faute de temps. Nous avons traité les influences des facteurs (le type de revêtement, des caractéristiques des granulats, la compacité, etc.) sur l'évolution de l'adhérence. Cependant, il est intéressant d'établir un plan d'expérience complet pour analyser les influences de tous les facteurs importants de la formulation sur l'évolution de l'adhérence, par exemple, les coefficients MDE et LA des granulats, le liant, etc.. A l'aide d'un nombre d'essais suffisant, il sera possible de trouver les relations entre les caractéristiques des enrobés et l'adhérence. Ceci permettra aussi de donner les idées pour relier les paramètres de la formule dans la loi d'évolution aux caractéristiques des matériaux. En outre, on pourra également s'intéresser à l'évolution de l'adhérence des chaussées en béton de ciment, qui pourraient retrouver dans l'avenir une certaine actualité, compte tenu de la hausse du prix du bitume.

En ce qui concerne les tracés routiers, les analyses de sites présentant des tracés droits, mais aussi des virages, des zones en pente longitudinale, et des zones de freinage ou d'accélération seraient intéressants à effectuer et à comparer avec des sections « normales ».

La méthode d'essai proposée dans ce travail peut être considérée comme satisfaisante pour reproduire l'évolution de l'adhérence par le trafic *in situ* à l'aide de l'essai de simulation en laboratoire. Cependant, nous n'avons pas essayé d'atteindre la valeur minimale de l'adhérence. Ce paramètre serait utilisable pour estimer la durée de vie de la couche de roulement. A noter d'ailleurs que tous les modèles utilisés donnent à long terme des valeurs d'adhérence nulle ou négative : l'extrapolation directe n'est pas possible.

Pour analyser l'influence de la texture sur l'évolution de l'adhérence, il serait intéressant de faire varier indépendamment chaque paramètre de rugosité, et dans un domaine plus large que pour les mesures relatées dans le présent travail. Un autre travail très important devra être consacré au développement de la loi d'évolution reliant les paramètres de la formule aux caractéristiques des matériaux (enrobé, granulat et liant) et aux formulations. Dans ce rapport, nous avons proposé un modèle empirique dont certains paramètres sont liés à des caractéristiques des matériaux, qui prédit l'évolution de l'adhérence en fonction de la durée de polissage. Le modèle pourra évoluer en réduisant si possible le nombre de paramètres, et en les reliant mieux aux propriétés des constituants et des enrobés.

Pour améliorer le modèle physique, il faudra également prendre en compte l'effet des variations saisonnières. De même, le paramètre $\beta$ de la fonction de décapage (VI.9) sera précisé. Il doit être possible de relier ce paramètre au type d'enrobé. De même, pour la fonction de vieillissement, les paramètres $\mu_1$ et $\alpha$ seront étudiés. Il est possible que le paramètre $\mu_1$ dépende des propriétés du liant et des conditions climatiques. En effet, les évolutions de l'adhérence sont presque identiques pour l'ensemble des échantillons d'enrobés non sollicités placés sur la piste LCPC. Enfin, les valeurs du paramètre $\alpha$ trouvées par calibration sont proches de 6. Ce paramètre présenterait le temps caractéristique de vieillissement de l'enrobé en service.

Pour vérifier la relation entre la durée de polissage et le trafic, il est nécessaire d'augmenter le nombre de sites expérimentaux. En dehors des sites déjà étudiés (Angers, Clisson, Coëx, Saint-Fulgent et Fontenay), les carottes vont être prélevées sur de nouveaux sites. Il est préférable de les suivre à partir de leur construction. Lorsque l'on pourra trouver une relation plus générale pour tous les revêtements, la prévision de l'évolution de l'adhérence *in situ* à l'aide des essais de polissage en laboratoire pourra devenir une pratique courante, encadrée par des méthodologies, voire des normes.

# Références bibliographiques


1. Observatoire National de la Route, Dictionnaire de l'entretien routier, Ministère de l'Equipement du Logement, des Transports et du Tourisme, 1996, Volumes 1-2-3, 210p.
2. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Méthode d'essai N°50 – Mesure de l'adhérence des chaussées routières et aéronautiques, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 2002, 28p.
3. SETRA, Adhérence et texture des revêtements routiers – Méthodes et moyens de mesure, Note d'information, 1993, N°77, 8p.
4. Société Michelin, Le pneu/L'adhérence, Clermont-Ferrand : Société de Technologie Michelin, 2000, 92p.
5. AIPCR, Comité techniques des caractéristiques de surface, *XVIIIe Congrès Mondial de la Route*, Bruxelles, 13-19 Septembre, 1987, 121p.
6. Do M.-T., Lucas J., Contact pneu/chaussée – Apport de la microtexture du revêtement, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mars - avril, 1995, N°196, pp.5-17.
7. Faure M., Gratia G., L'adhérence des revêtements routiers en France, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mars - avril, 1974, N°70, pp.127-139.
8. Société Michelin, disponible sur : http://back-3-04.webmichelin.com/fr/auto/grip_wet_visc.jsp.
9. Gothié M. Parry T., Roe P., The relative influence of the parameters affecting road surface friction, *2nd International Colloquium on Vehicle-Tyre-Road Interaction, Friction Potential and Safety : Prediction of Handling Behaviour*, Florence, February 23rd, 2001, pp.27-47.
10. Woodward W.D.H., Woodside A.R., Jellie J.H., Higher PSV and other aggregate properties, *1st International Conference on surface Friction, Roads and Runways*, Chritschurch, New Zealand, 2005, 11p.
11. Lucas J., Bégou P.-A., Description de la macrotexture et de la microtexture, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mai - juin, 1993, N°185, pp.63-74.
12. Kulakowski B., Harwood D.W., Effect of Water-Film Thickness on Tire-Pavement Friction, Surface Characteristics of Roadways : International Research and Technologies, ASTM STP 1031, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp.50-60.
13. Bellanger J., Delalande G., Chartier P., Programme granulat/adhérence - Étude bibliographiques, FAER 1.35.17.0 et 1.02.41.0, Laboratoire régional d'Angers, 1991, 55p.
14. Moore D.F., The Influence of Surface Topography on the Friction and Lubrication of Elastomers, Annals of the C.I.R.P., United Kingdom, 1971, Vol.XVIV, pp.673-678.
15. Laganier R. et *al.*, Evaluation comparative de surface routières – Piste de Glissance, Michelin et Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1988, 49p.
16. Lees G., Katekhda I.e.D., Bond R., et *al.*, The Design and Performance of High Friction Dense Asphalts, *Transportation Research Record*, 1976, No.624, pp.40-51.
17. Boulet M., La texture des revêtements routiers – Situation des recherches menées par les LPC, Note d'information, FAER 1.02.31.5, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1985, 19p.
18. Williams A.R., Bond R., Pennells J.H., The Tyre/Road Interface – Its Effect on Braking, IMcchE, 1976, pp.69-80.
19. Bond R., Katekhda I.e.D., Lees G., et *al.*, Tyre/Road Surface Interaction, *The Journal of the Institution of Highway Engineers*, November 1976, pp.11-20.
20. Moore D.F., The Friction of Pneumatic Tyres, Elsevier Scientific Publishing Company, 1975, 220p.
21. SETRA et LCPC, Adhérence des couches de roulement neuves – Contrôle de la macrotexture, Clauses contractuelles pour l'application de la circulaire N°2002-39 du 16 mai, 2002, 12p.
22. Taneerananon P., Yandell W.O., Micro-Texture Roughness Effect on Predicted Road-Tire Friction in Wet Conditions, *Wear*, 1981, Vol.69, pp.321-337.
23. Yandell W.O., The Simulated Traffic Polishing of Roadstones, In *Wear*, 1972, Vol.21.
24. Emmens W.C., The Influence of Surface Roughness on Friction, *Proceeding 15th Congress of International Deep Drawing Research Group (IDDRG)*, Mai 1988, pp.63-70.

25. Sabey B.E., Pressure Distribution beneath Spherical and Conical Shapes Pressed into a Rubber Plane, and their Bearing on Coefficient of Friction under Wet Conditions, *Proceedings of the Physical Royal Society*, 1958, Vol.71, pp.979-988.
26. Forster S.W., Aggregate Microtexture : Profile Measurement and Related Frictional Levels, Report FHWA/RD-81/107, Federal Highway Administration, Washington D.C., 1981, 36p.
27. Forster S.W., Pavement Microtexture and Its Relation to Skid Resistance, *Transportation Research Record*, 1989, Vol.1215, pp.151-164.
28. Berthier J., L'eau, la route, le pneumatique, quelques données, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mars - avril, 1993, N°185, pp.1-24.
29. Tourenq C., Fourmaintraux D., Propriétés des granulats et glissance routière, Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, mars - avril, 1971, N°51, pp.61-69.
30. Britton S.C., Ledbetter W.B., Gallaway B.M., Estimation of Skid Numbers from Surface Texture Parameters in the Rational Design of Standard Reference Pavements for Test Equipment Calibration, *Journal of Testing and Evaluation*, 1974, Vol.2, No.2, pp.73-83.
31. Do M.-T., Contribution des échelles de texture routière à l'adhérence des chaussées, *Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 2004, Routes CR 35, 86p.
32. Do M.-T., Zahouani H., Frottement pneumatique/chaussée – Influence de la microtexture des surfaces de chaussée, *Actes des Journées Internationales Francophones de Tribologie*, Association Française de Mécanique, 2002, 14p.
33. Kevin K. M., Gerardo W.F., High-Speed Texture Measurement of Pavements, Final Report, Virginia Transportation Research Council, VTRC 03-R9, 2003, 22p.
34. AFNOR, norme NF EN ISO 13473-1, Caractéristiques de la texture d'un revêtement de chaussée à partir de relevés de profils – Partie 1 : détermination de la profondeur moyenne du profil, AFNOR – ISO TC 43/SC 1/WG 39 et CEN/TC 227/WG 5, Octobre 2004, 22p.
35. Yandell W.O., A New Theory of Hysteretic Sliding Friction, *Wear*, April 1971, Vol.17, pp.229-244.
36. Yandell W.O., Sawyer S., Prediction of Tire-Road Friction from Texture Measurements, *Transportation Research Record*, 1994, Vol.1435, pp.86-91.
37. AFNOR, norme NF EN ISO 12085, Spécification géométrique des produits (GPS) - Etat de surface : Méthode du profil. Paramètres liés aux motifs, 1998, 26p.
38. Delorme J.-L., Formulation mise en œuvre et adhérence des enrobés bitumineux, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mai - juin, 1993, N°185, pp.139-143.
39. Horvli I., Garba R., Uthus L. et *al.*, Influence of Aggregates on the Frictional Properties of Asphalt Surfacing Mixtures, MAIREPAV'03, 2003, pp.495-504.
40. Dahir S.H., A Review of Aggregate Selection Criteria for Improved Wear Resistance and Skid Resistance of Bituminous Surfaces, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Septembre 1979, Vol.7, No.5, pp.245-253.
41. Gandhi P.M., Colucci B., Gandhi S.P., Polishing of aggregates and wet-weather accident rates for flexible pavements, *Transportation Research Record*, 1991, N°1300, pp. 71-79.
42. Nitta N., Saito K., Isozaki S., Evaluating the Polishing Properties of Aggregates and Bituminous Pavement Surfaces by Means of the Penn State Reciprocating Polishing Machine, *Surface Characteristics of Roadways : International Research and Technologies*, ASTM STP 1031, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp.113-126.
43. Thomson M.C., Effect Quantity and Size Distribution of the plus #200 Acid Insoluble Residue on the Skid Resistance Characteristics of the Loyalhanna Limostone, *8th Annual Symposium Proceedings of International Centre for Aggregate Research*, 2000, 21p.
44. Liang R.Y., Chyi L.L., Polishing and Friction Characteristics of Aggregates Produced in OHIO, The Ohio Department of Transportation and The U.S. Department of Transportation, U.S.A., 2000, FHWA-2000-17, 250p.
45. Dahir S.H., Mullen W.G., Factors Influencing Skid-Resistance Properties, *Highway Research Record*, Highway Research Board, Washington D.C., 1971, N°376.
46. Shupe J.W., Lousbury R.W., Polishing characteristics of mineral aggregates, *Proceeding of the 1st International Skid Prevention Conference*, 1959, pp.509-537.
47. Lees G., Asphalt mix design for optimum structural and tyre interaction purposes, *Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Michigan, USA, 1987, pp.404-417.
48. Lees G., Sharif R.L., High Friction Dense Asphalts, *Highways & Traffic Engineering*, 1971, Vol.39, N°1734, pp.18-19.

49. Gramling W.L., Effect of Aggregate Mineralogy on Polishing Rate and Skid Resistance in Pennsylvania, *Highway Research Record*, HRB, National Research Council, Washington D.C., 1970, N°341, pp.18-21.
50. Brillet F., Propriétés anti-dérapantes des revêtements routières – Bilan de quatorze années de campagnes nationales de glissance, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, nov. - dec., 1984, N°134, pp.5-20.
51. Bellanger J., Performences en adhérence de quelques familles de couches de roulement : bétons bitumineux très minces et drainants, *Séminaire USAP 'Chaussées d'Autoroutes'*, Octobre 1990, 17p.
52. Delanne Y., Adhérence des pneumatiques, adhérence conventionnelle, comparaison et liaison avec la texture, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, avril - mai - juin, 2005, N°255, pp.35-49.
53. Grimaux J.P., Utilisation de calcaires liés au bitume dans les couches de surface de chaussées, *Symposium International sur les Granulats de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, Nice, France, 1984, pp.63-66.
54. Bellanger J., Adhérence des revêtements routiers, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mai - juin, 1993, N°185, pp.129-137.
55. Dames J., The Influence of Polishing Resistance of Sand on Skid Resistance of Asphalt Concrete, *Surface Characteristics of Roadways : International Research and Technologies*, ASTM STP 1031, W.E. Meyer & J.Reichert, Eds, Philadephia, 1990, pp.14-29.
56. Franklin R.E., The skidding resistance of concrete : performance of limestone aggregate experiment after 10 years, Transport and Road Research Laboratory, Research Report N°144, 1988, 11p.
57. Fwa T.F., Asce M., Choo Y.S. et *al.*, Effect of Aggregate Spacing on Skid Resistance of Asphalt Pavement, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 2003, pp.420-426.
58. Fenech R., The Influence of Mixture Composition on the Skidding Resistance of Asphalt Wearing Course, 2000, 5p.
59. Barquins M., Adhérence et frottement des matériaux caoutchouteux, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mai - juin, 1993, N°185, pp.75-91.
60. Foucard J., Rôle du pneumatique dans le phénomène d'adhérence, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, avril - mai - juin, 2005, N°255, pp.11-22.
61. Gratia G., Méthodes et matériels de mesure de l'adhérence, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mai - juin, 1993, N°185, pp.107-119.
62. Sabey B.E., Williams T., Lupton G.N., Factors Affecting the Friction of Tires on Wet Roads, *International Automobile Safety Conference Compendium*, Society of Automotive Engineerins, New York, 1970.
63. Denimal P., Le pneumatique et l'adhérence, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mai - juin, 1993, N°185, pp.35-38.
64. Smithson F.D., Herzegh F.H., Investigation of Tire-Road Traction Properties, *Automotive Engineering Congress*, Detroit, Michigan, USA, 11-15 January, 1971, pp.1-16.
65. Giles C.G., Sabey B.E., Accident Reports and Skidding Accident Sites, *Journal Instn. Munic. Engrs.*, 1957, 83(9), pp.297-315.
66. Gothié M., Influence de l'adhérence sur la sécurité routière, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mai - juin, 1993, N°185, pp.27-32.
67. Gothié M., Les mesures de l'adhérence des chaussées en France et leur interprétation, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, avril – mai - juin, 2005, N°255, pp.53-69.
68. AFNOR, Norme NF EN 13036-4, Caractéristiques de surface des chaussées routières et aéroportuaires – Méthode d'essai – Partie 4 : Méthode pour mesurer l'adhérence d'une surface : l'essai au Pendule, CEN/TC 227/WG 5, Août 2003, 20p.
69. Janoo V.C., Korhonen C., Performance Testing of Hot-Mix Asphalt Aggregates, U.S. Army Cold Regions Research & Engineering Laboratory, December 1999, Special Report 99-20, 22p.
70. ASTM Standard E 707-90, Standard Test Method for Skid Resistance Measurements Using the North Carolina State University Variable-Speed Friction Tester. Road and Paving Materials ; Pavement Management Technologies, 2002, Vol.04.03., 5p.
71. CFTR, Mesure de l'adhérence des chaussées routières, INFO pour comité français pour les techniques routières, Mars 2005, N°11, 8p.
72. AFNOR, norme NF P 98-220-2, Essais relatifs aux chaussées – Essais liés à l'adhérence – Partie 2 : Méthode permettant d'obtenir le coefficient de frottement longitudinal (adhérence longitudinale), Novembre 1994, 7p.

73. Ho J.C. Loir G., Delcourt C. et *al.*, Mode opératoire ; Mesure d'un coefficient de frottement longitudinal avec l'appareil ADHERA 2, Juin 2001, 51p.
74. Gothié M. AIPCR Comité C1 : Spécifications d'un pneu standard pour la mesure d'un coefficient de frottement d'une surface de chaussée : le pneu lisse, Novembre 2004, 10p.
75. ASTM Standard E 1844-96, Standard Specification for A Size 10 x 4-5 Smooth-Tread Friction Test Tyre, Road and Paving Materials ; Pavement Management Technologies, February 2004, Vol.04.03., 4p.
76. Wilson D., Dunn R., Polishing Aggregates to Equilibrium Skid Resistance, *Proceedings of the Conference "Surface Friction"*, Christchurch, New Zealand, 1-4 May, 2005, 18p.
77. ASTM Standard E 1911-98, Standard Test Method for Measuring Paved Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester, Road and Paving Materials ; Pavement Management Technologies, February 2002, Vol.04.03., 8p.
78. ASTM Standard E 274-97, Standard Test Method for Skid Resistance of Paved surfaces Using a Full-Scale Tire, Road and Paving Materials ; Pavement Management Technologies, 2005, Vol.04.03., 6p.
79. Roe P.G., Sinhal R., How do you compare? Correlation and calibration of skid resistance and road surface friction measurement devices, *Proceedings of the Conference "Surface Friction"*, Christchurch, New Zealand, 1-4 May, 2005, 15p.
80. Roe P.G., Parry A.R., Viner H.E., High and low speed skidding resistance : the influence of texture depth, Transport Research Laboratory, 1998, TRL Report N°367, 22p.
81. AFNOR, norme NF P 98-220-3, Essais relatifs aux chaussées – Essais liés à l'adhérence – Partie 3 : Méthode permettant de mesurer le coefficient de frottement transversal entre en pneumatique de véhicule et la chaussée (adhérence transversale), Juillet 1995, 6p.
82. Lucas J., Étude de synthèse sur la glissance des chaussées, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1966, Spécial « Glissance », pp.47-78.
83. Gorand J.-L., Gothié M., Mode opératoire : Mesure d'un coefficient de frottement transversal avec l'appareil SCRIM, Octobre 1999, 40p.
84. Gothié M., Mesure en continu de l'adhérence pneumatique-chaussée : Appareil SCRIM, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, sept. – oct., 1979, N°103, pp.43-53.
85. AFNOR, Norme NF P 98-220-4, Essais relatifs aux chaussées – Essais liés à l'adhérence – Partie 4 : Méthode permettant d'obtenir un coefficient de frottement transversal avec un appareil SCRIM, Décembre 1996, 6p.
86. Hosking R., Road Aggregates and Skidding, Transportation Research Laboratory, 1992, 235p.
87. Transportation Research Board, Skidding Accidents – Pavement Characteristics, Transportation Research Record, 1976, N°622, 107p.
88. Delanne Y., Potentiel d'adhérence du couple pneumatique/Chaussée, Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2006, Routes CR 43, 119p.
89. AFNOR, Norme NF EN 13036-1, Caractéristiques de surface des chaussées routières et aéroportuaires – Méthode d'essai – Partie 1 : Méthode volumétrique à la tâche pour mesurer la macrotexture d'une surface de chaussée, CEN/TC 227/WG 5, Janvier 2002, 20p.
90. Brillet F., Marsac P., Mesure de la macrotexture des chaussées, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, nov. – déc., 1985, N°140, pp.53-70.
91. Brengarth M., Laganier R., Drainoroute - Mesure du pouvoir drainant de la texture d'une surface routière, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, janv. – févr., 1983, N°123, pp.17-28.
92. Laganier R., Lucas J., Le Drainoroute : un appareil pour mesurer le pouvoir drainant d'une surface routière, *Premier Symposium International sur les caractéristiques de surface*, Pennsylvanie, Juin 1988.
93. Gothié M., Colombrita R., Moliteo G., Macrotexture Measurement with Many Methodes and Devices ; Single Irregularities Influence on the Megatexture Indicators, 14p.
94. Lucas J., L'analyse de la macrotexture des revêtements routiers, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, nov. – déc., 1991, N°176, pp.127-132.
95. Abe H., Henry J.J., Tamai A. et *al.*, Measurement of Pavement Macrotexture with Circular Texture Meter, *Transportation Research Record*, 2000, N°1764, pp.201-209.
96. Henry J.J., Abe H., Kameyama S. et *al.*, Determination of the International Friction Index using the Circular Track Meter and Dynamic Friction Tester, *Proceedings of IV^e Symposium International "SURF 2000"*, World Road Association, Nantes, France, 22-24 May, 2000, pp.109-121.

97. ASTM Standard E 2157-01, Standard Test Method for Measuring Pavment Macrotexture Properties Using the Circular Track Meter, Road and Paving Materials ; Pavement Management Technologies, 2005, Vol.04.03., 5p.
98. Société Michelin et LCPC, Évaluation comparatives de surfaces routières – Piste de Glissance (1986-1987), Mars 1988, 49p.
99. Do M.-T., Relation entre la microtexture et l'adhérence, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, avril – mai – juin, 2005, N°225, pp.117-136.
100. Soete A., Vasile C., Demeyere M. et *al.*, Instrument de Terrain pour la Mesure Combinée de la Micro- et la Macrotexture des Revêtements Routiers, *Colloque MTOI'05 (Club SFO/CMOI)*, Marseille, France, 21-25 Novembre, 2005, 5p.
101. McGhee K.K., Flintsch G.W., High-Speed Texture Measurement of Pavements, Virginia Transportation Research Council, 2003, 22p.
102. Schonfeld R., Skid Numbers from Stereo-Photographs, Department of Highways Ontario, Canada, D.H.O. Report No.RR155, 1970.
103. Blot G., Relevés de parameters de la microtexture des roches avec un microprofilographe, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, FAER 1.02.41.7, Août 1987, 13p.
104. Société Michelin, Les sols – Caractéristiques géométriques niveaux d'adhérence, 1988, 8p.
105. Yandell W.O., Taneerananon P., Zankin V., Prediction of Tire/Road Friction from Surface Texture and Tread Rubber Properties, *Frictional Interaction of Tire and Pavement*, ASTM STP 793, American Society for Testing and Materials, 1983, pp.304-322.
106. EI-Korchi T., Bacon J., Turo M. et *al.*, Ride Quality Assessment with Pavement Profiling Devices, *Transportation Research Record*, 2002, N°1806, pp.140-148.
107. Diringer K.T., Barros R.T., Predicting the Skid Resistance of Bituminous Pavements Through Accelerated Laboratory Testing of Aggregates, *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, ASTM STP 1031, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp.61-76.
108. Dupont P., Tourenq C., Granulats et microrugosité, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mai - juin, 1993, N°185, pp.145-151.
109. Huschek S., Experience with Skid Resistance Prediction Based on Traffic Simulation, *Proceedings of the 5th International Symposium on Pavement Surface Characteristics*, Toronto, Canada, 6-10 June, 2004, 12p.
110. Lédée V., Delalande G., Dupont P., Adhérence et Granulats, *Bulletin liaison des Ponts et Chaussées*, avril – juin, 2005, N°255, pp.91-116.
111. Young A.E., Road Surface Skid Resistance, pp.11-17.
112. Roe P. Research on road surface skidding resistance in the UK, *Proceeding of the 2nd European Road Research Conference*, European Commission – DGVII, Brussels, 7-9 June, 1999, 12p.
113. Roe P.G., Hartshorne S.A., The Polished Stone Value of Aggregates and In-Service Skidding Resistance, Transportation Road Laboratory, Grande Bretagne, 1998, TRL Report N°322, 28p.
114. Burnett W.C., Gibson J.L., Kearney E.J., Skid Resistance of Bituminous Surfaces, *Highway Research Record*, Highway Research Board, 1968, N°236, pp.49-60.
115. Lees G., Skid Resistance of Bituminous and Concrete Surfacing, Applied Science Publisher, London, UK, 1978, Chapter 6, pp.219-277.
116. Chelliah T., Stephanos P., Shah M.G. et *al.*, Developing a Design Policy to Improve Pavement Surface Characteristics, *TRB 82nd Annual Meeting, Transportation Research Board*, Washington D.C., 12-16 January, 2003, paper 03-2433, 24p.
117. Donbavand J., Cook D., Procedures for Correcting Seasonal Variations, *Proceedings of the Conference "Surface Friction"*, Christchurch, New Zealand, 1-4 May, 2005, 17p.
118. Henry J.J., Meyer W.E., Prediction of Aggregate and Pavement Polishing, *Bulletin of the International Association of ENGINEERING GEOLOGY*, 1984, N°29, 4p.
119. Song W., Chen X., Smith T. et al., Investigation of Hot Mix Asphalt Surface Pavements Skid Resistance in Maryland State Highway Network System, *TRB 85th Annual Meeting, Transportation Research Board*, Washington D.C., 2006, 15p.
120. Brillet F., Gothié M., Variations saisonnières de l'adhérence des chaussées mesurée par l'appareil scrim, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, sept. - oct, 1983, N°127, pp.37-52.
121. Giles C.G., Sabey B.E., A note on the problem of 'seasonal variation' in skidding resistance, Road Research Laboratory, Department of Scientific and Industrial Research, United Kingdom, 1958, pp.563-568.

122. Diringer K.T., Aggregates and Skid Resistance, U.S. Department of Transportation and Federal Highway Administration, 1990, FHWA/NJ-89-008-7110, 55p.
123. Farcas F., Étude d'une Méthode de Simulation du Vieillissement des Bitumes Sur Route, Laboratoire Central de Ponts et Chaussées, 1998, CR 21, 223p.
124. Ramond G., Such C., Bitumes et Bitumes Modifiés - Relations Structures, Propriétés, Composition, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1990, N°168, pp.65-87.
125. AFNOR, norme NF EN 12607-1, Bitumes et liants bitumineux – Détermination de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air – Partie 1 : Méthode RTFOT, Juin 2007, 17p.
126. AFNOR, norme NF EN 12607-2, Bitumes et liants bitumineux – Détermination de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air – Partie 2 : Méthode TFOT, Juin 2007, 12p.
127. Korsgaard H.C. *et al.*, Accelerated Ageing of Asphalt in Pressure Ageing Vessel, *Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 1996, 11p.
128. AFNOR, norme NF EN 14769, Bitumes et liants bitumineux – Vieillissement long-terme accéléré réalisé dans un récipient de vieillissement sous pression (PAV), Mars 2006, 13p.
129. Gorlé D., Van Rooten C., Mode opératoire (Simulation du Vieillissement In Situ des Liants Bitumineux, Méthode RCAT), Centre de recherches routières, Bruxelles, Belgique, 2001, 19p.
130. AFNOR, norme NF EN 15323, Bitumes et liants bitumineux – Vieillissement / conditionnement long-terme accéléré par la méthode du cylindre tournant (RCAT), Mars 2007, 12p.
131. Potchka V., Alterungbeständigkeit und Homogenität Von Bitumen, *Strasse und Verkher 2000*, 1988, Vol.2B-21, pp.285-288.
132. Davis T.C., Petersen J.C., An adaptation of inverse Gas Liquid Chromatography to asphalts studies, *Analytical Chemistry*, 1966, Vol.38, pp.1988-1990.
133. Lee D.Y., Asphalt Durability Correlation in lowa, *Highway Research Board Record*, 1973, Vol.468, pp.43-60.
134. Mastrofini D., Scarsella M., The Application of Rheology to the Evaluation of Bitumen Ageing, *Fuel*, 2000, pp.1005-1015.
135. Pasetto M. Experimental Simulation of the Deterioration of the Surface Characteristics of Road Pavements – Application to Bituminous Surfacings Given Roughening Treatments. *Proceeding of 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona 2000*, Book II, 2000, pp.448-456.
136. AFNOR, norme NF EN 1097-8 (Normalisation Française P18-575), Essais sur les propriétés mécaniques et physiques des granulats – Partie 8 : détermination du coefficient de polissage accéléré, Mars 2000, 32p.
137. AFNOR, norme NF XP P 18-580, Granulats - Détermination de la résistance au polissage accéléré des gravillons – Méthode par projection, Octobre 1997, 9p.
138. Delalande G., Résistance des granulats au polissage – Méthode d'essai par projection, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, jan. – févr., 1992, N°177, pp.5-17.
139. Delalande G., Résistance des granulats au polissage – Méthode d'essai par projection, Laboratoire Régional d'Angers, FAER 1.35.01, 1991, 39p.
140. Himeno K., Nakamura Y., Kawamura A., et *al.*, Skid Resistance of Asphalt Pavement Surface Related to their Microtexture, *Proceedings of the 4th International Symposium on Pavement Surface Characteristics*, Nantes, France, 22-24 May, 2000, pp.205-215.
141. Dewey G.R., Robords A.C., Armour B.T. et *al.*, Aggregate Wear and Pavement Friction, *TRB 80th Annual Meeting*, *Transportation Research Board*, Washington D.C., 2000, No.01-3443, 17p.
142. AFNOR, norme NF EN 1097-1, Essais pour déteminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 1 : détermination de al résistance à l'usure (micro-DEVAL), Novembre 1996, 13p.
143. AFNOR, norme NF EN 1097-2, Essais pour déteminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 1 : détermination de la résistance à la fragmentation, Octobre 1998, 33p.
144. Huschek S., Gothié M., Do M.-T. et *al.*, Adhérence des chaussées dans le cadre de la coopération franco-allemande dans le domaine des ponts et chaussées, LCPC et Université de Berlin, Berlin, Juin 2005, 44p.
145. Imagine Optic, Procédure de mesure de reproductibilité du capteur PH-LINETM, 2001.
146. STIL, SurfaceMap – Motion Control & Acquisition Software for Micromesure Systems, Manuel d'utilisation, ?, 66p.
147. AFNOR, NF EN 14231, Méthodes d'essai pour les pierres naturelles – Détermination de la résistance à la glissance au moyen du Pendule de Frottement, Décembre 2003, 14p.
148. AFNOR, NF EN ISO 4287, Spécification géométrique des produits (GPS) – Etat de surface : Méthode du profil – Termes, définitions et paramètres d'état de surface, Décembre 1998, 52p.

149. AFNOR, NF P 98-130, Enrobés hydrocarbonés, Couches de roulement et couches de liaison : bétons bitumineux semi-grenus, 1999, 13p.
150. AFNOR, NF EN 13108-2 (Normalisation Française XP P 98-137), Mélanges bitumineux – Spécification des matériaux – Partie 2 : béton bitumineux très minces, Décembre 2006, 26p.
151. AFNOR, NF EN 13108-7 (Normalisation Française XP P 98-134), Mélanges bitumineux – Spécification des matériaux – Partie 7 : béton bitumineux drainants, Décembre 2006, 31p.
152. Do M.-T., Tang Z.-Z., Kane M., de Larrard F., Pavement Polishing - Development of a Dedicated Laboratory Test and Its Correlation with Road, Journal *Wear*, *16th International Conference on Wear of Materials, Montreal*, Canada, 16-20 April, 2007.
153. Le materiel LPC, LPC equipment, LCPC 2003.
154. AFNOR, NF EN 12697-33 (Normalisation Française NF P98-250-2), Mélange bitumineux – Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 33 : confection d'éprouvettes au compacteur de plaque, Juillet 2004, 23p.
155. Brosseaud Y., Le Turdu V., Adhérence des revêtements de chaussées routières, *Bulletin liaison des Ponts et Chaussées*, 2005, N°255, pp.71-90.
156. Tang Z.-Z., Kane M., Do M.-T., de Larrard F., Simulation expérimentale du polissage par le trafic des revêtements de chaussée, *4ème Journées des Sciences de l'Ingénieur*, Marne-la-Vallée, France, 5-6 Décembre, 2006, 7p.
157. Do M.-T., Tang Z.-Z., Kane M., de Larrard F., Simulation expérimentale et modélisation du polissage par le trafic des revêtements de chaussée, sous presse, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 2007.
158. Do M.-T., Tang Z.-Z., Kane M., de Larrard F., Evolution of Road Surface Skid-Resistance and Texture due to Polishing, *Journal 'Wear'*, *11th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surface*, United Kingdom, Juillet 2007.
159. Leu M.C., Henry J.J., Prediction of Skid Resistance as a Function of Speed From Pavement Texture Measurements, Transportation Research Record, 1978, N°666, pp.7-13.
160. Kane M., Do M.-T., Tang Z.-Z., Modélisation du polissage des revêtements de chaussée soumis au trafic routier, *Proceedings de 19ème Journées Francophones de Tribologie*, Poitiers – Futuroscope, 22-23 Mai, 2007.
161. Preston, F.W., The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines, *J. Soc Glass Technology*, 1927, Vol.11, pp.214-256.
162. Wieland M., Hänggi P., Hotz W., et *al.*, Wavelength-Dependent Measurement and Evaluation of Surface Topographies: Application of a New Concept of Window Roughness and Surface Transfer Function, *Wear*, 2000, N°237(2), pp.231–252.
163. AFNOR, NF EN ISO 11562, Spécification géométrique des produits (GPS) – Etat de surface : méthode du profil – Caractéristiques métrologiques des filtres à phase correcte, 1998, 15p.

# VIII Annexes

## Annexe A – Photos des granulats au cours du polissage

Les observations visuelles sont d'abord effectuées à l'aide de photos prises à chaque stade du polissage. Les étapes du processus de polissage des revêtements de chaussée sont montrées à la Figure VIII.1. Sur la photo (a), c'est un granulat à l'état initial. On voit un granulat recouvert de bitume sur cette photo, puis, débarrassé de son bitume sur la photo (b), à ce stade, la phase de décapage est terminée, on atteint le maximum du coefficient de frottement. Les dernières photos (c) et (d) montrent un granulat poli ; ces phases correspondent à la décroissance du coefficient de frottement.

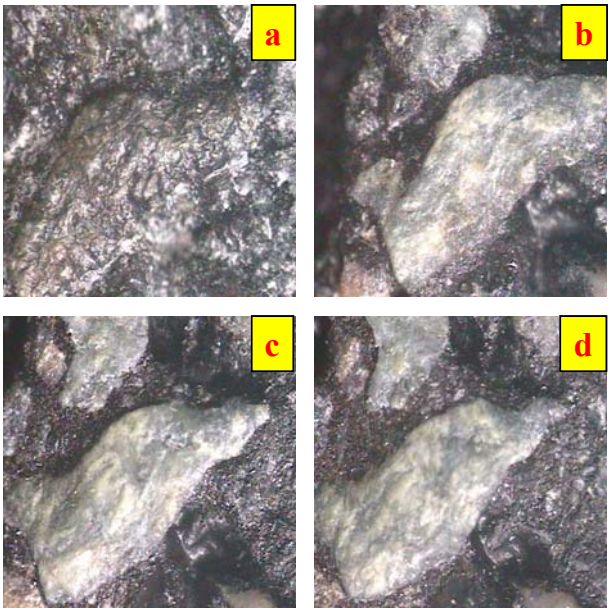



*Figure VIII.1 : Les photos prises à différentes étapes de polissage d'un enrobé D*

*Les photos de gauche à droite et de haut à bas concernant le polissage à différents stades pour le cas d'un enrobé : (a) état initial ; (b) état après décapage ; (c) état obtenu après 90 000 rotations de polissage ; (d) état obtenu après 180 000 rotations de polissage.*

A cause de l'absence de liant sur l'échantillon de gravillons, l'évolution de l'adhérence du granulat ne varie pas de la même façon que celle relative à l'enrobé. Le coefficient de frottement maximal est obtenu à l'état initial. L'adhérence diminue avec les cycles du polissage. Les différentes étapes du polissage d'un granulat sont présentées dans la Figure VIII.2. La photo (a) est celle de l'état initial. La surface du granulat est plus rugueuse et le coefficient de frottement est plus élevé. Sur les deux autres photos (b) et (c), les granulats sont polis et le coefficient de frottement diminue.

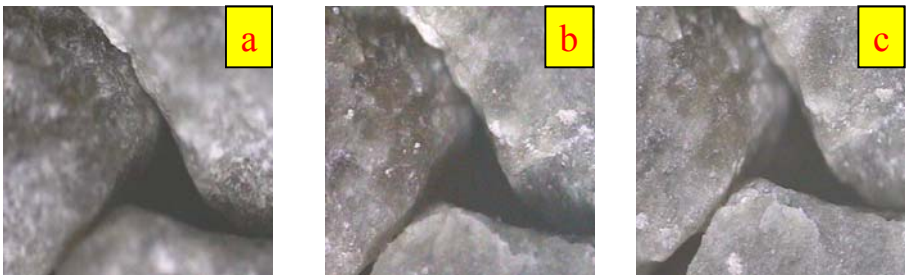



*Figure VIII.2 : Les états naturels et polis d'un granulat*

*Les photos de gauche à droite concernant le polissage à différents stades pour le cas d'un granulat : (a) état initial ; (b) état obtenu après 90 000 rotations de polissage ; (c) état obtenu après 180 000 rotations de polissage.*

# Annexe B – Recalage du profil

Les profils, à différents niveaux de polissage, sont relevés à l'aide d'un capteur sans contact muni d'un faisceau laser. Les relevés sont caractérisés par un pas de mesure de 10 µm et une longueur par profil de 76 mm, totalisant 7601 points de mesure.

Dans un premier temps, les données de mesure obtenues sont corrigées à l'aide de la méthode du filtrage 'Gaussien' [163]. Le principal défaut de ce filtre est que la ligne moyenne est perturbée par les pics et creux seuillés. Ceci a pour effet, par exemple, de créer des remontées artificielles du profil de rugosité de part et d'autre d'un creux, modifiant ainsi légèrement la valeur des paramètres d'état de surface.

Les échantillons sont démontés et recalés à chaque relevé de profil. Cependant, il est impossible de recaler l'échantillon à la position précédente, ce qui a pour conséquence de décaler les profils les uns des autres (cf. Figure VIII.3). D'où la nécessité de recaler ces derniers au profil initial par auto-corrélation.

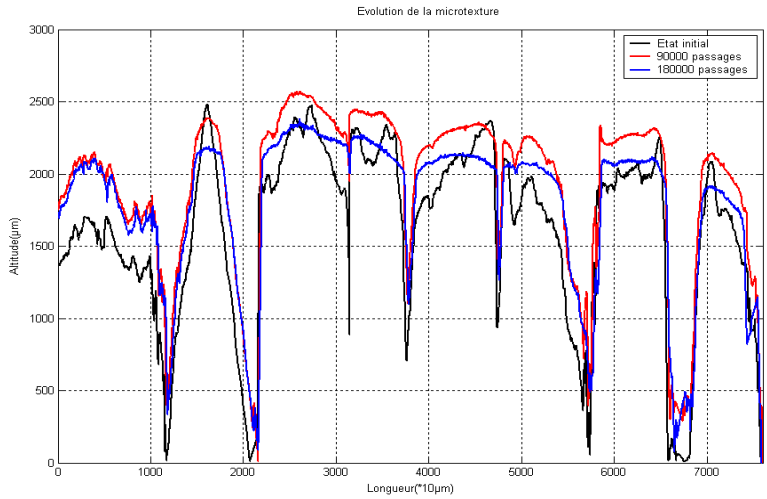



*Figure VIII.3 : Profils à différents stades de polissage avant recalage*

Le processus du recalage se compose de trois parties : le redressement pour chaque profil, le recalage suivant la direction 'x' et le recalage suivant la direction 'z'. L'algorithme de recalage est proposé à la Figure VIII.4.

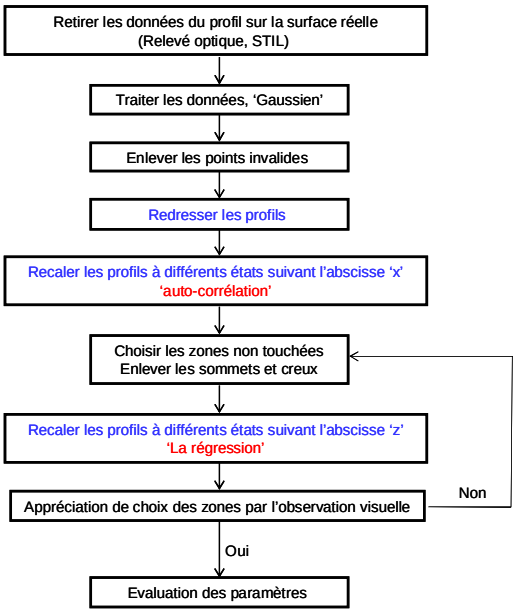



*Figure VIII.4 : Démarche pour l'analyse du profil*

- redressement du profil : Chaque profil est redressé jusqu'au niveau horizontal pour corriger la déviation de l'échantillon suscitée par le démontage. Après le redressement, la valeur de l'altitude varie dans un intervalle (1500, -1500) par rapport à l'intervalle de mesure (0, 3000) ;
- recalage suivant la direction 'x' : La méthode d'« auto-corrélation » est utilisée pour cette tâche. Chaque fois, le profil à l'état initial est considéré comme une référence. Les profils à différents stades de polissage sont recalés pour rapprocher cette référence à l'aide de la méthode d'« auto-corrélation ». Ainsi, on peut obtenir les profils avec le recalage suivant la direction 'x' ;
- recalage suivant la direction 'z' : Comme la méthode d'« auto-corrélation » fonctionne seulement pour le recalage suivant la direction 'x', la méthode des « moindres carrés » est donc utilisée pour le recalage suivant la direction 'z'. On minimise la distance entre tous les points de deux profils pour superposer les courbes. Cependant, il s'agit de faire le choix de la zone d'analyse sur le profil. D'un côté, la partie haute du profil varie chaque fois car les aspérités sont soit enlevées, soit diminuées, par le polissage. De l'autre côté, les résidus, soit la silice, soit les miettes pelées des granulats, laissés dans les creux entre les granulats influencent le profil du granulat. Ce sont les incertitudes variant avec le polissage. Donc, il est préférable de les enleveret le recalage est fait sur une zone médiane qui n'est pas touchée par le polissage. Dans notre étude, une zone de la hauteur 700 µm est choisie. Cette zone est limitée à 200 µm au dessus de l'abscisse 'x' et 500 µm au dessous de l'abscisse 'x'.

# Annexe C – Comparaison des paramètres de rugosité (cas des granulats)

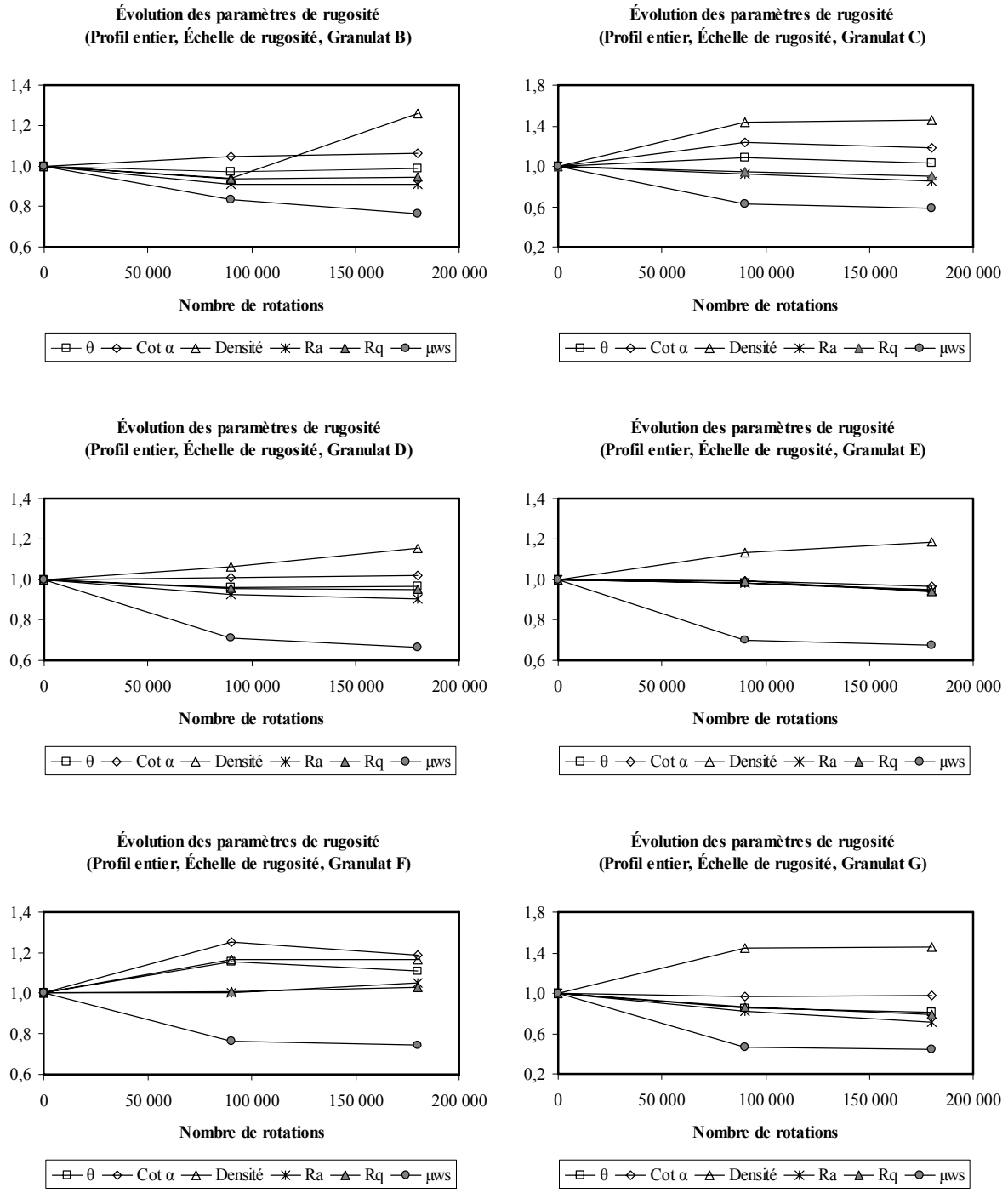



*Figure VIII.5 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil entier, Échelle de rugosité, Granulat B - G)*

| Paramètres de rugosité | Nombre de rotations | N° du granulat | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | C | D | E | F | G |
| θ (radian) | 0 | 0,239 | 0,264 | 0,214 | 0,303 | 0,279 | 0,238 | 0,228 |
| | 90000 | 0,253 | 0,257 | 0,232 | 0,291 | 0,274 | 0,276 | 0,193 |
| | 180000 | 0,247 | 0,262 | 0,221 | 0,294 | 0,265 | 0,264 | 0,185 |
| Cot α | 0 | 0,616 | 0,653 | 0,518 | 0,833 | 0,812 | 0,658 | 0,618 |
| | 90000 | 0,697 | 0,683 | 0,641 | 0,840 | 0,810 | 0,823 | 0,596 |
| | 180000 | 0,692 | 0,695 | 0,614 | 0,851 | 0,786 | 0,781 | 0,603 |
| Densité ($mm^{-1}$) | 0 | 17 | 14 | 13 | 17 | 17 | 18 | 14 |
| | 90000 | 20 | 13 | 19 | 18 | 19 | 21 | 20 |
| | 180000 | 20 | 18 | 20 | 20 | 20 | 21 | 20 |
| $R_a$ (µm) | 0 | 194 | 448 | 450 | 477 | 435 | 367 | 492 |
| | 90000 | 173 | 408 | 418 | 441 | 428 | 368 | 403 |
| | 180000 | 162 | 407 | 384 | 432 | 411 | 387 | 352 |
| $R_q$ (µm) | 0 | 240 | 543 | 550 | 576 | 508 | 454 | 599 |
| | 90000 | 213 | 508 | 523 | 550 | 506 | 458 | 517 |
| | 180000 | 201 | 513 | 497 | 548 | 479 | 467 | 473 |
| $\mu_{ws}$ | 0 | 0,509 | 0,555 | 0,486 | 0,452 | 0,458 | 0,456 | 0,444 |
| | 90000 | 0,441 | 0,462 | 0,305 | 0,323 | 0,320 | 0,349 | 0,208 |
| | 180000 | 0,417 | 0,425 | 0,283 | 0,301 | 0,309 | 0,338 | 0,195 |

*Tableau VIII.1 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle de rugosité)*

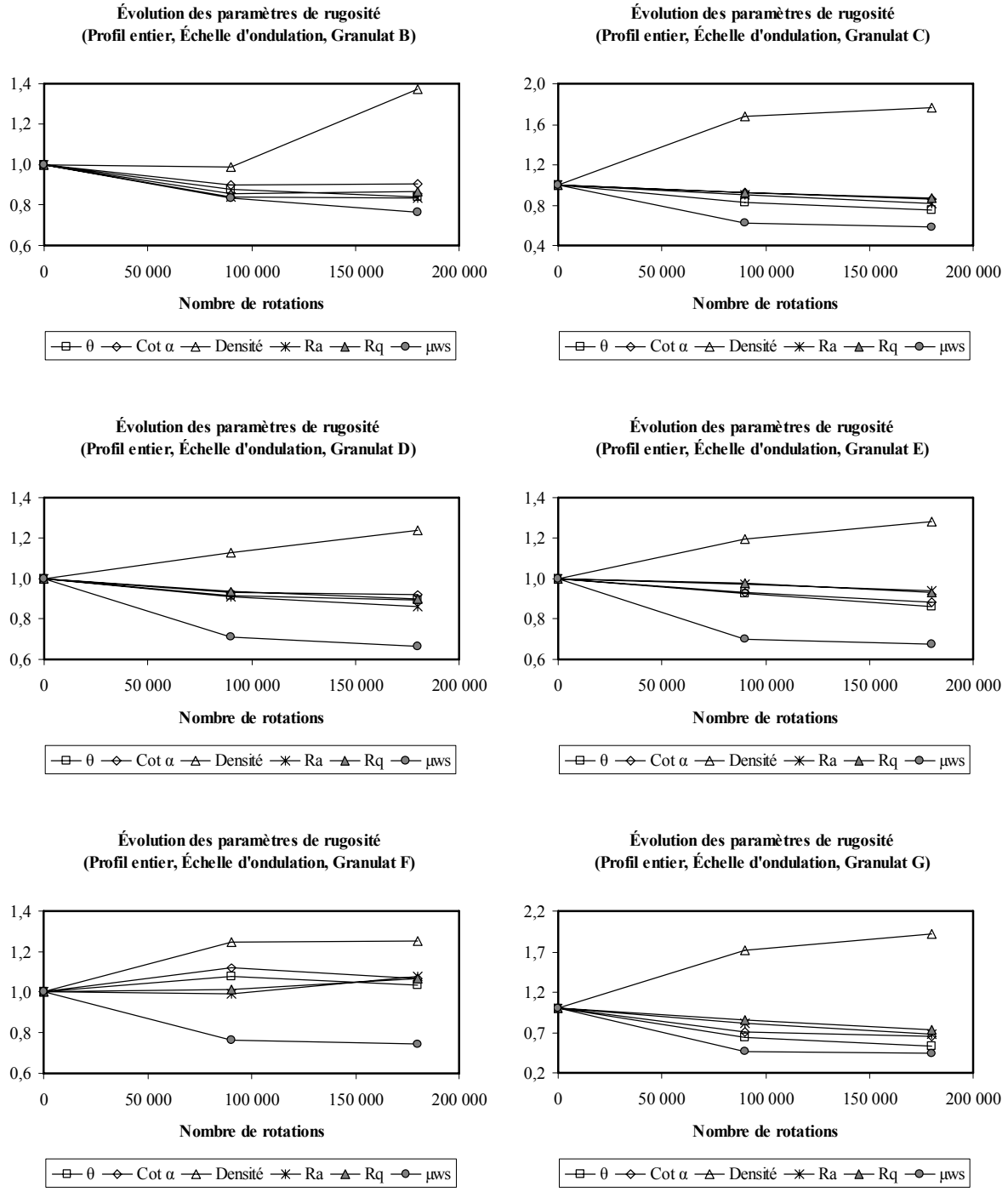



*Figure VIII.6 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil entier, Échelle d'ondulation, Granulat B - G)*

| Paramètres de rugosité | Nombre de rotations | N° du granulat | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | C | D | E | F | G |
| θ (radian) | 0 | 0,181 | 0,200 | 0,180 | 0,210 | 0,199 | 0,153 | 0,176 |
| | 90000 | 0,171 | 0,176 | 0,149 | 0,193 | 0,184 | 0,165 | 0,112 |
| | 180000 | 0,159 | 0,169 | 0,136 | 0,188 | 0,172 | 0,159 | 0,093 |
| Cot α | 0 | 0,418 | 0,473 | 0,392 | 0,508 | 0,491 | 0,385 | 0,424 |
| | 90000 | 0,420 | 0,425 | 0,363 | 0,471 | 0,456 | 0,432 | 0,297 |
| | 180000 | 0,403 | 0,428 | 0,337 | 0,467 | 0,434 | 0,411 | 0,278 |
| Densité ($mm^{-1}$) | 0 | 3,08 | 2,52 | 2,33 | 3,25 | 3,31 | 3,55 | 2,71 |
| | 90000 | 3,99 | 2,49 | 3,90 | 3,67 | 3,95 | 4,41 | 4,68 |
| | 180000 | 4,08 | 3,46 | 4,11 | 4,04 | 4,25 | 4,43 | 5,22 |
| $R_a$ (µm) | 0 | 190 | 422 | 423 | 445 | 417 | 342 | 451 |
| | 90000 | 166 | 355 | 379 | 405 | 405 | 340 | 368 |
| | 180000 | 153 | 352 | 346 | 383 | 393 | 368 | 305 |
| $R_q$ (µm) | 0 | 236 | 496 | 511 | 526 | 483 | 406 | 535 |
| | 90000 | 204 | 426 | 469 | 492 | 473 | 411 | 458 |
| | 180000 | 190 | 430 | 444 | 472 | 450 | 432 | 394 |
| $\mu_{ws}$ | 0 | 0,509 | 0,555 | 0,486 | 0,452 | 0,458 | 0,456 | 0,444 |
| | 90000 | 0,441 | 0,462 | 0,305 | 0,323 | 0,320 | 0,349 | 0,208 |
| | 180000 | 0,417 | 0,425 | 0,283 | 0,301 | 0,309 | 0,338 | 0,195 |

*Tableau VIII.2 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil entier, Échelle d'ondulation)*

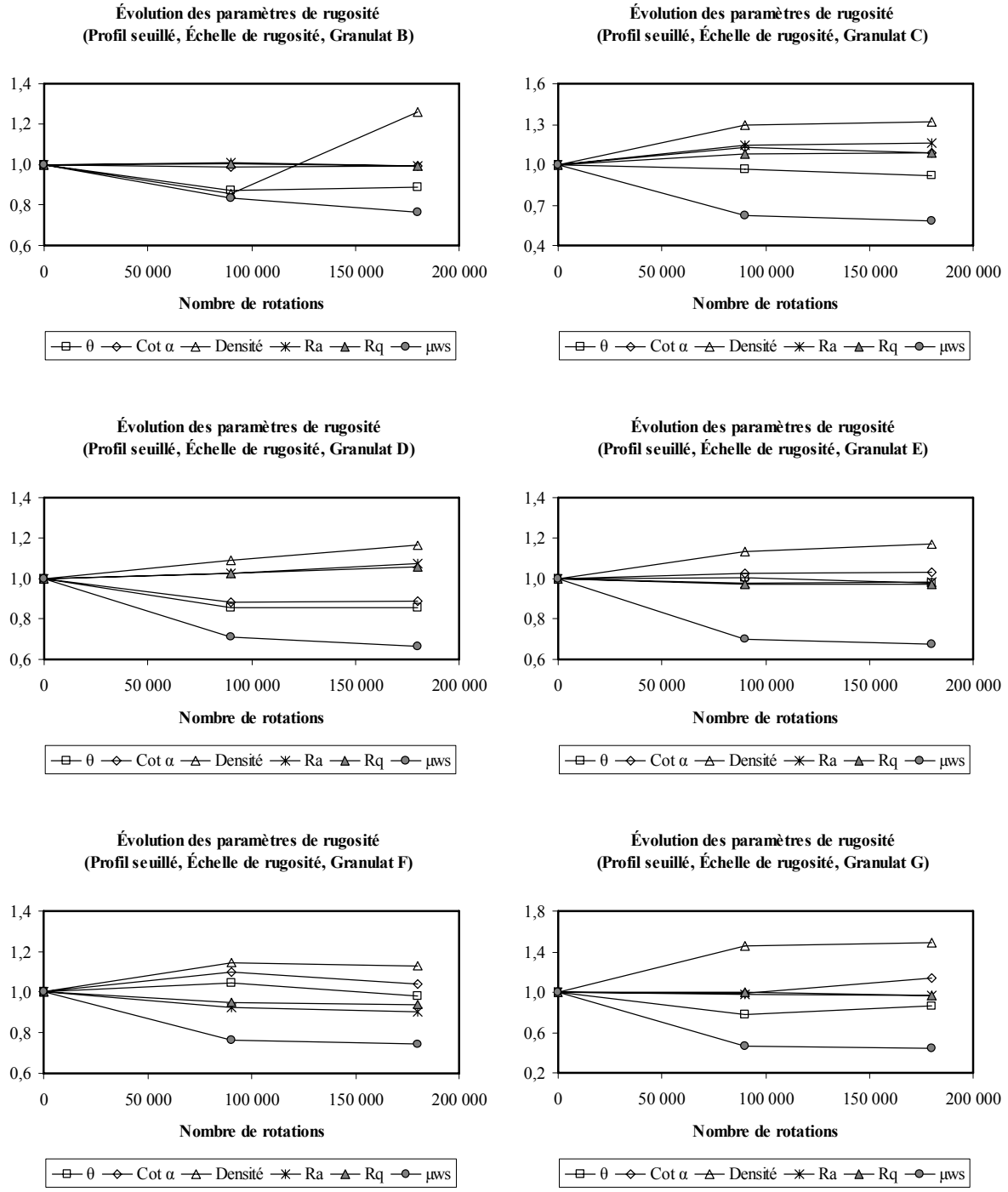



*Figure VIII.7 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil seuillé, Échelle de rugosité, Granulat B - G)*

| Paramètres de rugosité | Nombre de rotations | N° du granulat | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | C | D | E | F | G |
| θ (radian) | 0 | 0,231 | 0,217 | 0,177 | 0,251 | 0,213 | 0,206 | 0,167 |
| | 90000 | 0,227 | 0,189 | 0,172 | 0,215 | 0,214 | 0,215 | 0,130 |
| | 180000 | 0,219 | 0,193 | 0,163 | 0,214 | 0,208 | 0,202 | 0,144 |
| Cot α | 0 | 0,584 | 0,564 | 0,465 | 0,747 | 0,634 | 0,600 | 0,455 |
| | 90000 | 0,623 | 0,558 | 0,524 | 0,660 | 0,651 | 0,658 | 0,448 |
| | 180000 | 0,614 | 0,561 | 0,506 | 0,664 | 0,655 | 0,622 | 0,517 |
| Densité ($mm^{-1}$) | 0 | 17 | 18 | 17 | 19 | 20 | 20 | 17 |
| | 90000 | 21 | 15 | 23 | 21 | 22 | 23 | 25 |
| | 180000 | 21 | 22 | 23 | 23 | 23 | 23 | 25 |
| $R_a$ (µm) | 0 | 110 | 106 | 96 | 105 | 104 | 117 | 109 |
| | 90000 | 102 | 107 | 110 | 108 | 102 | 108 | 107 |
| | 180000 | 99 | 105 | 111 | 113 | 102 | 105 | 106 |
| $R_q$ (µm) | 0 | 133 | 127 | 119 | 125 | 126 | 134 | 130 |
| | 90000 | 125 | 128 | 129 | 129 | 122 | 128 | 129 |
| | 180000 | 122 | 126 | 130 | 133 | 122 | 126 | 126 |
| $\mu_{ws}$ | 0 | 0,509 | 0,555 | 0,486 | 0,452 | 0,458 | 0,456 | 0,444 |
| | 90000 | 0,441 | 0,462 | 0,305 | 0,323 | 0,320 | 0,349 | 0,208 |
| | 180000 | 0,417 | 0,425 | 0,283 | 0,301 | 0,309 | 0,338 | 0,195 |

*Tableau VIII.3 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle de rugosité)*

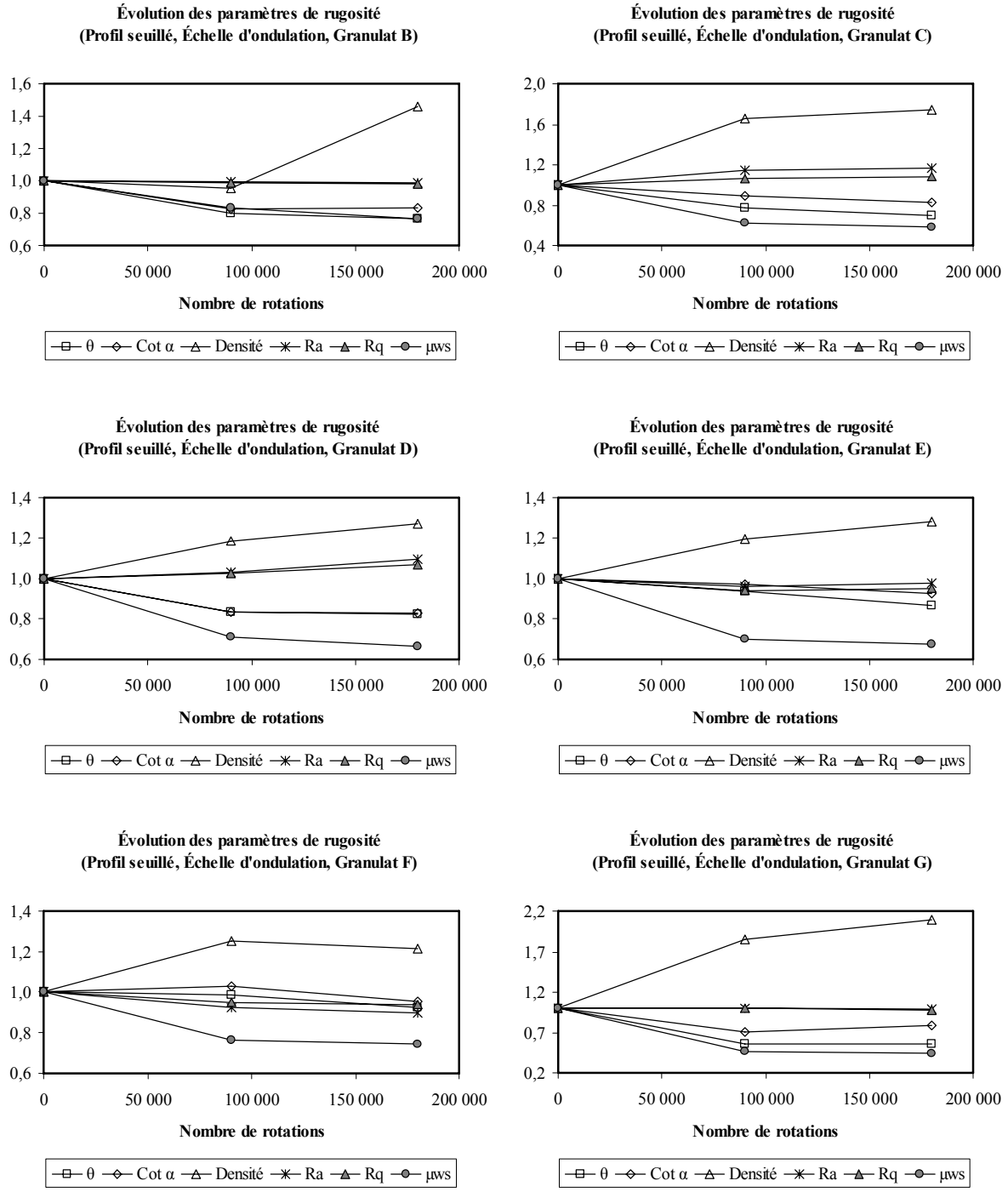



*Figure VIII.8 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B - G)*

| Paramètres de rugosité | Nombre de rotations | N° du granulat | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | C | D | E | F | G |
| θ (radian) | 0 | 0,153 | 0,146 | 0,126 | 0,157 | 0,134 | 0,130 | 0,114 |
| | 90000 | 0,148 | 0,117 | 0,097 | 0,131 | 0,126 | 0,128 | 0,064 |
| | 180000 | 0,133 | 0,112 | 0,088 | 0,129 | 0,116 | 0,120 | 0,064 |
| Cot α | 0 | 0,386 | 0,362 | 0,296 | 0,410 | 0,351 | 0,334 | 0,277 |
| | 90000 | 0,369 | 0,298 | 0,263 | 0,342 | 0,343 | 0,344 | 0,196 |
| | 180000 | 0,349 | 0,302 | 0,246 | 0,340 | 0,324 | 0,320 | 0,216 |
| Densité ($mm^{-1}$) | 0 | 3,19 | 3,30 | 3,07 | 3,95 | 4,14 | 4,15 | 3,34 |
| | 90000 | 4,32 | 3,15 | 5,10 | 4,69 | 4,96 | 5,19 | 6,20 |
| | 180000 | 4,45 | 4,81 | 5,35 | 5,02 | 5,31 | 5,03 | 6,97 |
| $R_a$ (µm) | 0 | 110 | 104 | 91 | 99 | 101 | 114 | 104 |
| | 90000 | 100 | 103 | 104 | 102 | 97 | 105 | 104 |
| | 180000 | 96 | 102 | 106 | 108 | 98 | 102 | 103 |
| $R_q$ (µm) | 0 | 137 | 127 | 117 | 121 | 125 | 132 | 125 |
| | 90000 | 126 | 125 | 124 | 124 | 118 | 126 | 126 |
| | 180000 | 121 | 125 | 126 | 130 | 119 | 124 | 123 |
| $\mu_{ws}$ | 0 | 0,509 | 0,555 | 0,486 | 0,452 | 0,458 | 0,456 | 0,444 |
| | 90000 | 0,441 | 0,462 | 0,305 | 0,323 | 0,320 | 0,349 | 0,208 |
| | 180000 | 0,417 | 0,425 | 0,283 | 0,301 | 0,309 | 0,338 | 0,195 |

*Tableau VIII.4 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des granulats (Profil seuillé, Échelle d'ondulation)*

# Annexe D – Comparaisons des paramètres de rugosité (cas des enrobés)

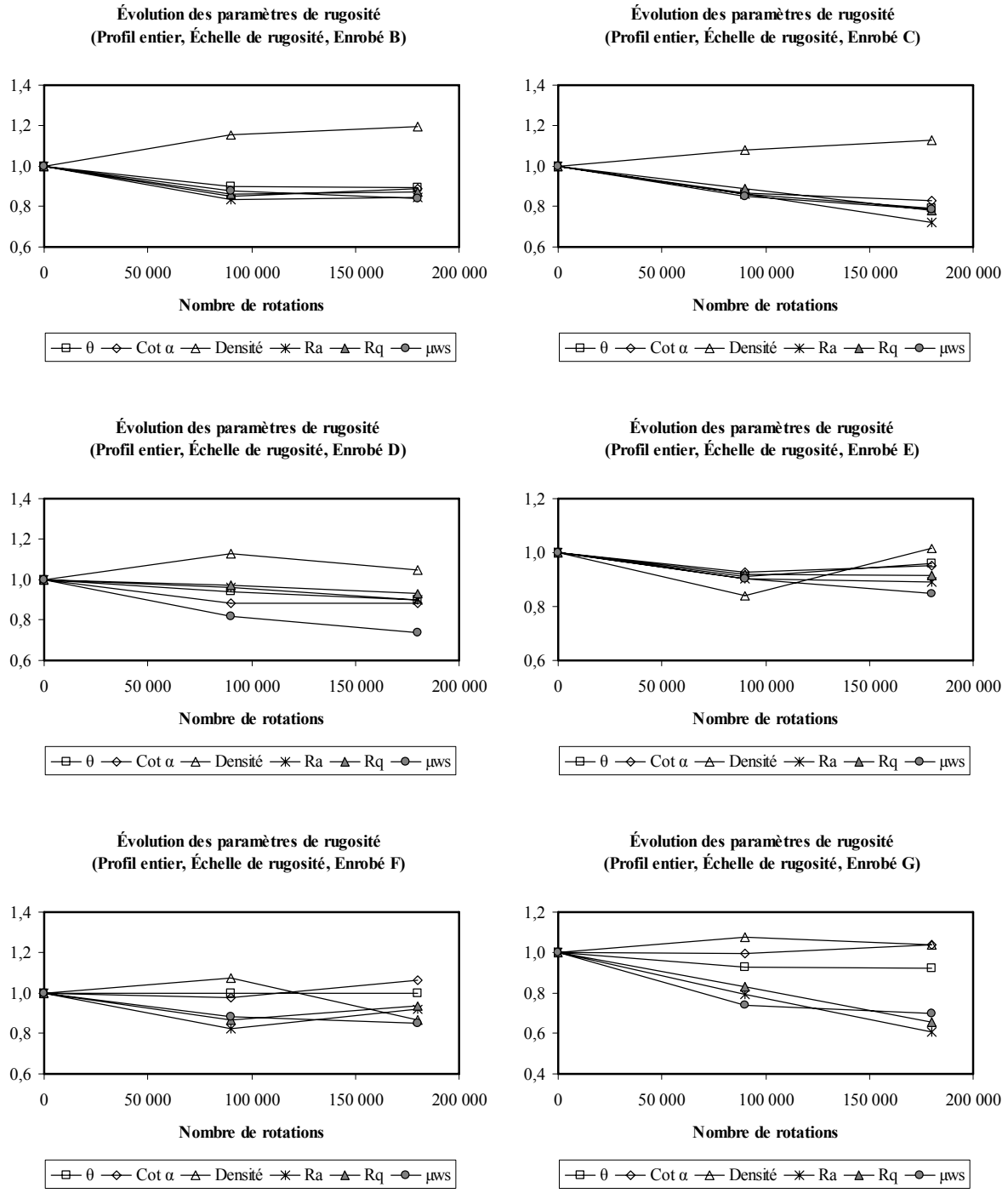



*Figure VIII.9 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil entier, Échelle de rugosité, Enrobé B - G)*

| Paramètres de rugosité | Nombre de rotations | N° du granulat | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | C | D | E | F | G |
| θ (radian) | 0 | 0,303 | 0,317 | 0,300 | 0,324 | 0,286 | 0,297 | 0,267 |
| | 90000 | 0,270 | 0,285 | 0,257 | 0,304 | 0,261 | 0,297 | 0,247 |
| | 180000 | 0,263 | 0,284 | 0,237 | 0,292 | 0,275 | 0,297 | 0,246 |
| Cot α | 0 | 0,950 | 0,989 | 0,868 | 1,005 | 0,898 | 0,926 | 0,858 |
| | 90000 | 0,826 | 0,842 | 0,750 | 0,887 | 0,834 | 0,909 | 0,856 |
| | 180000 | 0,792 | 0,879 | 0,720 | 0,889 | 0,854 | 0,987 | 0,891 |
| Densité ($mm^{-1}$) | 0 | 18 | 13 | 15 | 15 | 20 | 18 | 19 |
| | 90000 | 20 | 15 | 16 | 17 | 17 | 20 | 21 |
| | 180000 | 20 | 16 | 17 | 16 | 21 | 16 | 20 |
| $R_a$ (µm) | 0 | 422 | 393 | 308 | 507 | 307 | 361 | 394 |
| | 90000 | 311 | 328 | 266 | 489 | 278 | 298 | 313 |
| | 180000 | 305 | 333 | 223 | 456 | 274 | 333 | 239 |
| $R_q$ (µm) | 0 | 492 | 464 | 380 | 597 | 364 | 421 | 451 |
| | 90000 | 373 | 401 | 337 | 580 | 335 | 364 | 375 |
| | 180000 | 364 | 406 | 296 | 555 | 333 | 393 | 296 |
| $\mu_{ws}$ | 0 | 0,471 | 0,533 | 0,463 | 0,424 | 0,398 | 0,433 | 0,189 |
| | 90000 | 0,441 | 0,467 | 0,395 | 0,347 | 0,359 | 0,383 | 0,140 |
| | 180000 | 0,414 | 0,447 | 0,364 | 0,314 | 0,338 | 0,369 | 0,132 |

*Tableau VIII.5 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle de rugosité)*

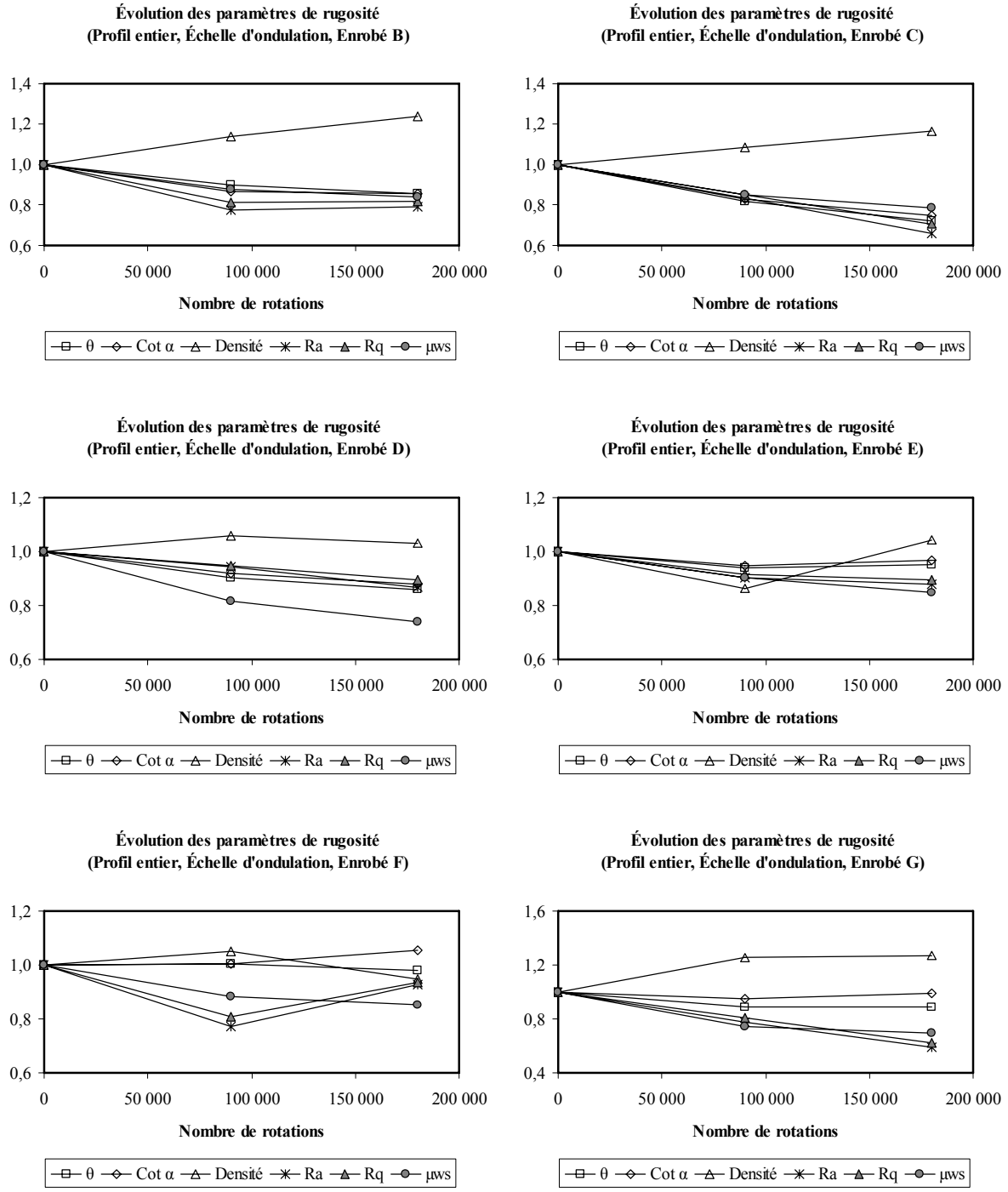



*Figure VIII.10 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil entier, Échelle d'ondulation, Enrobé B - G)*

| Paramètres de rugosité | Nombre de rotations | N° du granulat | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | C | D | E | F | G |
| θ (radian) | 0 | 0,185 | 0,205 | 0,207 | 0,218 | 0,168 | 0,188 | 0,144 |
| | 90000 | 0,162 | 0,184 | 0,170 | 0,197 | 0,157 | 0,189 | 0,129 |
| | 180000 | 0,162 | 0,176 | 0,150 | 0,187 | 0,159 | 0,184 | 0,128 |
| Cot α | 0 | 0,498 | 0,557 | 0,537 | 0,556 | 0,452 | 0,482 | 0,407 |
| | 90000 | 0,433 | 0,484 | 0,445 | 0,512 | 0,429 | 0,484 | 0,386 |
| | 180000 | 0,427 | 0,478 | 0,402 | 0,490 | 0,438 | 0,508 | 0,402 |
| Densité ($mm^{-1}$) | 0 | 4,22 | 2,81 | 3,28 | 3,48 | 4,47 | 3,92 | 4,28 |
| | 90000 | 4,47 | 3,20 | 3,56 | 3,70 | 3,87 | 4,12 | 5,36 |
| | 180000 | 4,42 | 3,49 | 3,83 | 3,59 | 4,68 | 3,72 | 5,44 |
| $R_a$ (µm) | 0 | 410 | 376 | 296 | 488 | 289 | 351 | 373 |
| | 90000 | 294 | 292 | 248 | 461 | 262 | 271 | 291 |
| | 180000 | 291 | 297 | 195 | 424 | 254 | 325 | 221 |
| $R_q$ (µm) | 0 | 474 | 430 | 353 | 567 | 340 | 405 | 432 |
| | 90000 | 348 | 350 | 301 | 538 | 311 | 328 | 350 |
| | 180000 | 341 | 351 | 249 | 509 | 304 | 379 | 270 |
| $\mu_{ws}$ | 0 | 0,471 | 0,533 | 0,463 | 0,424 | 0,398 | 0,433 | 0,189 |
| | 90000 | 0,441 | 0,467 | 0,395 | 0,347 | 0,359 | 0,383 | 0,140 |
| | 180000 | 0,414 | 0,447 | 0,364 | 0,314 | 0,338 | 0,369 | 0,132 |

*Tableau VIII.6 : Valeurs de paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil entier, Échelle d'ondulation)*

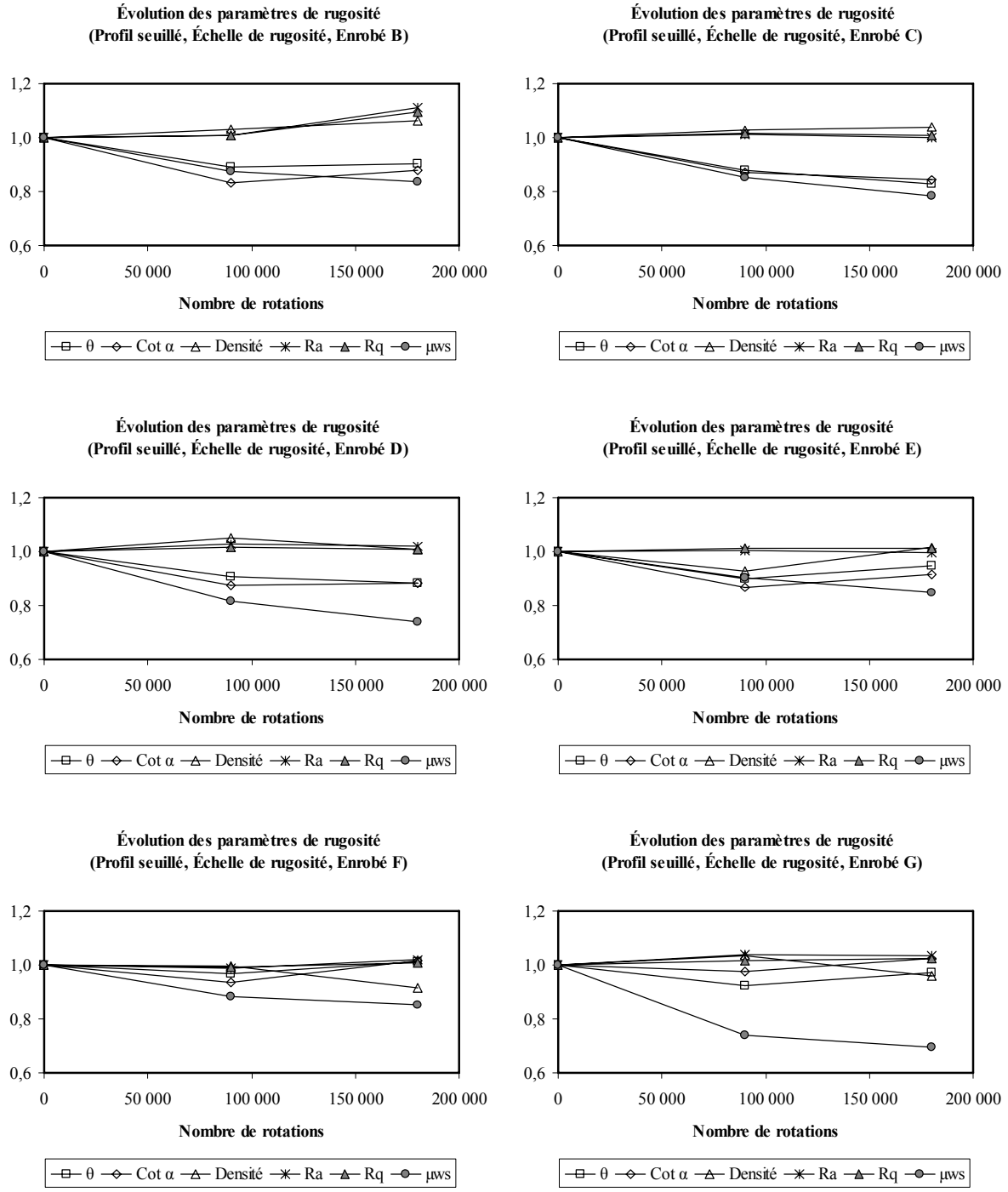



*Figure VIII.11 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil seuillé, Échelle de rugosité, Enrobé B - G)*

| Paramètres de rugosité | Nombre de rotations | N° du granulat | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | C | D | E | F | G |
| θ (radian) | 0 | 0,271 | 0,269 | 0,252 | 0,283 | 0,265 | 0,270 | 0,235 |
| | 90000 | 0,238 | 0,241 | 0,221 | 0,257 | 0,238 | 0,261 | 0,217 |
| | 180000 | 0,232 | 0,244 | 0,208 | 0,250 | 0,251 | 0,273 | 0,228 |
| Cot α | 0 | 0,903 | 0,847 | 0,749 | 0,921 | 0,886 | 0,884 | 0,817 |
| | 90000 | 0,759 | 0,704 | 0,653 | 0,807 | 0,769 | 0,827 | 0,797 |
| | 180000 | 0,722 | 0,746 | 0,632 | 0,816 | 0,810 | 0,899 | 0,837 |
| Densité ($mm^{-1}$) | 0 | 21 | 19 | 19 | 20 | 22 | 21 | 23 |
| | 90000 | 22 | 20 | 20 | 21 | 21 | 21 | 24 |
| | 180000 | 22 | 20 | 20 | 20 | 23 | 19 | 22 |
| $R_a$ (µm) | 0 | 99 | 93 | 97 | 103 | 97 | 95 | 112 |
| | 90000 | 95 | 94 | 98 | 106 | 97 | 94 | 117 |
| | 180000 | 97 | 104 | 97 | 105 | 96 | 97 | 116 |
| $R_q$ (µm) | 0 | 123 | 113 | 116 | 125 | 117 | 115 | 133 |
| | 90000 | 116 | 114 | 118 | 127 | 118 | 114 | 136 |
| | 180000 | 117 | 124 | 117 | 126 | 118 | 116 | 137 |
| $\mu_{ws}$ | 0 | 0,471 | 0,533 | 0,463 | 0,424 | 0,398 | 0,433 | 0,189 |
| | 90000 | 0,441 | 0,467 | 0,395 | 0,347 | 0,359 | 0,383 | 0,140 |
| | 180000 | 0,414 | 0,447 | 0,364 | 0,314 | 0,338 | 0,369 | 0,132 |

*Tableau VIII.7 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle de rugosité)*

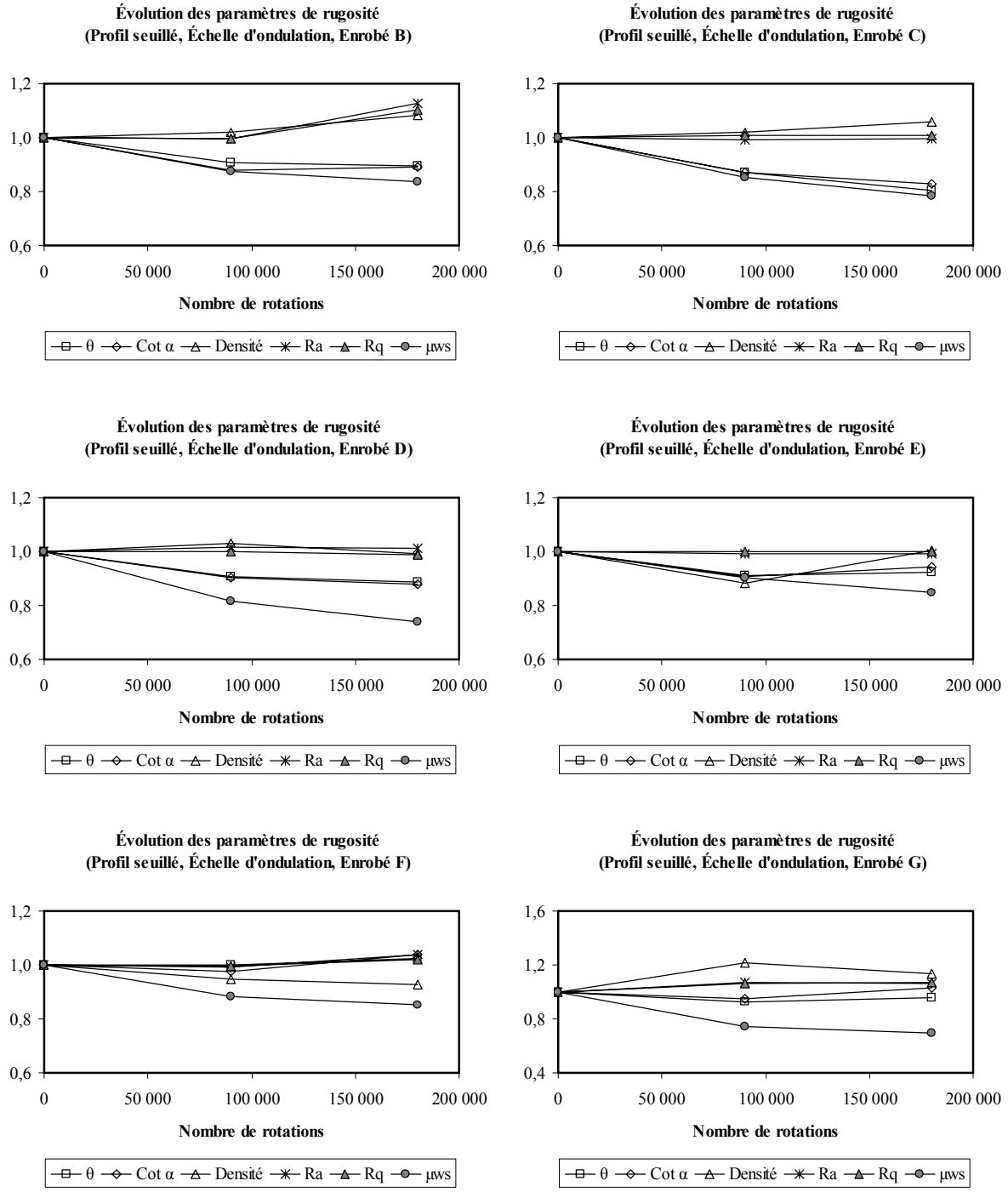



*Figure VIII.12 : Évolutions des paramètres de rugosité et du frottement (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Enrobé B - G)*

| Paramètres de rugosité | Nombre de rotations | N° du granulat | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | C | D | E | F | G |
| θ (radian) | 0 | 0,150 | 0,166 | 0,150 | 0,162 | 0,154 | 0,156 | 0,119 |
| | 90000 | 0,131 | 0,150 | 0,131 | 0,147 | 0,141 | 0,156 | 0,110 |
| | 180000 | 0,131 | 0,148 | 0,121 | 0,144 | 0,142 | 0,159 | 0,115 |
| Cot α | 0 | 0,443 | 0,446 | 0,405 | 0,461 | 0,430 | 0,434 | 0,364 |
| | 90000 | 0,377 | 0,392 | 0,354 | 0,417 | 0,391 | 0,424 | 0,348 |
| | 180000 | 0,368 | 0,397 | 0,335 | 0,407 | 0,407 | 0,451 | 0,375 |
| Densité ($mm^{-1}$) | 0 | 5,15 | 4,26 | 4,25 | 4,98 | 5,44 | 4,97 | 5,51 |
| | 90000 | 5,27 | 4,35 | 4,33 | 5,13 | 4,81 | 4,72 | 6,68 |
| | 180000 | 5,05 | 4,61 | 4,50 | 4,93 | 5,46 | 4,61 | 6,26 |
| $R_a$ (µm) | 0 | 97 | 91 | 97 | 100 | 95 | 92 | 107 |
| | 90000 | 93 | 90 | 96 | 101 | 94 | 91 | 115 |
| | 180000 | 94 | 102 | 97 | 101 | 94 | 96 | 114 |
| $R_q$ (µm) | 0 | 122 | 112 | 116 | 124 | 117 | 112 | 127 |
| | 90000 | 115 | 112 | 117 | 124 | 117 | 112 | 135 |
| | 180000 | 114 | 124 | 117 | 123 | 117 | 115 | 136 |
| $\mu_{ws}$ | 0 | 0,471 | 0,533 | 0,463 | 0,424 | 0,398 | 0,433 | 0,189 |
| | 90000 | 0,441 | 0,467 | 0,395 | 0,347 | 0,359 | 0,383 | 0,140 |
| | 180000 | 0,414 | 0,447 | 0,364 | 0,314 | 0,338 | 0,369 | 0,132 |

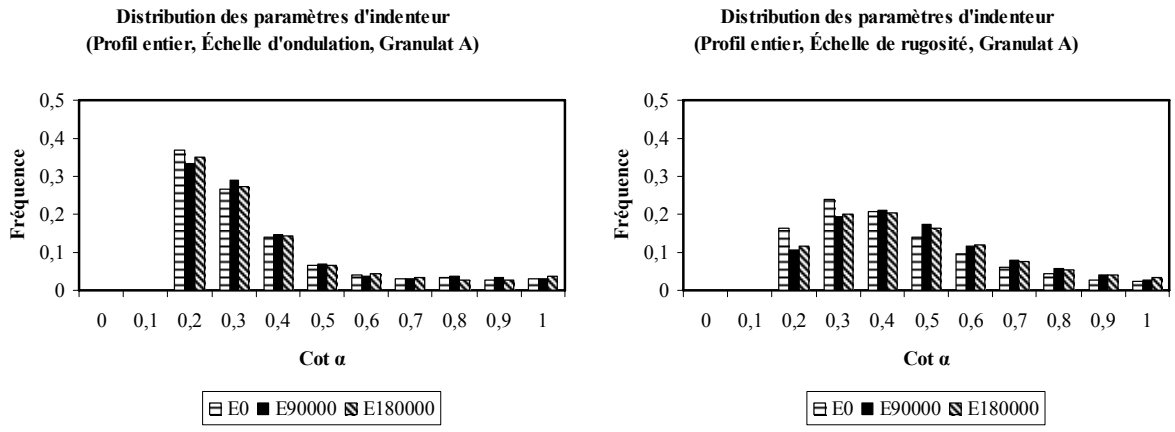
*Tableau VIII.8 : Valeurs des paramètres de rugosité et du frottement WS dans le cas de l'ensemble des enrobés (Profil seuillé, Échelle d'ondulation)*

# Annexe E – Distribution des paramètres d'indenteur en fonction du nombre de rotations

Des travaux de l'analyse de la microtexutre (cf. V.2.2), seuls les évolutions des paramètres en fonction du nombre de rotations ont été étudiées. Ces paramètres sont les valeurs moyennes à chaque stade de polissage pour toutes les fréquences. Nous pouvons comparer la distribution des paramètres à un stade de polissage pour le granulat et l'enrobé. Ces résultats sont présentés ci-après.

Granulats

Jusqu'à présent, les calculs des paramètres concernent les valeurs moyennes pour quinze profils de chaque granulat. Pour connaître la variation des différentes échelles des aspérités, les courbes de distribution des paramètres de rugosité pour le cas A sont représentées. Ces courbes sont données pour deux profils (entier et seuillé).




**(a) Échelle d'ondulation** **(b) Échelle de rugosité**

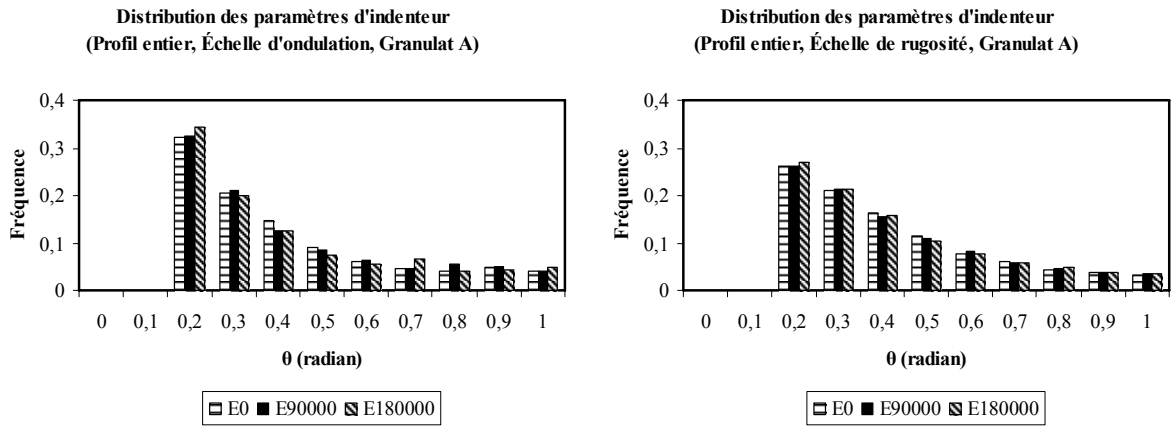
*Figure VIII.13 : Distributions du paramètre Cot α dans le cas d'un granulat A et d'un Profil entier*

La Figure VIII.13a montre la distribution du paramètre Cot α à l'échelle d'ondulation pour le profil entier. Nous constatons que la majorité des valeurs est inférieure à 0,2. Le pourcentage maximal varie de 30 % à 40 % pour les différents granulats. En fait, cette évolution peut se traduire par une courbe exponentielle décroissante. La distribution du paramètre Cot α à l'échelle de rugosité est représentée à la Figure VIII.13b.

Les paramètres d'indenteur de l'échelle de rugosité et de l'échelle d'ondulation sont supérieurs à 0,1. Ceci se retrouve pour tous les paramètres d'indenteur pour le profil entier et pour le profil seuillé. Cette observation est expliquée par le rapport entre la hauteur d'indenteur et la largeur d'indenteur. D'après Do [31], la dimension verticale de

la microtexture est comprise entre 0,001 mm et 0,5 mm. En fait, le pas de mesure à l'aide de relevé optique est de 0,01 mm. Le rapport entre deux distances varie donc entre 0,1 et 50. Les valeurs de Cot α, données dans ce rapport, doivent être supérieures à 0,1.

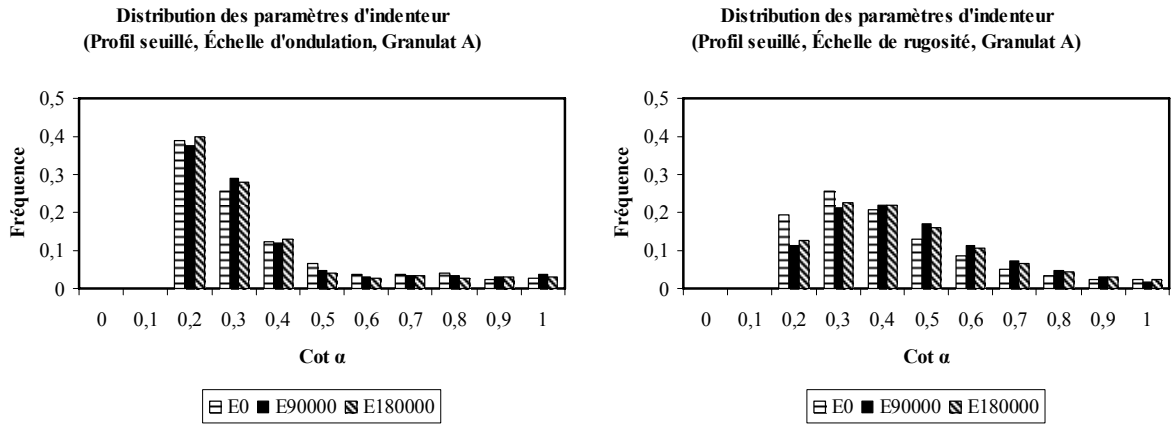
A la Figure VIII.14, les distributions du paramètre θ à l'échelle de rugosité et à l'échelle d'ondulation pour le profil entier sont données. Nous constatons que l'évolution de la distribution varie aussi comme une courbe exponentielle décroissante. Rappelons que le paramètre θ est exprimé en radian.




**(a) Échelle d'ondulation** **(b) Échelle de rugosité**

*Figure VIII.14 : Distributions du paramètre θ dans le cas d'un granulat A et d'un Profil entier*

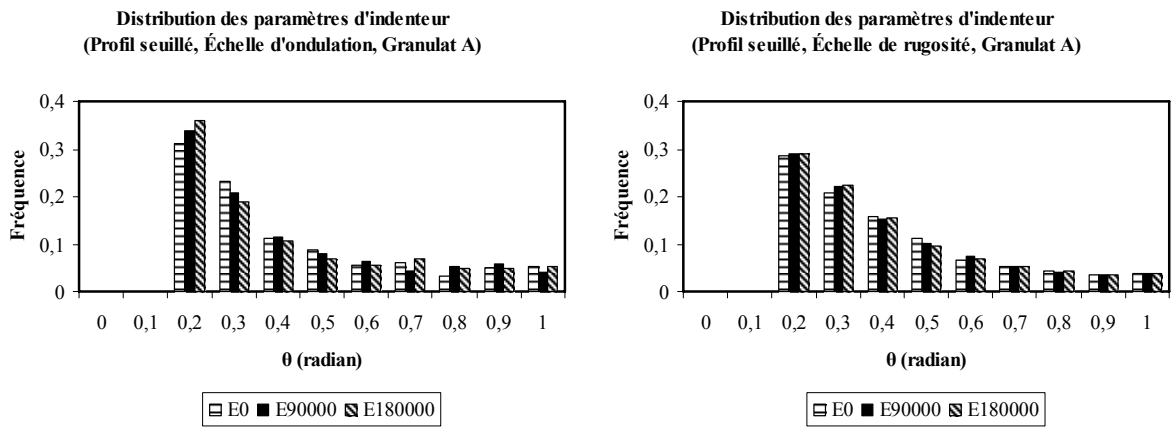
Les distributions du paramètre Cot α pour le profil seuillé sont présentées à la Figure VIII.15. Par rapport à celles du profil entier, les valeurs d'environ 0,2 sont plus importantes pour le profil seuillé.




**(a) Échelle d'ondulation** **(b) Échelle de rugosité**

*Figure VIII.15 : Distributions du paramètre Cot α dans le cas d'un granulat A et d'un Profil seuillé*

La Figure VIII.16 montre les distributions du paramètre Cot α pour le profil seuillé. L'évolution des courbes est de type exponentiel.



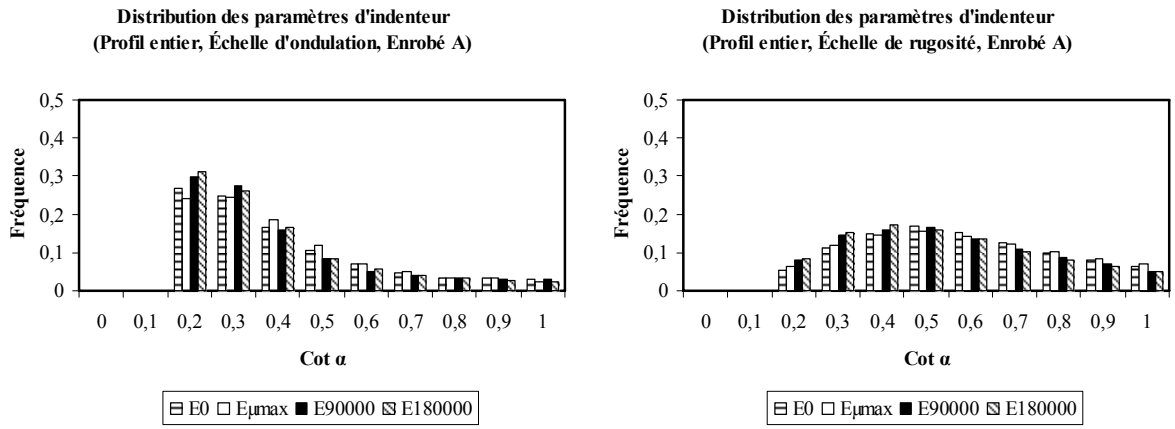

**(a) Échelle d'ondulation** **(b) Échelle de rugosité**

*Figure VIII.16 : Distributions du paramètre θ dans le cas d'un granulat A et d'un Profil seuillé*

Enrobés

Comme pour les granulats, les distributions des paramètres d'indenteur sont établies pour les enrobés. De même que pour les granulats, les distributions des paramètres d'indenteur sont données pour deux échelles et pour deux profils.

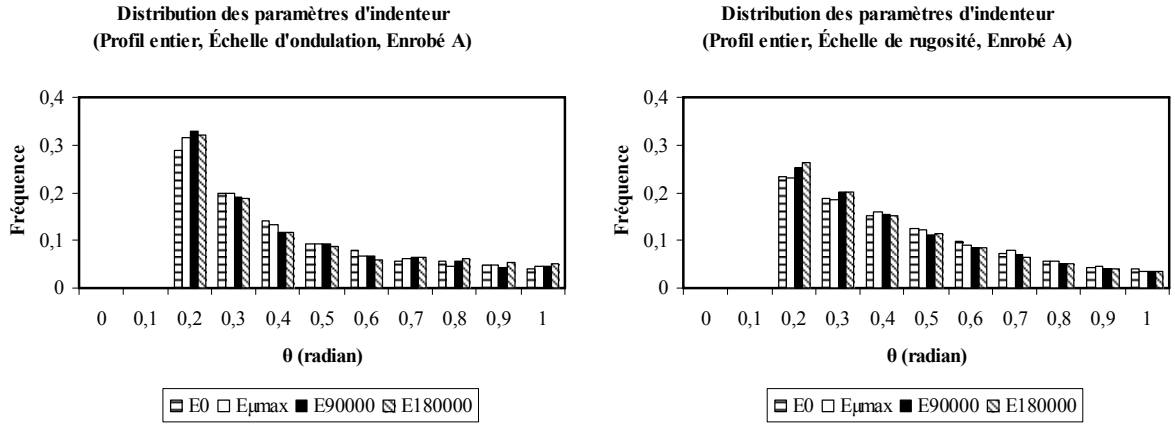
D'abord, les distributions du paramètre Cot α pour le profil entier sont montrées à la Figure VIII.17 pour l'enrobé A. A partir de cette figure, on observe à l'échelle d'ondulation une augmentation de la fréquence pour une valeur d'environ 0,2. La courbe de cette distribution est aussi une fonction exponentielle. A l'échelle de rugosité, on constate une décroissance exponentielle à partir de la valeur de 0,4. Compare à l'échelle d'ondulation, la fréquence est distribuée de manière un peu plus stable à l'échelle de rugosité.




**(a) Échelle d'ondulation** **(b) Échelle de rugosité**

*Figure VIII.17 : Distributions du paramètre Cot α dans le cas d'un enrobé A d'un Profil entier*

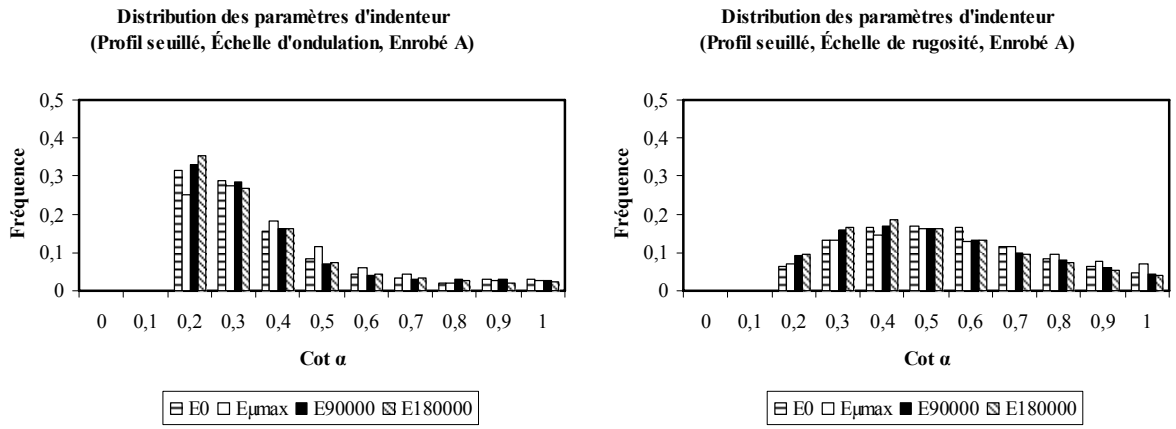
Les paramètres θ pour le profil entier sont concentrés dans l'intervalle [0,1 - 0,5] (cf. Figure VIII.18a). Les fréquences pour les valeurs supérieures à 0,5 sont inférieures à 10 %. Les distributions pour les valeurs inférieures à 0,5 varient avec le polissage. Par ailleurs, on constate que les distributions évoluent peu entre 90 000 et 180 000 cycles de polissage.




**(a) Échelle d'ondulation** **(b) Échelle de rugosité**

*Figure VIII.18 : Distributions du paramètre θ dans le cas d'un enrobé A et d'un Profil entier*

La Figure VIII.19 (Cot α) et la Figure VIII.20 (θ) montrent les distributions des paramètres pour le profil seuillé de l'enrobé A. Les distributions des paramètres d'indenteur θ et Cot α pour le profil seuillé sont plus nettes. La fréquence des faibles valeurs est plus évidente pour le profil seuillé que pour le profil entier dans tous les cas. Nous constatons aussi les évolutions évidentes de la fréquence pour les valeurs faibles avec le polissage.




**(a) Échelle d'ondulation** **(b) Échelle de rugosité**

*Figure VIII.19 : Distributions du paramètre Cot α dans le cas d'un enrobé A et d'un Profil seuillé*

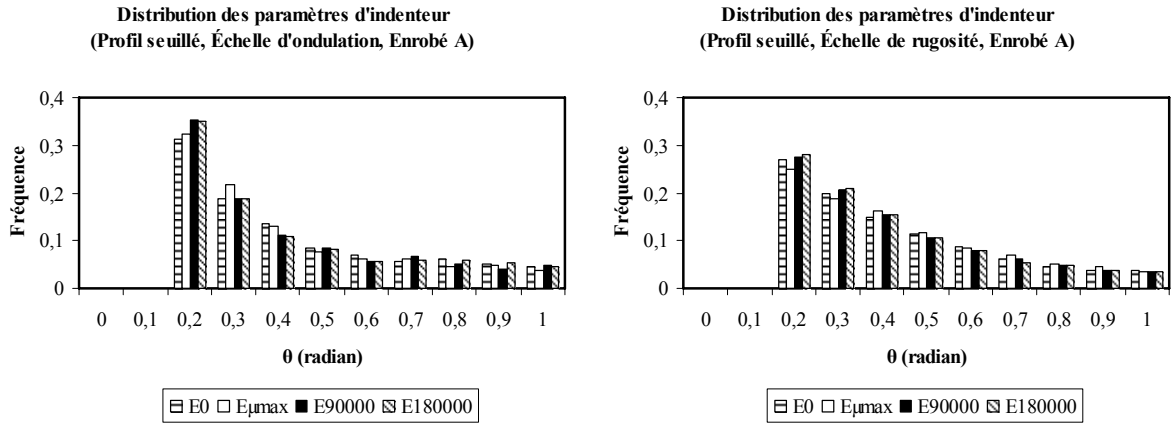



*Figure VIII.20 : Distributions du paramètre θ dans le cas d'un enrobé A et d'un Profil seuillé*

<u>Étude comparative entre granulats/enrobés</u>

Le profil seuillé à l'échelle d'ondulation est étudié dans ce paragraphe car il est plus représentatif sur l'évolution de l'adhérence. Il faut rappeler que pour l'enrobé, la distribution des paramètres à l'état initial présentée dans les figures suivantes est une distribution obtenue après avoir décapé l'enrobé.

D'après la Figure VIII.21, on constate que les courbes de la distribution du paramètre Cot α évoluent parallèlement pour le granulat et l'enrobé. Notamment, les deux courbes sont confondues pour les valeurs supérieures à 0,6. Pour la valeur 0,2, la fréquence est plus grande pour le granulat que celle observée pour l'enrobé.

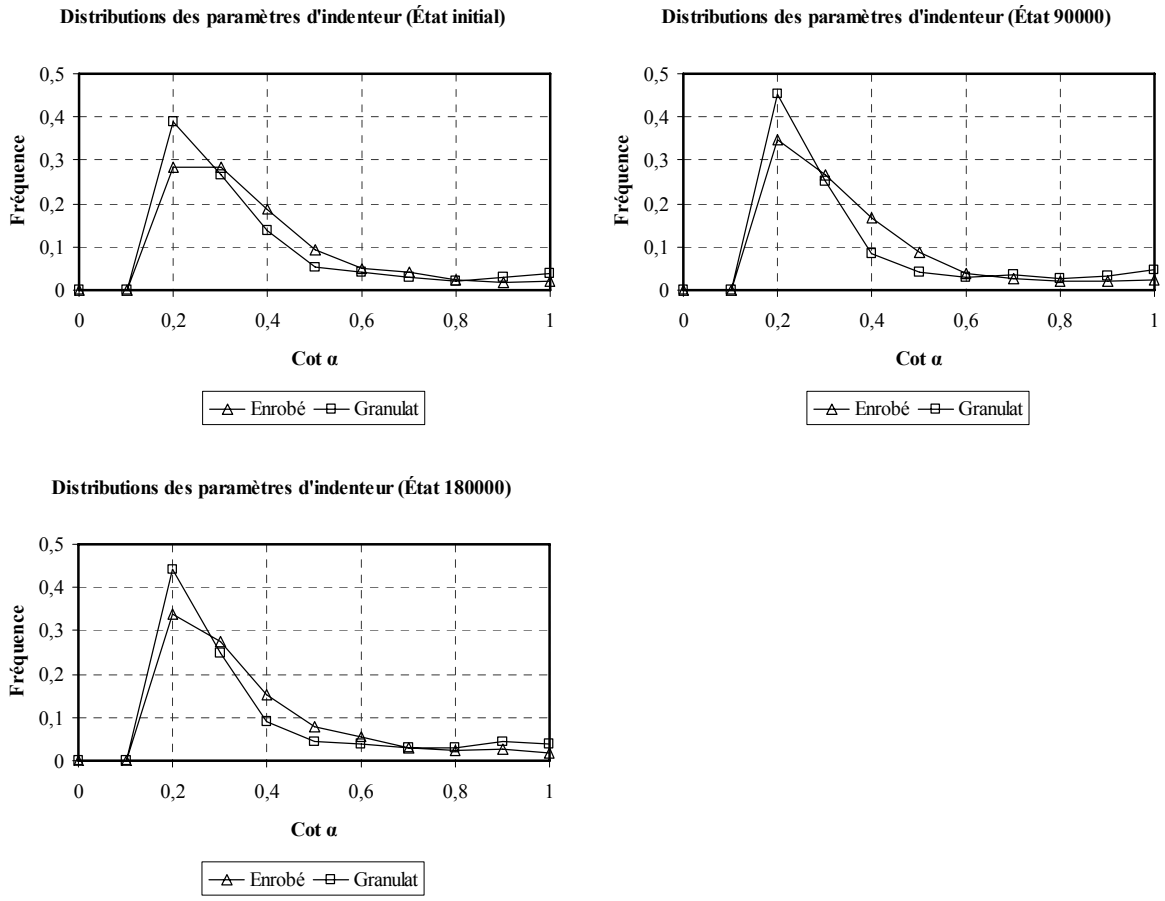



*Figure VIII.21 : Comparaisons des distributions du paramètre Cot α (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B et Enrobé B après décapage)*

La Figure VIII.22 montre les comparaisons des distributions du paramètre θ à différents stades de polissage pour le granulat et pour l'enrobé. Il est clair que les deux courbes à trois stades de polissage sont parfaitement identiques. Ainsi, les évolutions des distributions des paramètres d'indenteur sont très proches pour le granulat et l'enrobé.

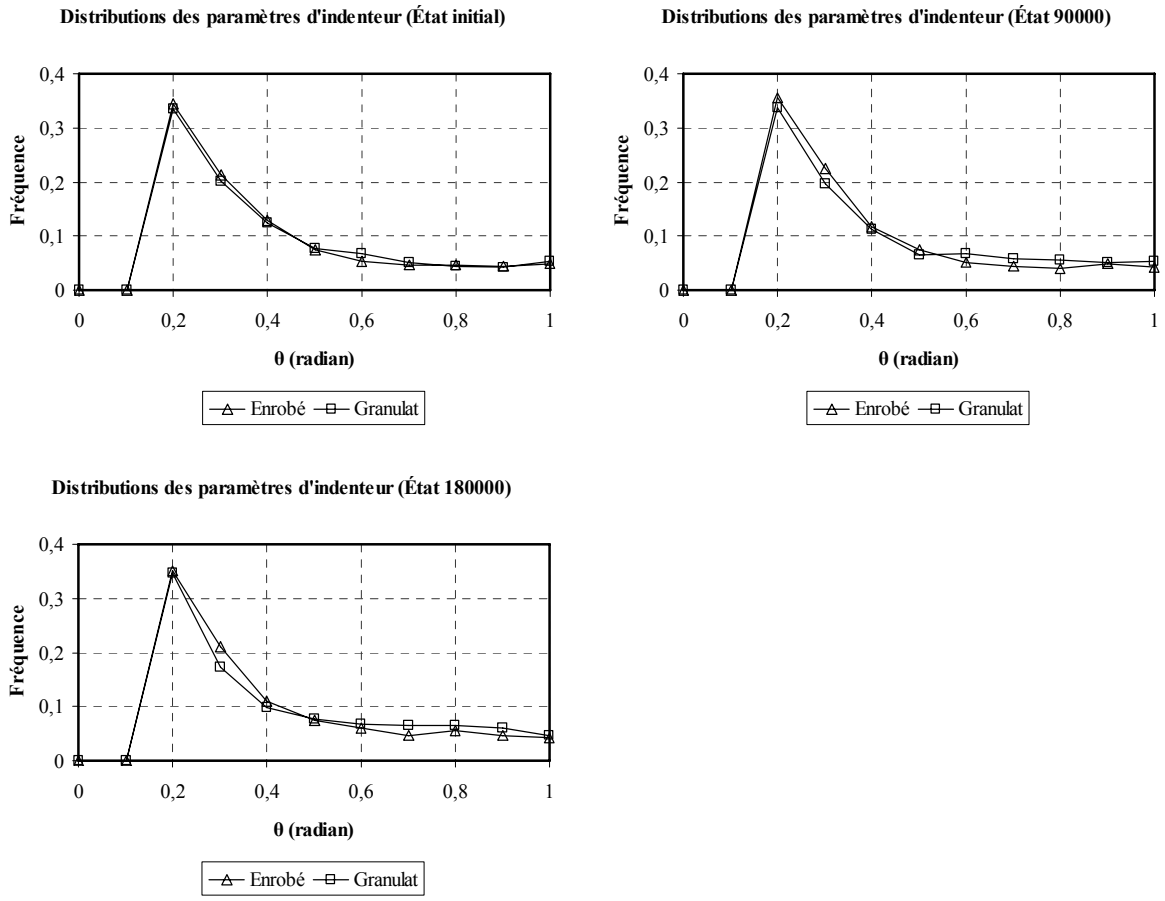



*Figure VIII.22 : Comparaisons des distributions du paramètre θ (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B et Enrobé B après décapage)*

Dans la Figure VIII.23, les distributions du paramètre Cot α évoluent beaucoup avant 90 000 rotations de polissage pour le granulat et pour l'enrobé. Cette évolution est principalement effectuée pour la valeur 0,2. Les distributions n'évoluent pas après 90 000 rotations de polissage car les deux courbes de 90 000 et 180 000 rotations sont confondues.

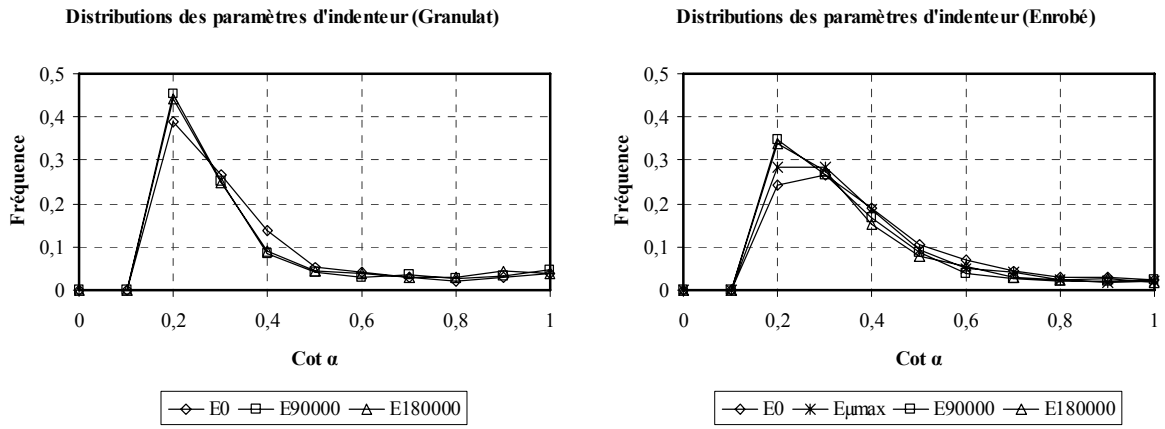



*Figure VIII.23 : Évolutions des distributions du paramètre Cot α à différents stades polissage (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B et Enrobé B après décapage)*

Les courbes de distribution du paramètre θ (cf. Figure VIII.24) sont parfaitement confondues pour le granulat et pour l'enrobé, et ce à tous les stades de polissage. L'effet du polissage n'influence pas la distribution du paramètre θ qui représente le relief de la microtexture. En revanche, la distribution du paramètre Cot α varie avec le nombre de rotations au début du polissage.

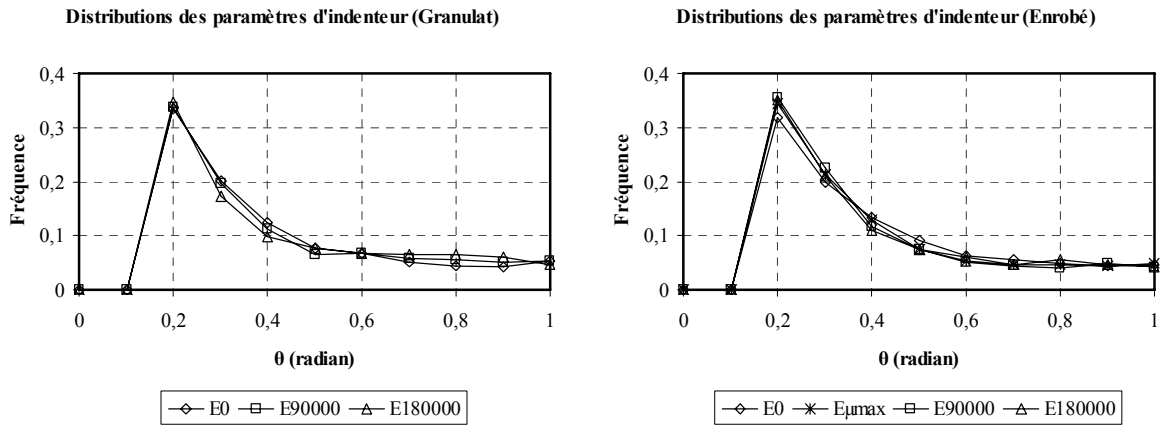



*Figure VIII.24 : Évolutions des distributions du paramètre θ à différents stades polissage (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B et Enrobé B après décapage)*

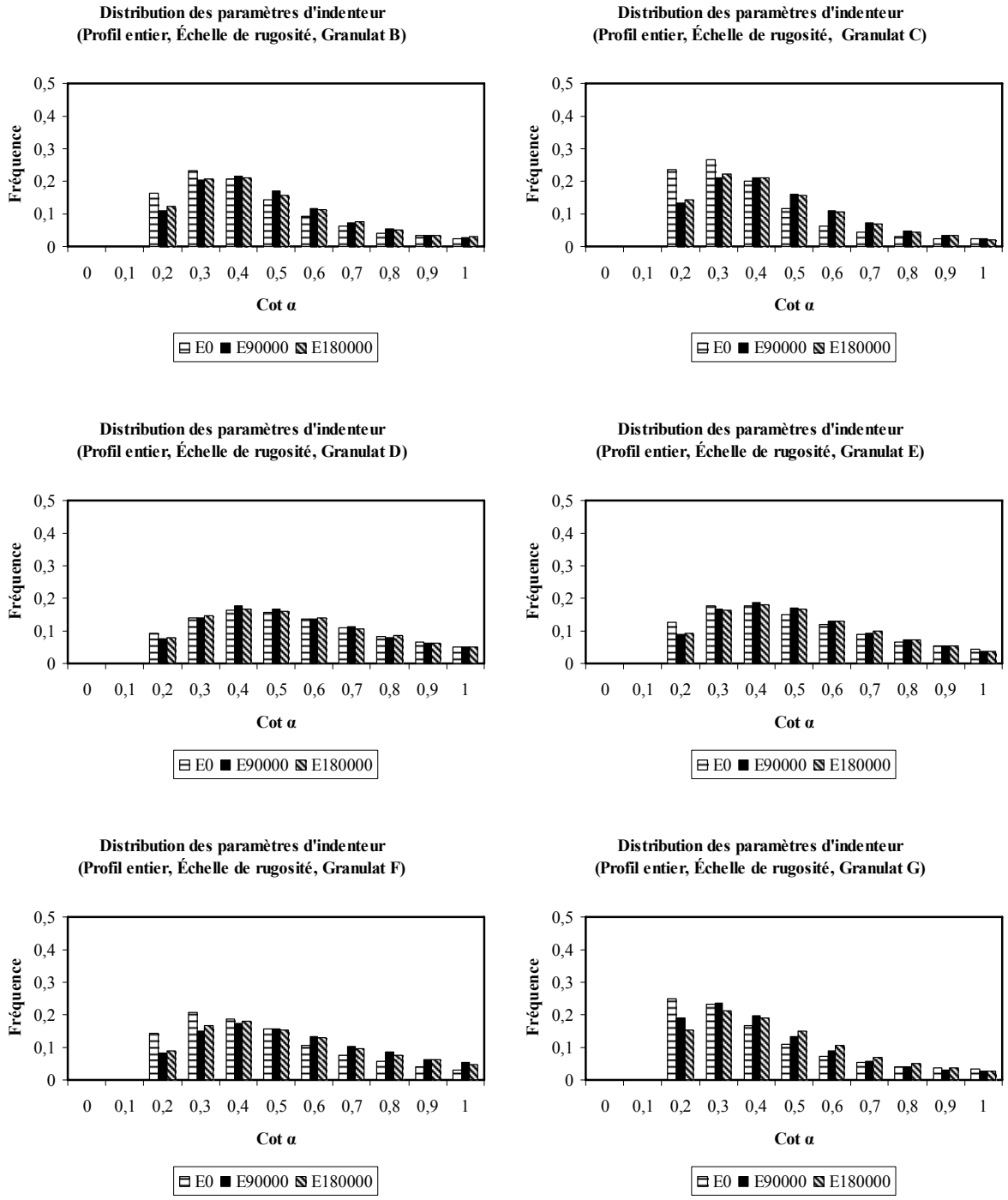



*Figure VIII.25 : Distribution du paramètre « cot α » (Profil entier, Échelle de rugosité, Granulat B - G)*

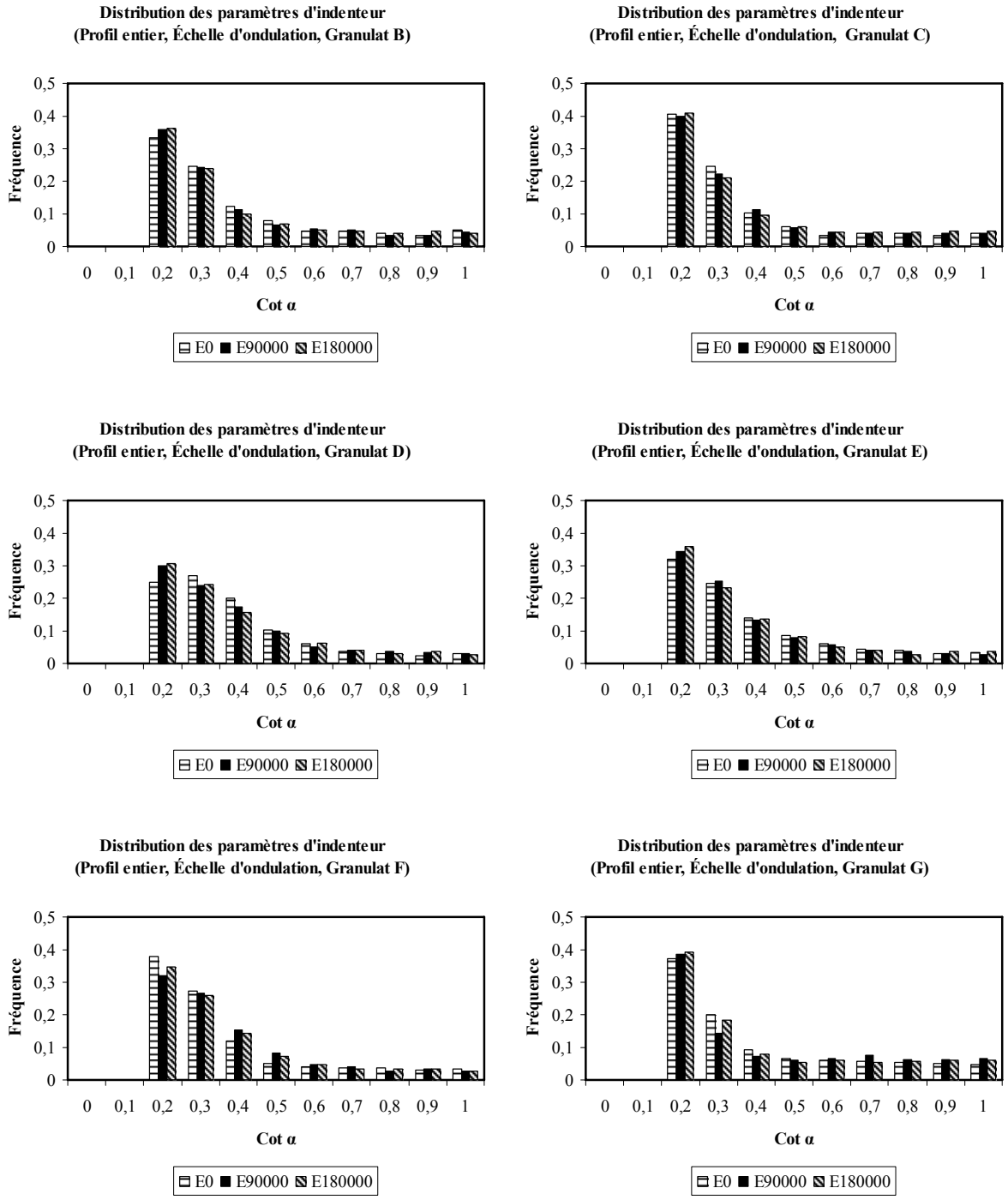



*Figure VIII.26 : Distribution du paramètre « cot α » (Profil entier, Échelle d'ondulation, Granulat B - G)*

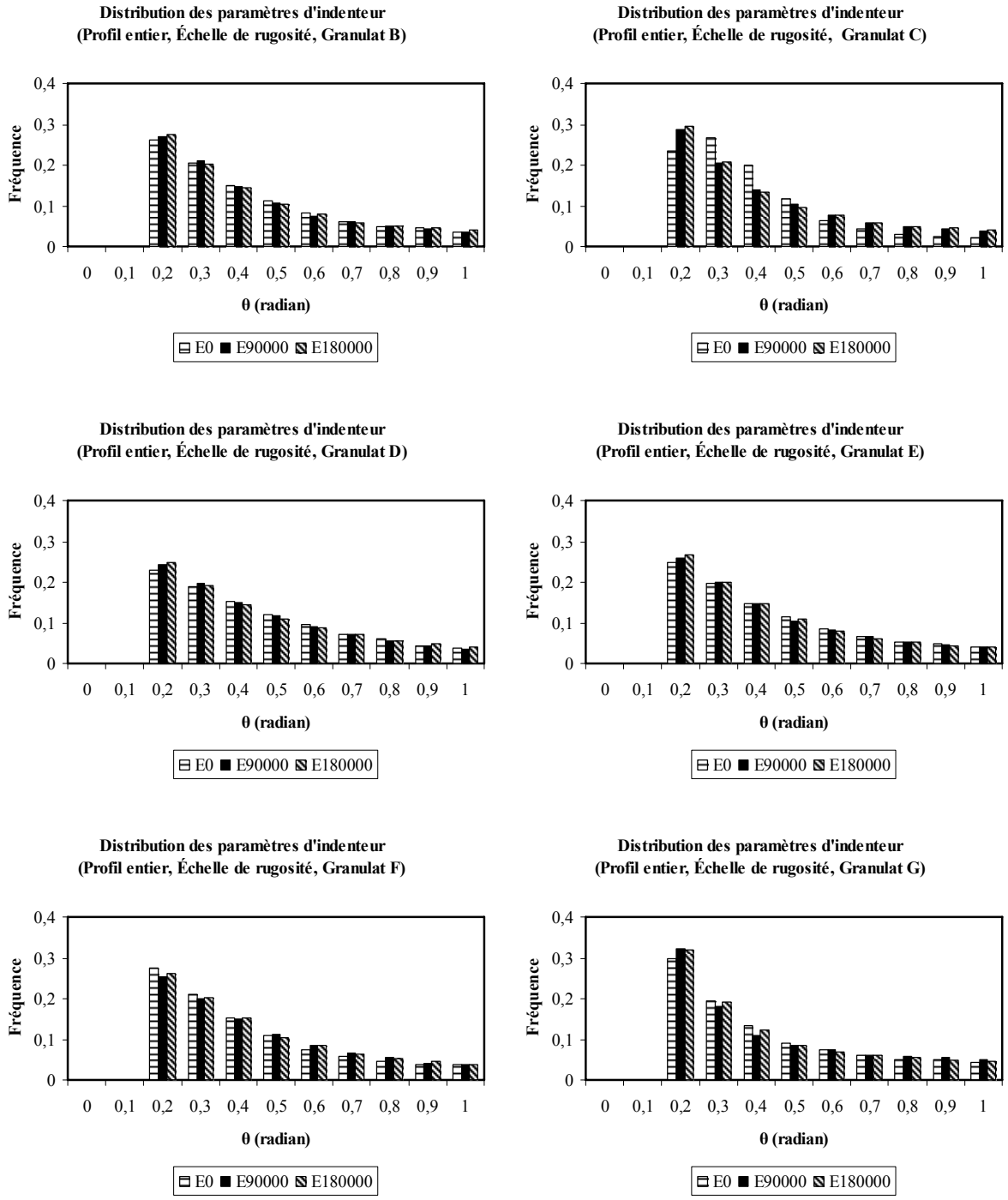



*Figure VIII.27 : Distribution du paramètre « θ » (Profil entier, Échelle de rugosité, Granulat B - G)*

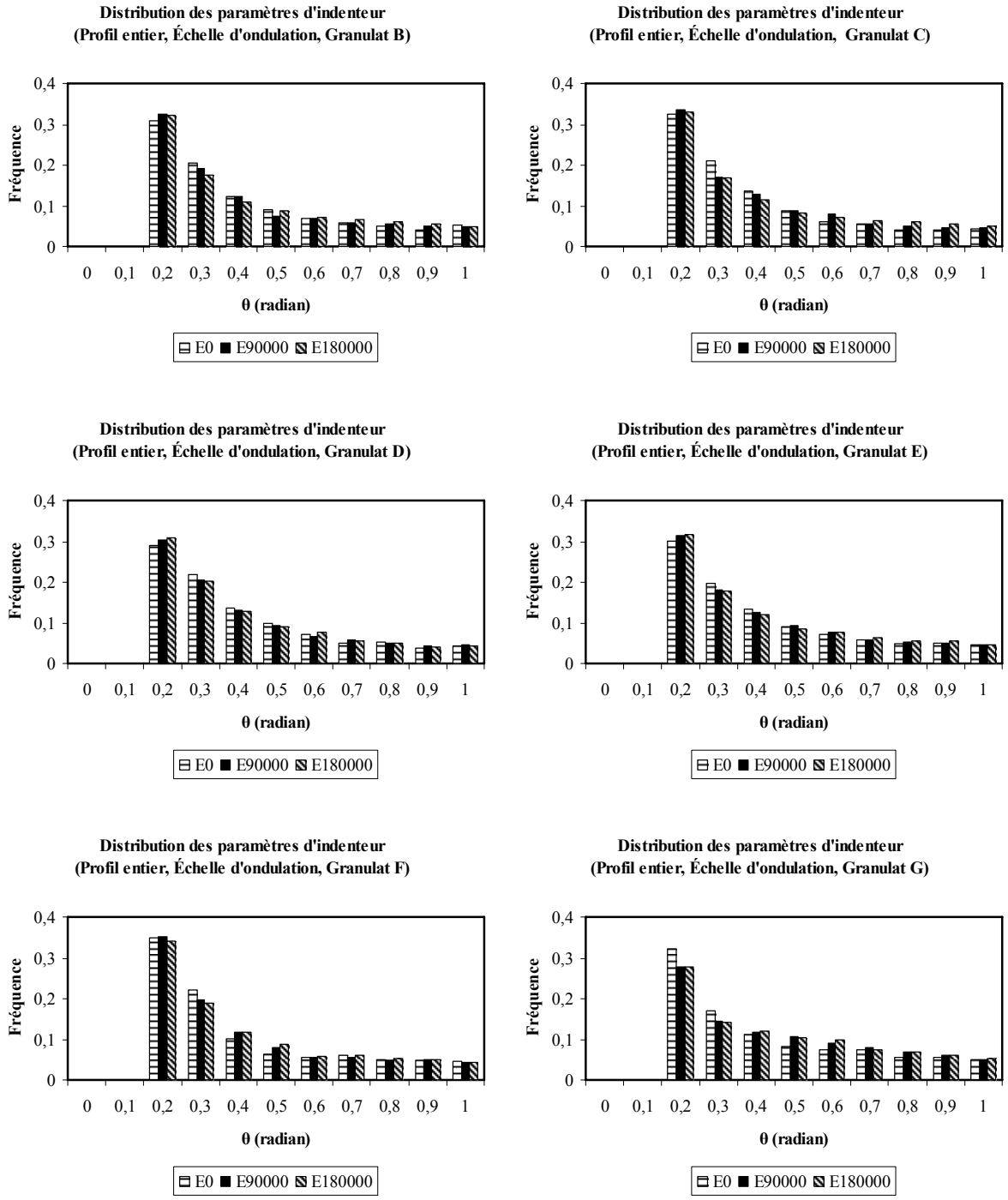



*Figure VIII.28 : Distribution du paramètre « θ » (Profil entier, Échelle d'ondulation, Granulat B - G)*

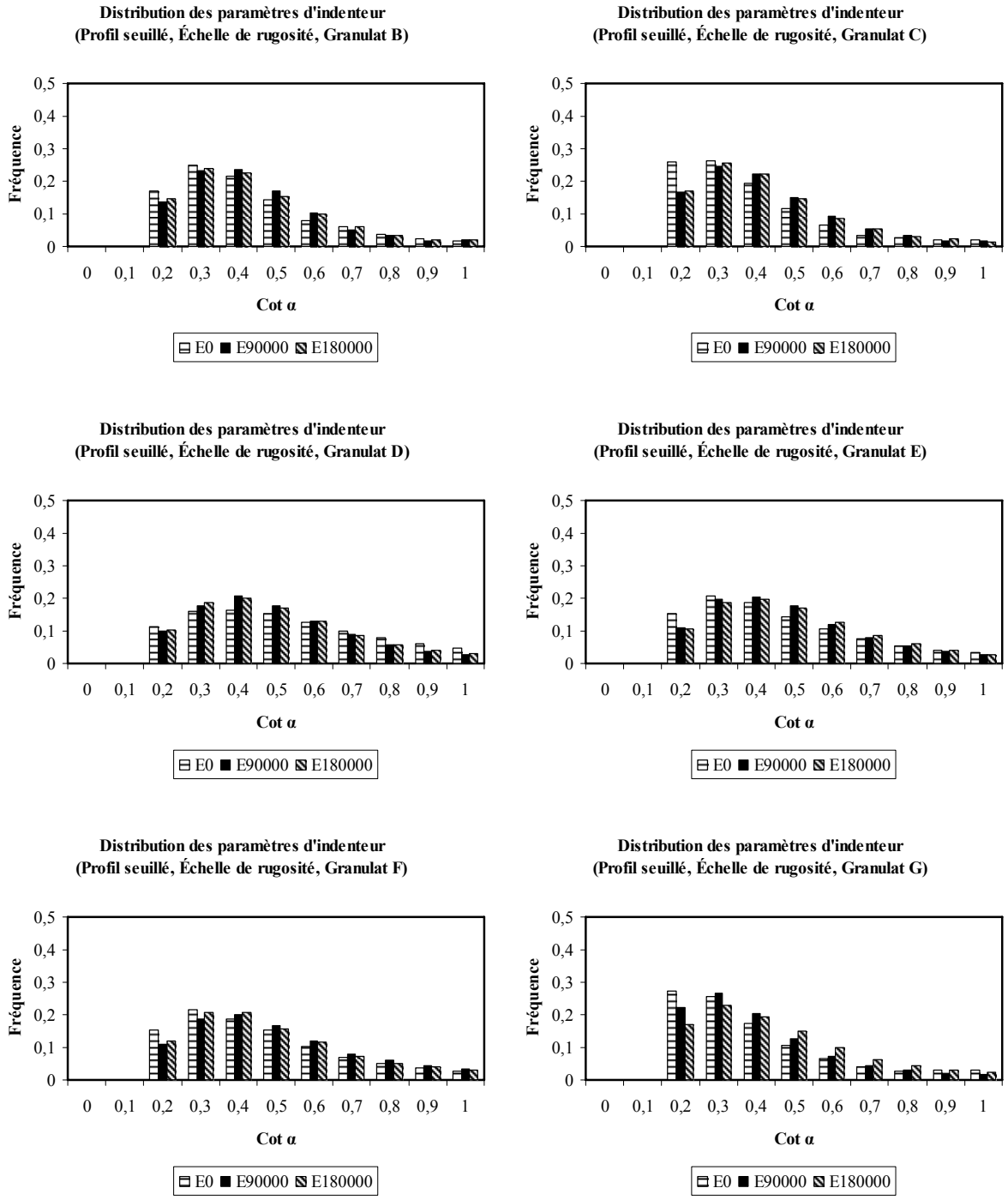



*Figure VIII.29 : Distribution du paramètre « cot α » (Profil seuillé, Échelle de rugosité, Granulat B - G)*

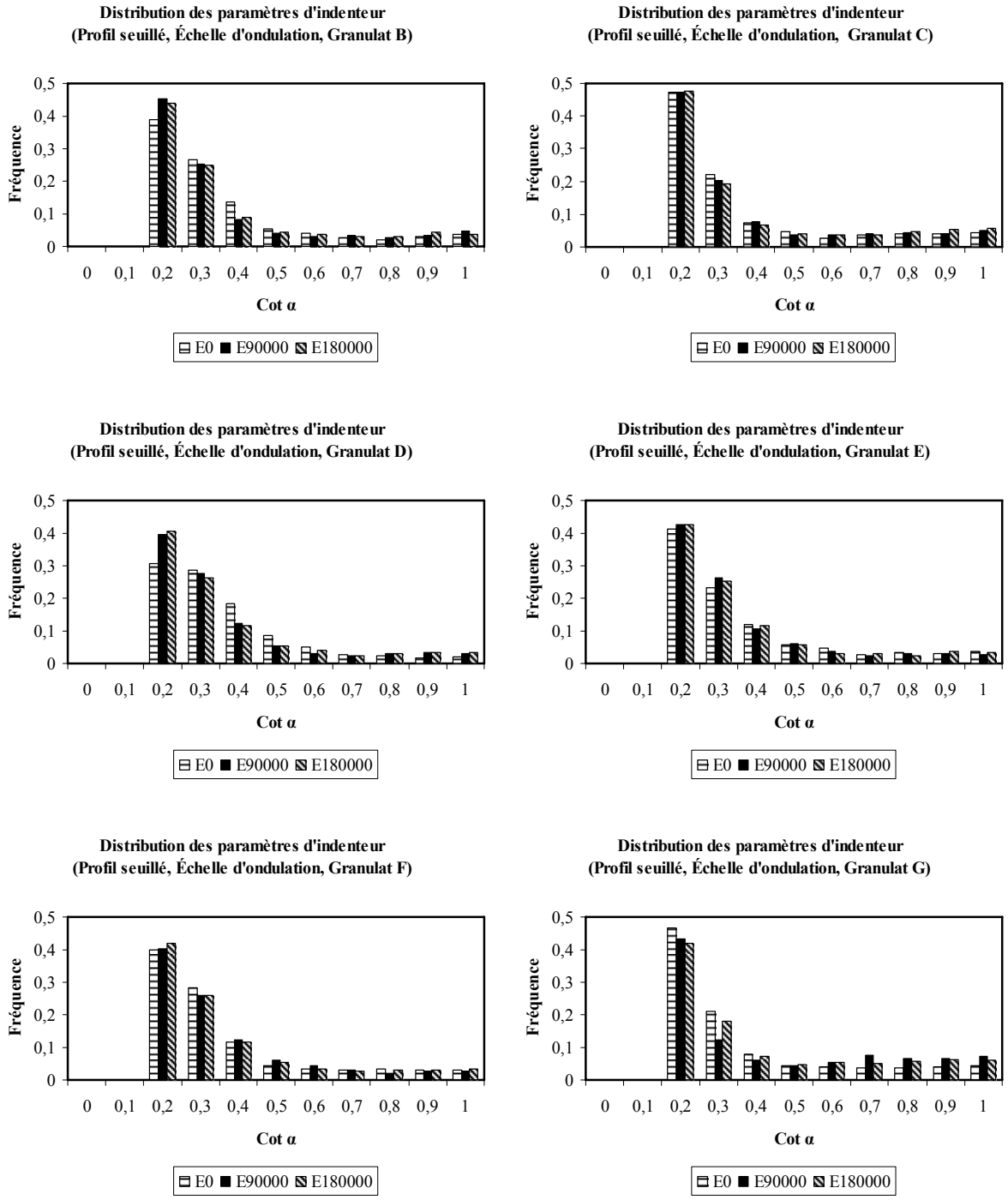



*Figure VIII.30 : Distribution du paramètre « cot α » (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B - G)*

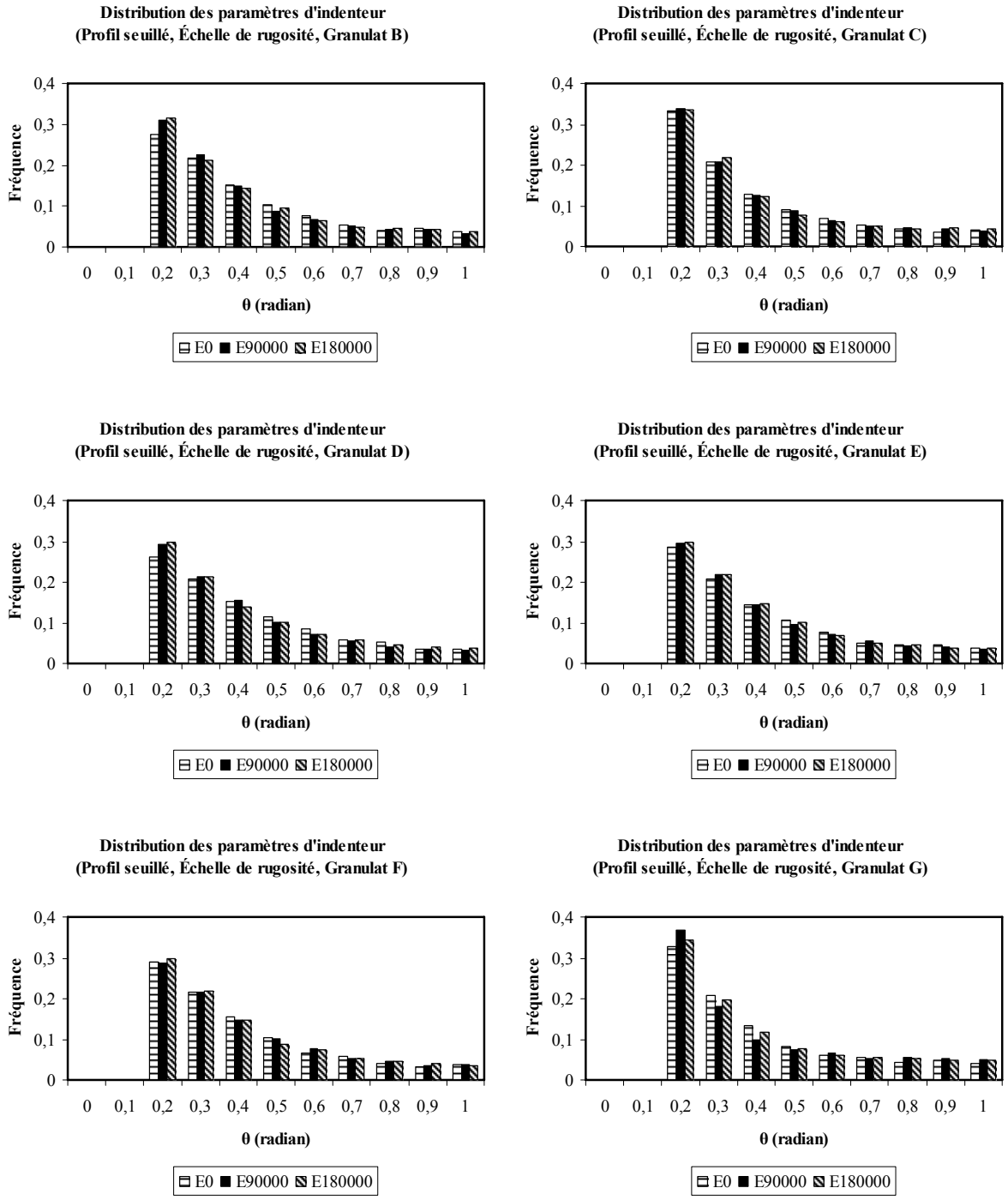



*Figure VIII.31 : Distribution du paramètre « θ » (Profil seuillé, Échelle de rugosité, Granulat B - G)*

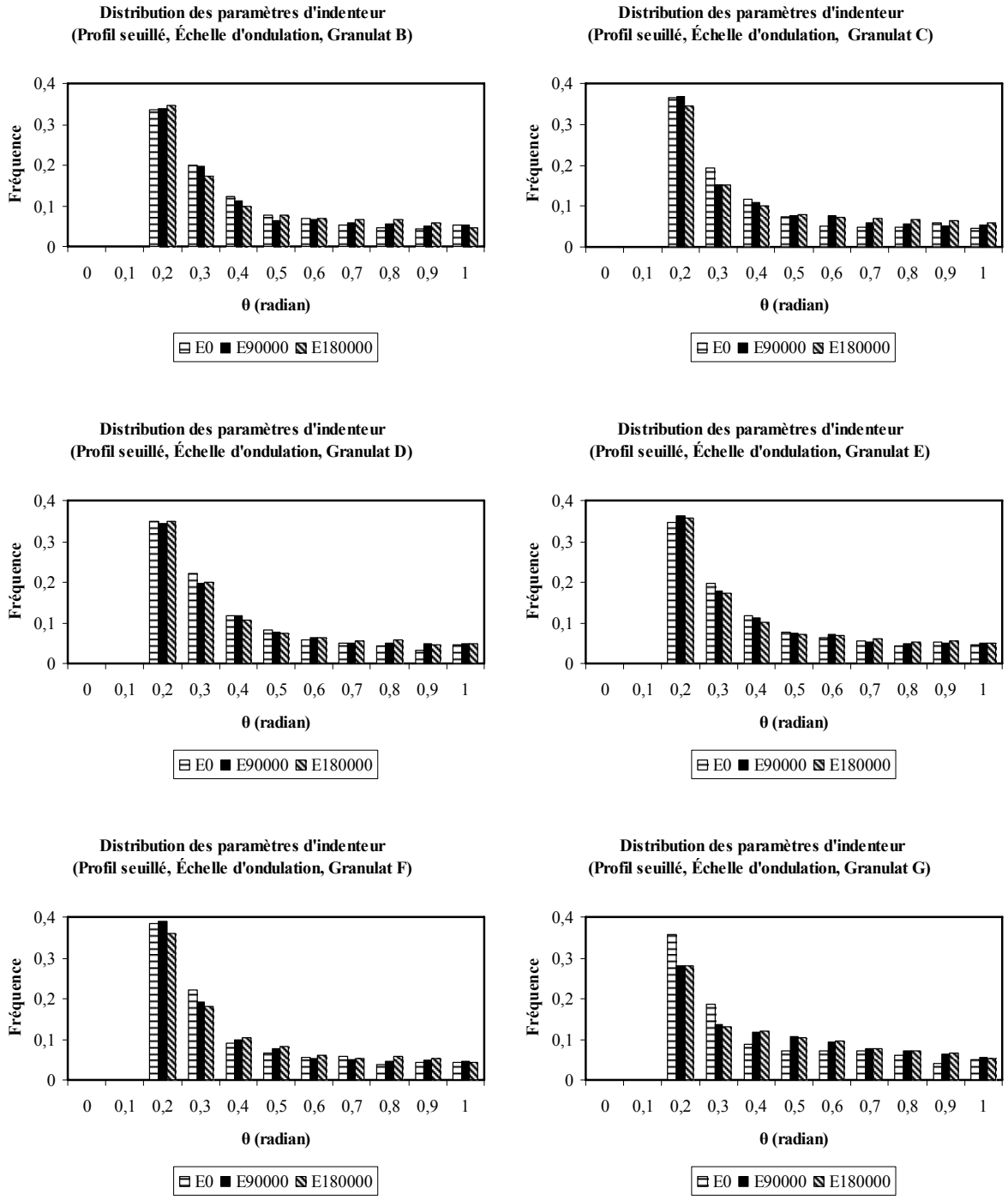
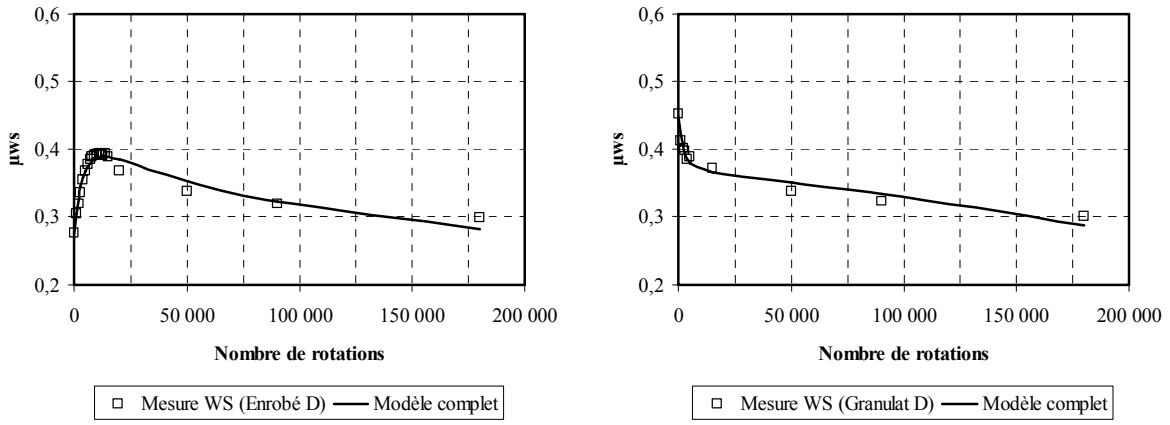



*Figure VIII.32 : Distribution du paramètre « θ » (Profil seuillé, Échelle d'ondulation, Granulat B - G)*

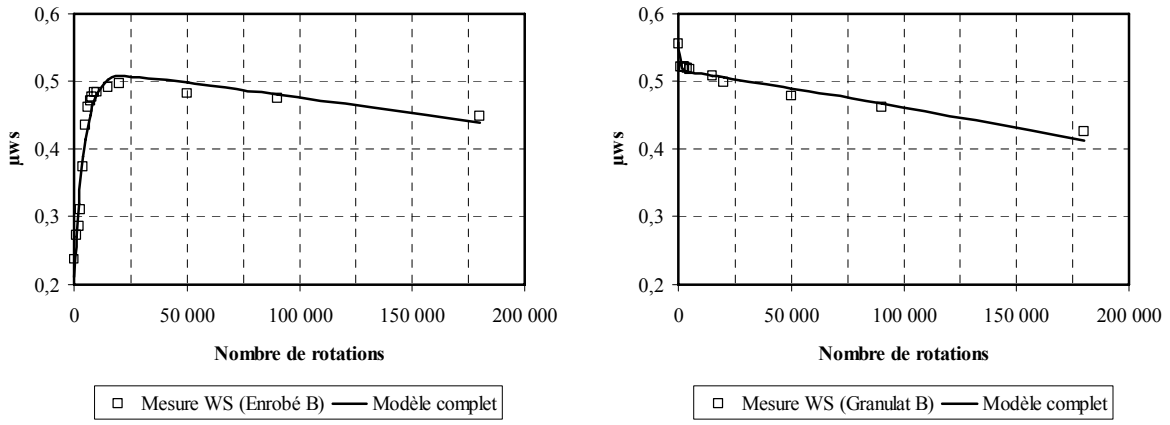
# Annexe F – Modèle d'ajustement à 5 paramètres

1) Enrobés prélevés *in situ* (sites de Clisson et Coëx) et granulats




**(a) Cas d'un BBTM 0/10, site de Clisson** **(b) Cas du granulat D, PSV=51**

*Figure VIII.33 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »*




**(a) Cas d'un BBTM 0/6, site de Coëx** **(b) Cas du granulat B, PSV=55**

*Figure VIII.34 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »*

## 2) Enrobés prélevés *in situ* (site de Saint-Fulgent)

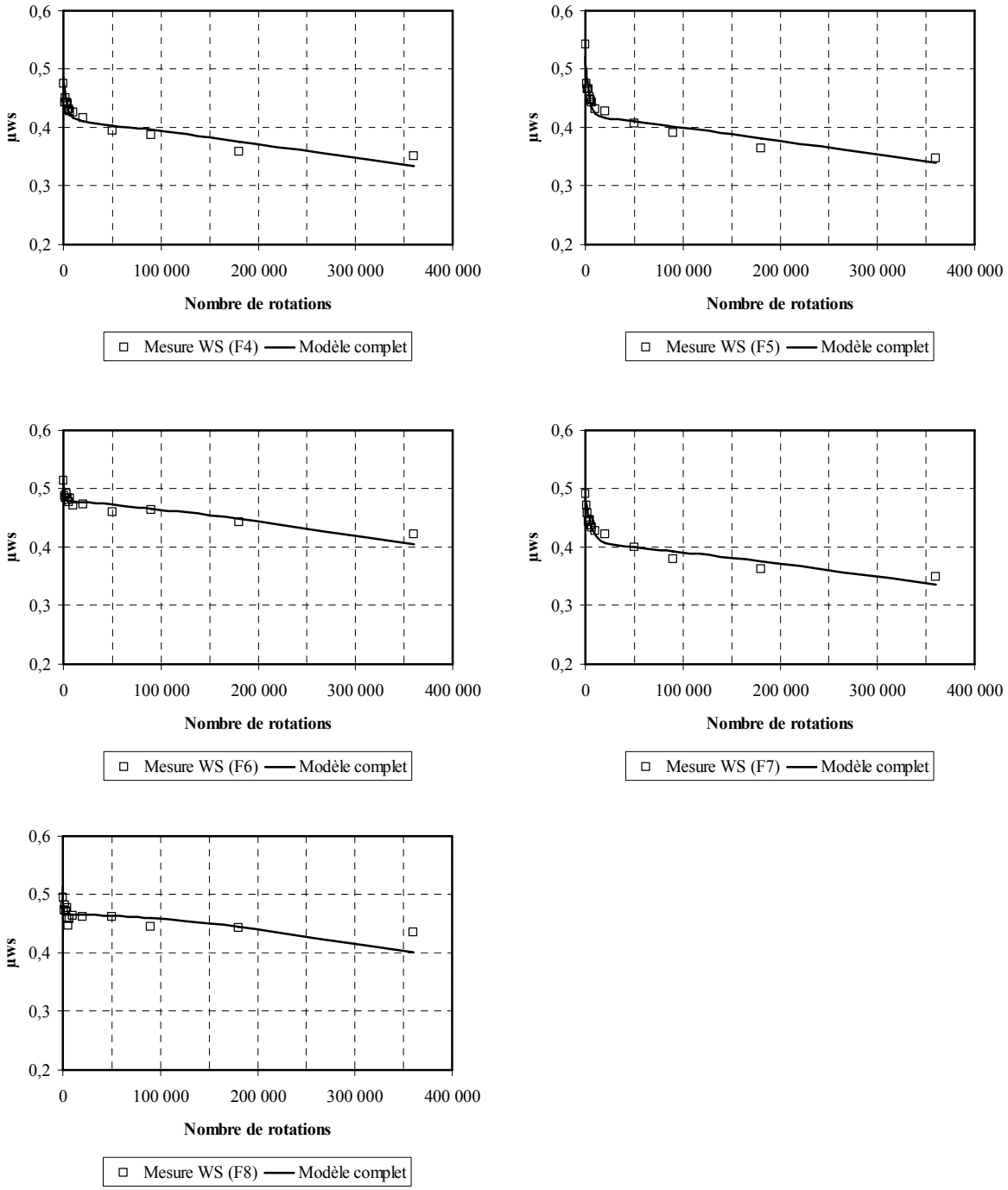
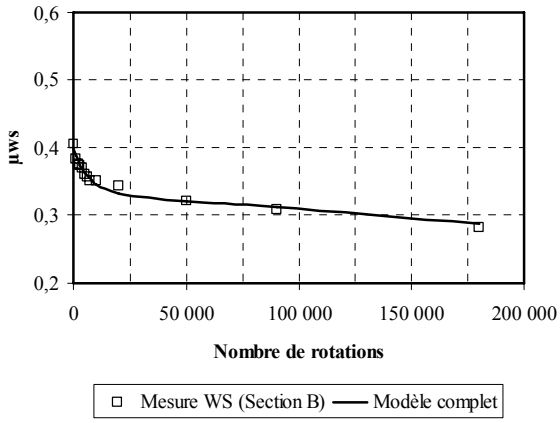
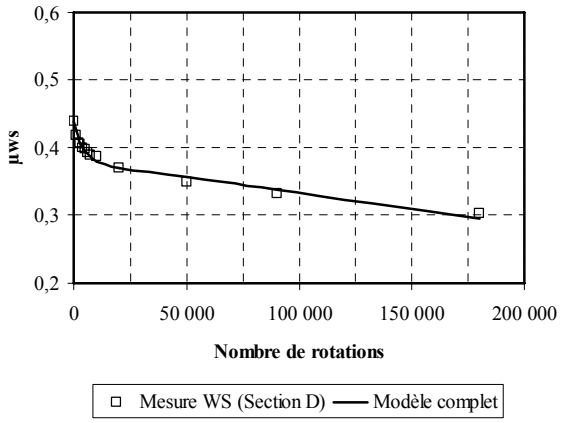



*Figure VIII.35 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC » (cas du BBTM0/10, site de Saint-Fulgent, PSV=51, 61)*

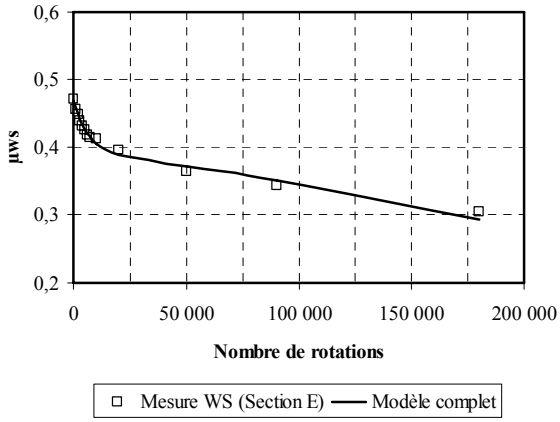
## 3) Enrobés prélevés *in situ* (site de Fontenay)



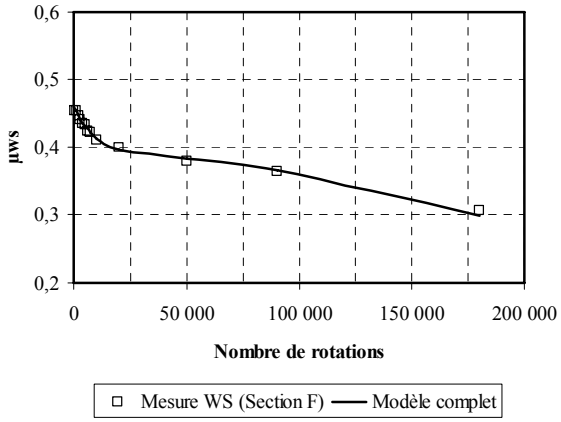

**BBDr 0/10**



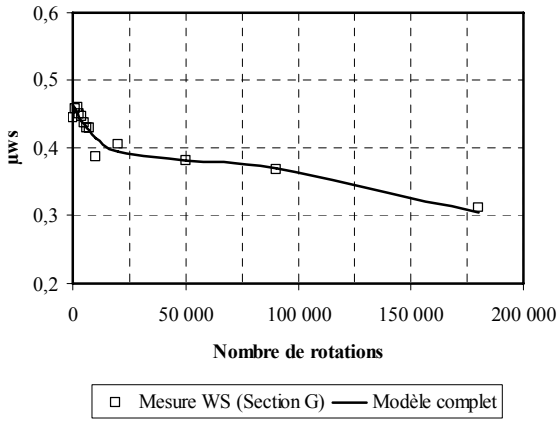

**BBTM 0/10 type2**




**BBTM 0/10 type1**



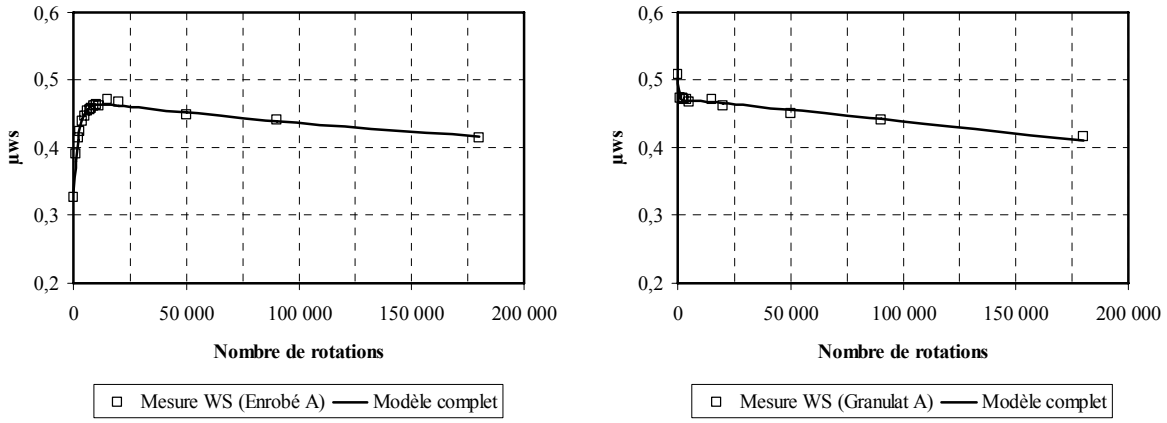

**BBTM 0/10 continu**




**BBSG 0/10**

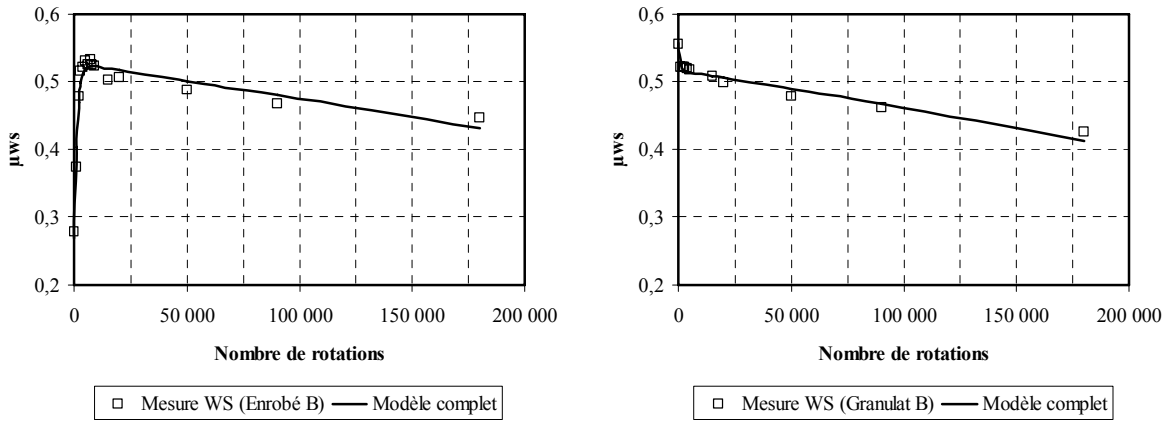
*Figure VIII.36 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC » (site de Fontenay, PSV=50)*

## 4) Enrobés fabriqués en laboratoire et granulats



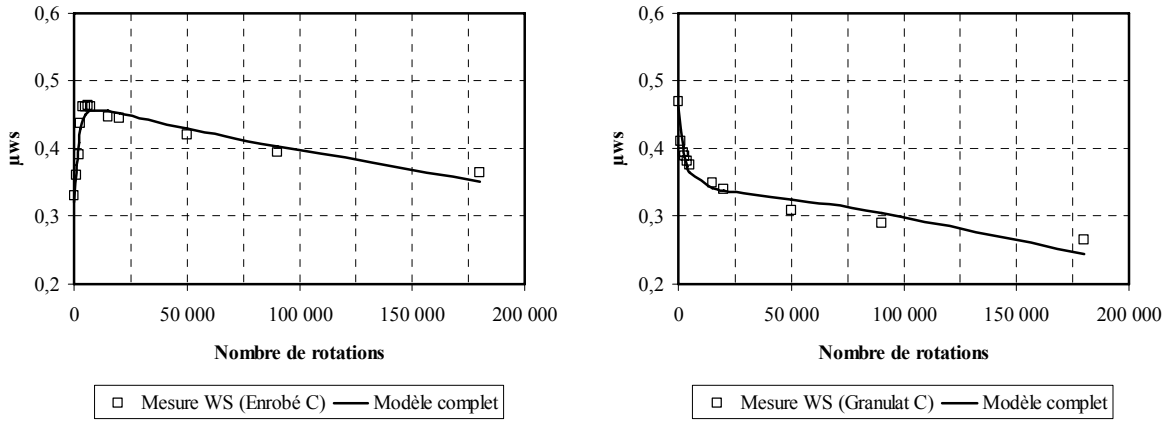

**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat A, PSV=56**

*Figure VIII.37 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »*



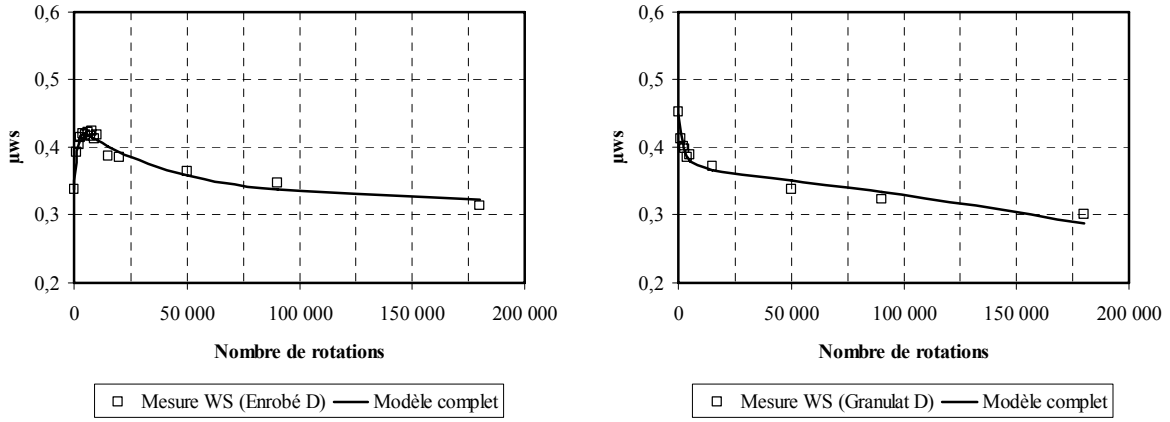

**(a) Cas d'un BBTM 0/6, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat B, PSV=55**

*Figure VIII.38 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »*



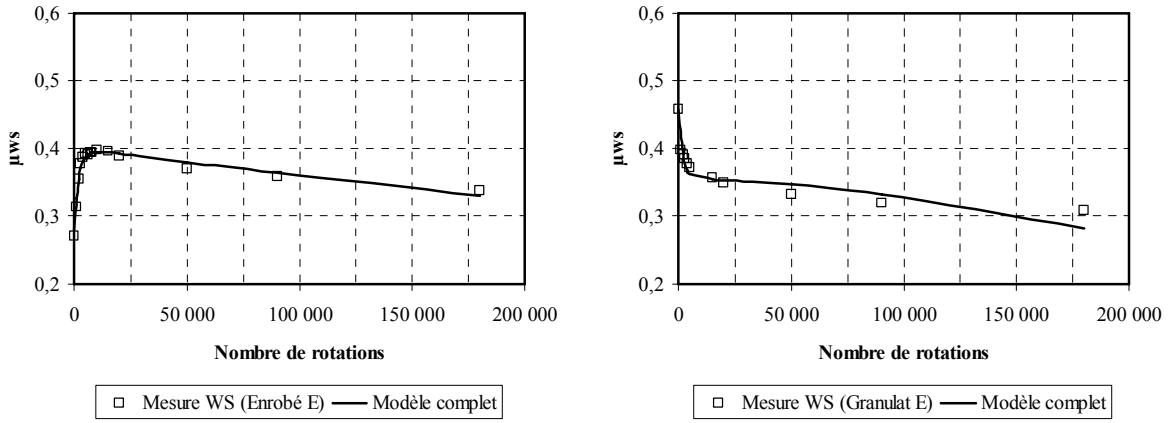

**(a) Cas d'un BBSG 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat C, PSV=53**

*Figure VIII.39 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »*



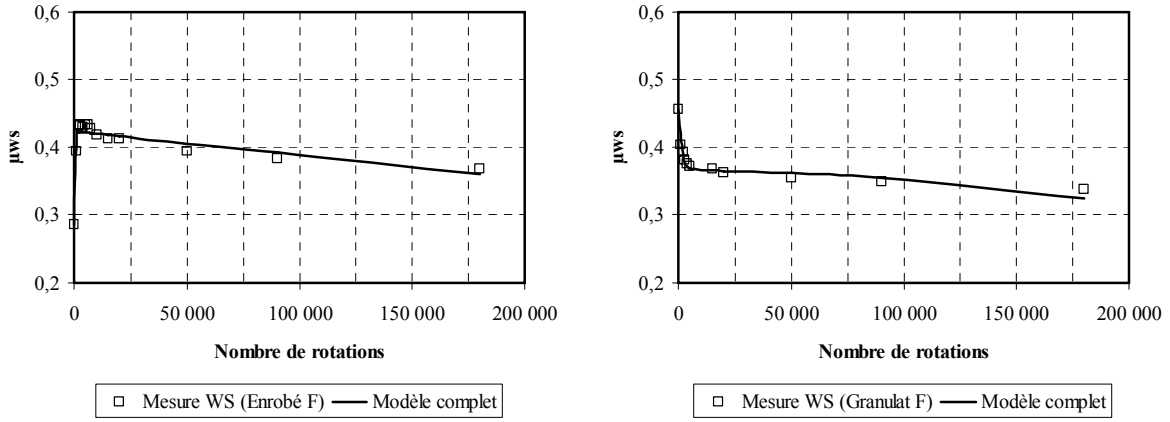

**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat D, PSV=51**

*Figure VIII.40 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »*



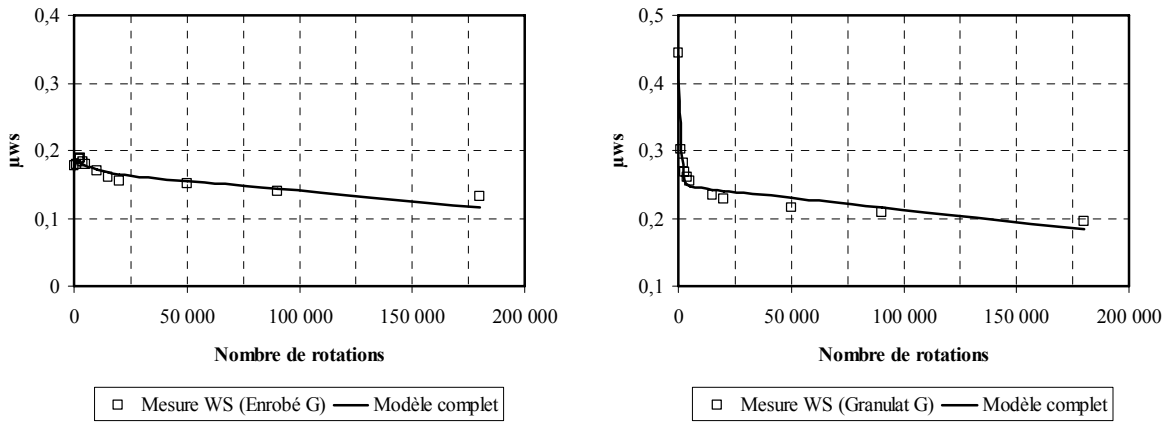

**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat E, PSV=50**

*Figure VIII.41 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »*




**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat F, PSV=49**

*Figure VIII.42 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »*




**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat G, PSV=41**

*Figure VIII.43 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle complet « LCPC »*

## 5) Coefficients de la formule du modèle complet

| Coefficient \ Site | Angers | Clisson | Coëx |
|---|---|---|---|
| $a_1$ | 7,90E-02 | 1,37E-01 | 3,12E-01 |
| $a_2$ | 3,57E-05 | 1,02E-05 | 1,05E-06 |
| $a_3$ | 4,63E-04 | 2,60E-04 | 2,15E-04 |
| $a_4$ | 4,51E-07 | 8,83E-08 | 1,64E-07 |
| $a_5$ | 3,42E-01 | 2,76E-01 | 2,11E-01 |

*Tableau VIII.9 : Coefficients de la formule du modèle complet, sites d'Angers, Clisson et Coëx*

| Coefficient \ Section | A | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $a_1$ | 1,34E-01 | 2,58E-01 | 1,46E-01 | 9,63E-02 | 1,20E-01 | 1,39E-01 | 1,99E-02 |
| $a_2$ | 2,43E-06 | 1,04E-07 | 3,59E-06 | 2,62E-05 | 1,54E-06 | 2,64E-07 | 1,66E-04 |
| $a_3$ | 4,27E-04 | 7,40E-04 | 4,86E-04 | 7,68E-04 | 4,91E-04 | 6,20E-01 | 8,39E-01 |
| $a_4$ | 2,19E-08 | 5,05E-07 | 2,52E-07 | 8,83E-08 | 2,19E-07 | 3,10E-07 | 3,00E-07 |
| $a_5$ | 3,34E-01 | 2,70E-01 | 3,21E-01 | 3,38E-01 | 2,80E-01 | 2,85E-01 | 1,71E-01 |

*Tableau VIII.10 : Coefficients de la formule du modèle complet, enrobés fabriqués en laboratoire de A à G*

| Coefficient \ Section | F4 | F5 | F6 | F7 | F8 |
|---|---|---|---|---|---|
| $a_1$ | 1,37E-01 | 1,00E-01 | 4,29E-02 | 7,49E-02 | 4,98E-02 |
| $a_2$ | 1,02E-05 | 2,80E-04 | 1,07E-03 | 1,54E-04 | 1,87E-02 |
| $a_3$ | 2,60E-04 | 8,57E-07 | 4,61E-06 | 1,79E-06 | 5,79E-06 |
| $a_4$ | 8,83E-08 | 2,98E-07 | 2,98E-07 | 2,98E-07 | 2,98E-07 |
| $a_5$ | 2,76E-01 | 5,21E-01 | 5,21E-01 | 4,83E-01 | 5,14E-01 |

*Tableau VIII.11 : Coefficients de la formule du modèle complet, site de Saint-Fulgent*

| Coefficient \ Section | B | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|
| $a_1$ | 6,29E-02 | 6,31E-02 | 8,04E-02 | 1,01E-01 | 1,60E-01 |
| $a_2$ | 1,50E-04 | 2,32E-04 | 1,47E-04 | 8,29E-05 | 6,45E-05 |
| $a_3$ | 4,92E-07 | 3,38E-06 | 8,04E-06 | 2,09E-05 | 2,57E-05 |
| $a_4$ | 2,85E-07 | 6,12E-07 | 8,77E-07 | 8,77E-07 | 8,77E-07 |
| $a_5$ | 3,97E-01 | 4,40E-01 | 4,70E-01 | 4,60E-01 | 4,64E-01 |

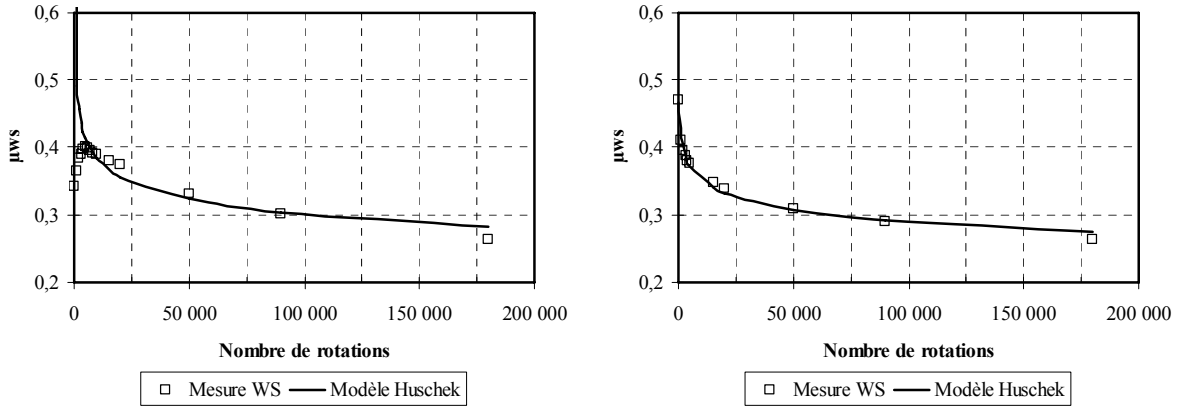
*Tableau VIII.12 : Coefficients de la formule du modèle complet, site de Fontenay*

| Coefficient \ Section | A | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $a_1$ | 3,32E-02 | 3,98E-02 | 1,16E-01 | 7,75E-02 | 1,03E-01 | 9,13E-02 | 1,93E-01 |
| $a_2$ | 2,55E-03 | 1,41E-03 | 3,42E-04 | 3,93E-04 | 5,21E-04 | 6,68E-04 | 1,04E-03 |
| $a_3$ | 6,95E-06 | 4,50E-06 | 5,83E-06 | 4,66E-06 | 8,40E-06 | 7,06E-06 | 7,34E-07 |
| $a_4$ | 4,65E-07 | 6,94E-07 | 9,84E-07 | 7,08E-07 | 8,52E-07 | 5,85E-07 | 4,85E-07 |
| $a_5$ | 5,03E-01 | 5,56E-01 | 4,62E-01 | 4,48E-01 | 4,58E-01 | 4,56E-01 | 4,41E-01 |

*Tableau VIII.13 : Coefficients de la formule du modèle complet, granulats de A à G*

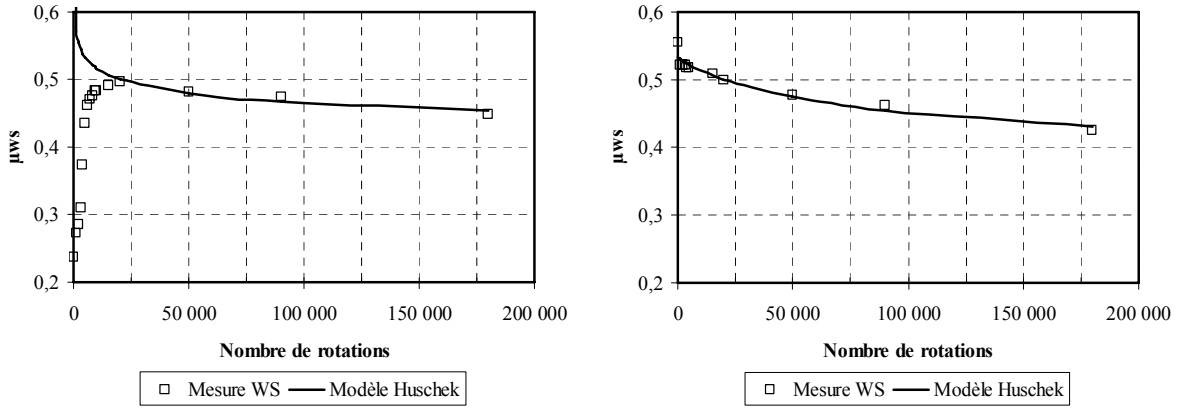
# Annexe G – Modèle de Huschek

1) Enrobés prélevés *in situ* (sites d'Angers et Coëx) et granulats




**(a) Cas d'un BBSG 0/10, site de Angers** **(b) Cas du granulat D, PSV=53**

*Figure VIII.44 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek*




**(a) Cas d'un BBTM 0/6, site de Coëx** **(b) Cas du granulat B, PSV=55**

*Figure VIII.45 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek*

## 2) Enrobés prélevés *in situ* (site de Saint-Fulgent)

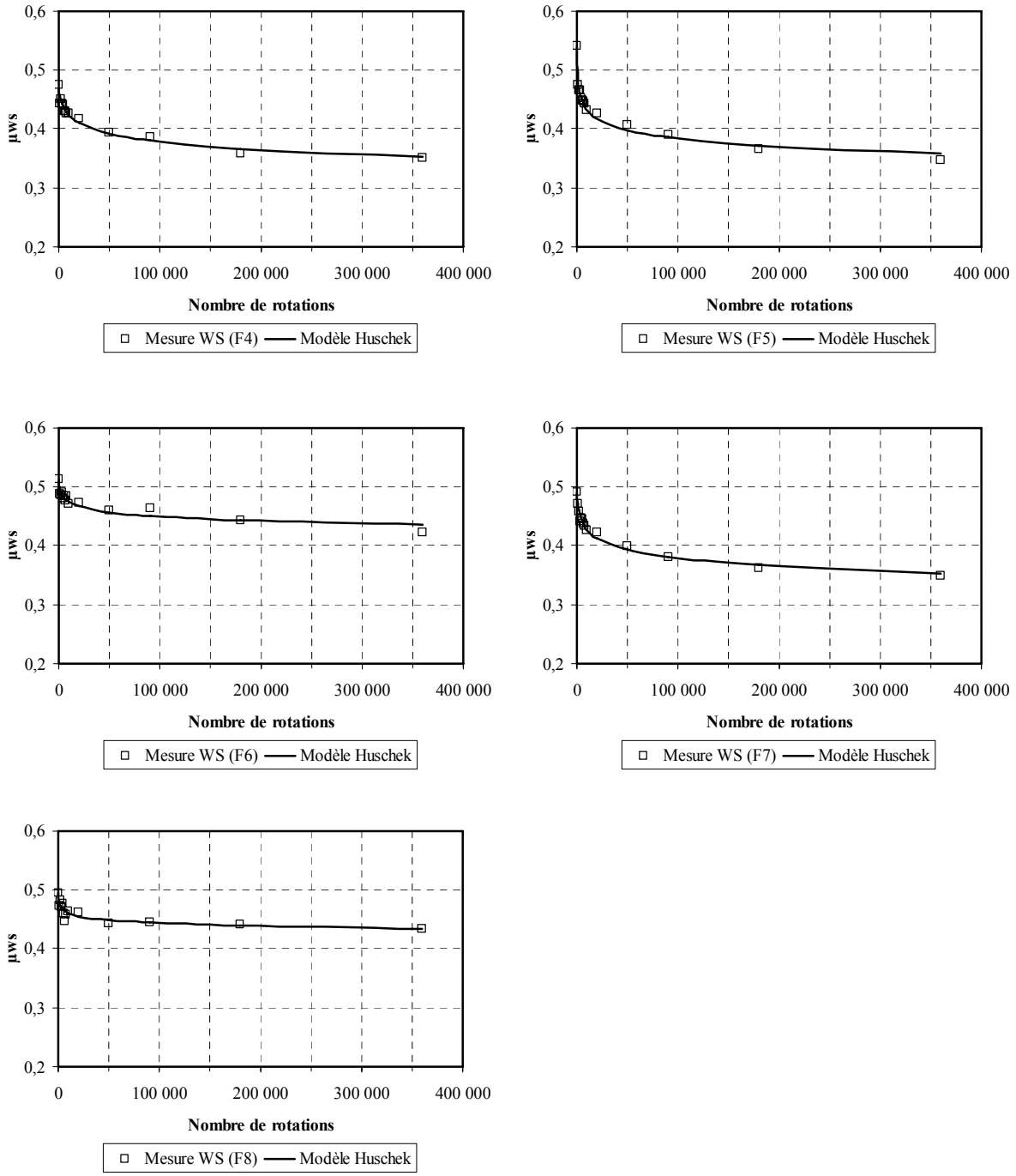
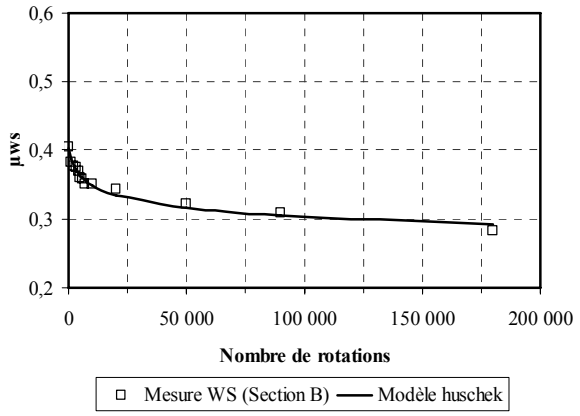
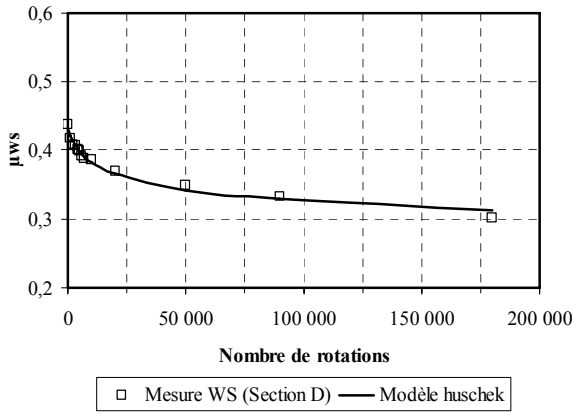



*Figure VIII.46 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek (cas du BBTM0/10, site de Saint-Fulgent, PSV=51, 61)*

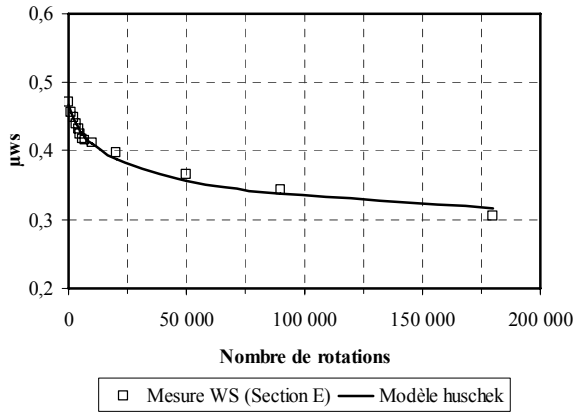
## 3) Enrobés prélevés *in situ* (site de Fontenay)



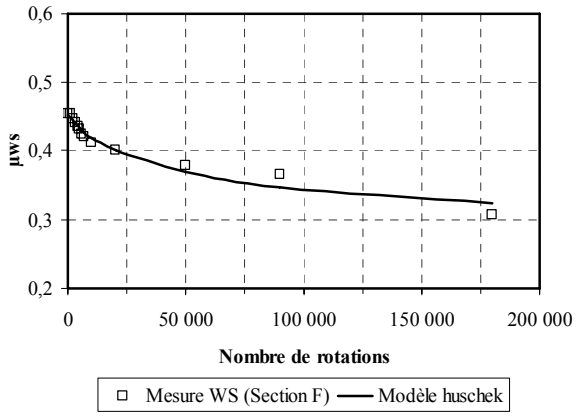

**BBDr 0/10**



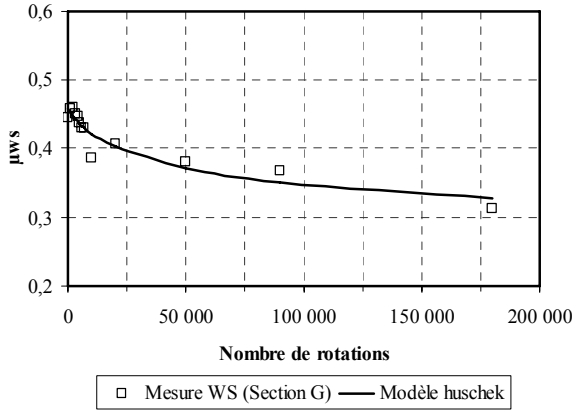

**BBTM 0/10 type2**




**BBTM 0/10 type1**



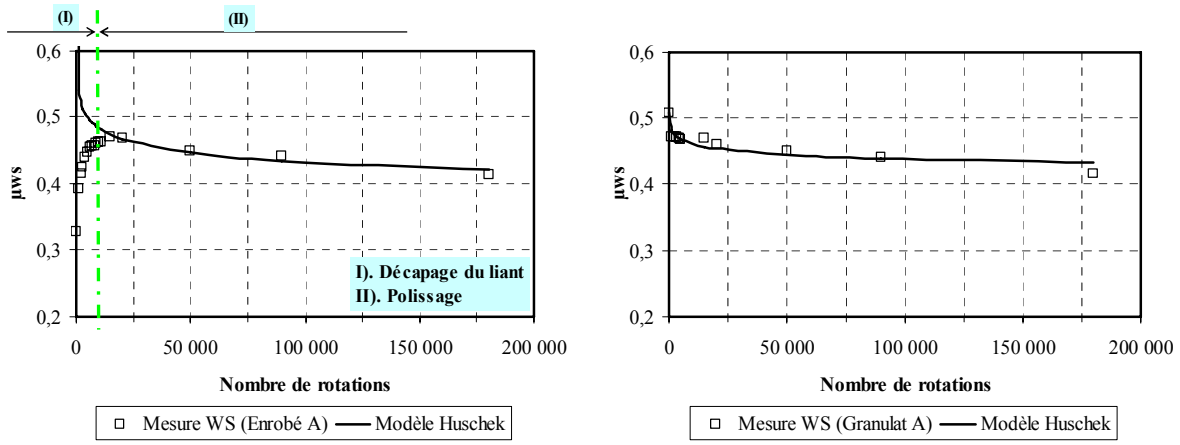

**BBTM 0/10 continu**




**BBSG 0/10**

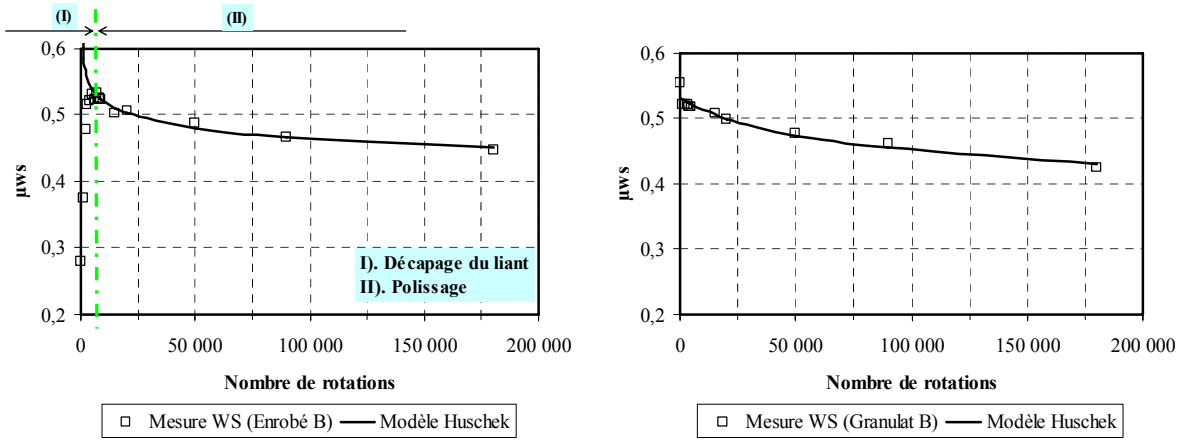
*Figure VIII.47 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek (site de Fontenay, PSV=50)*

## 4) Enrobés fabriqués en laboratoire et granulats



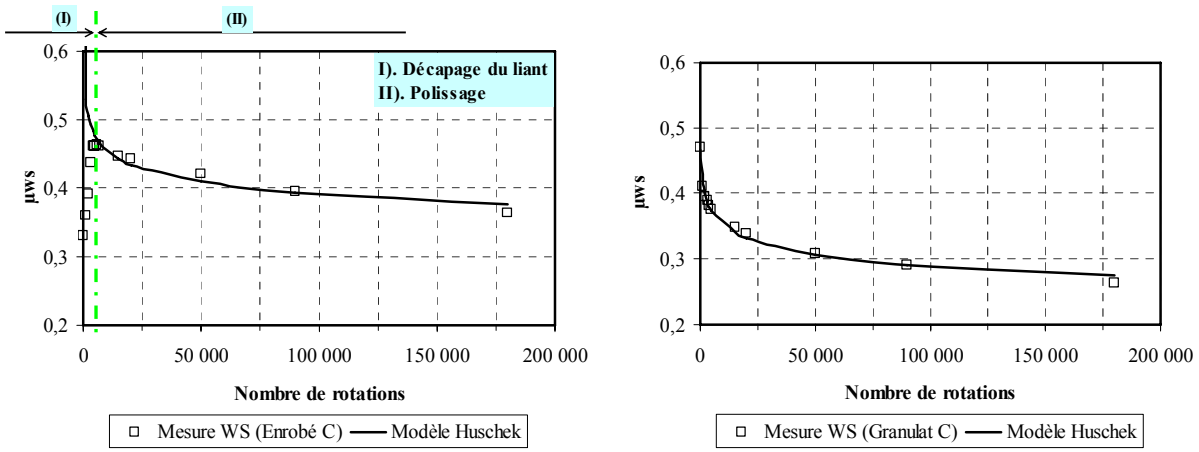

**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat A, PSV=56**

*Figure VIII.48 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek*



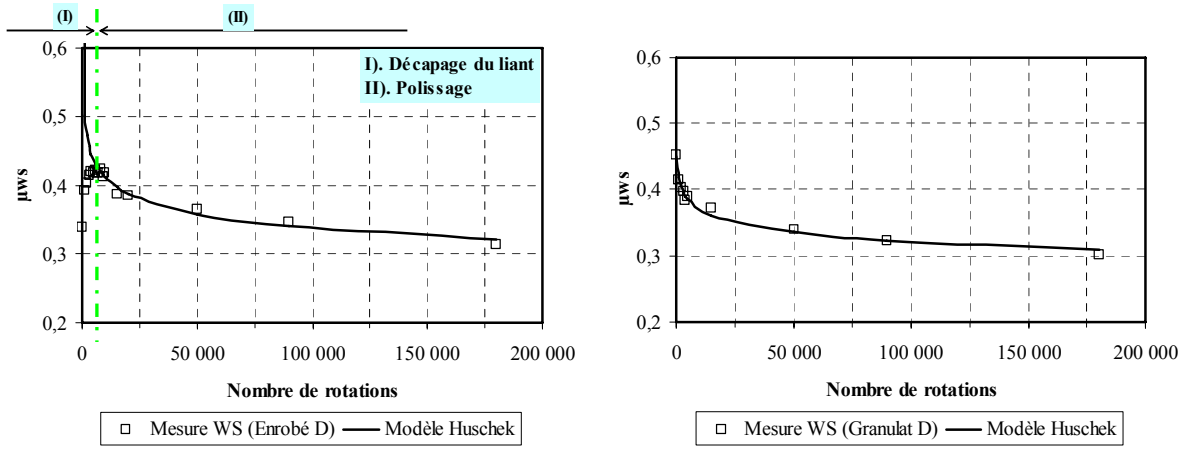

**(a) Cas d'un BBTM 0/6, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat B, PSV=55**

*Figure VIII.49 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek*



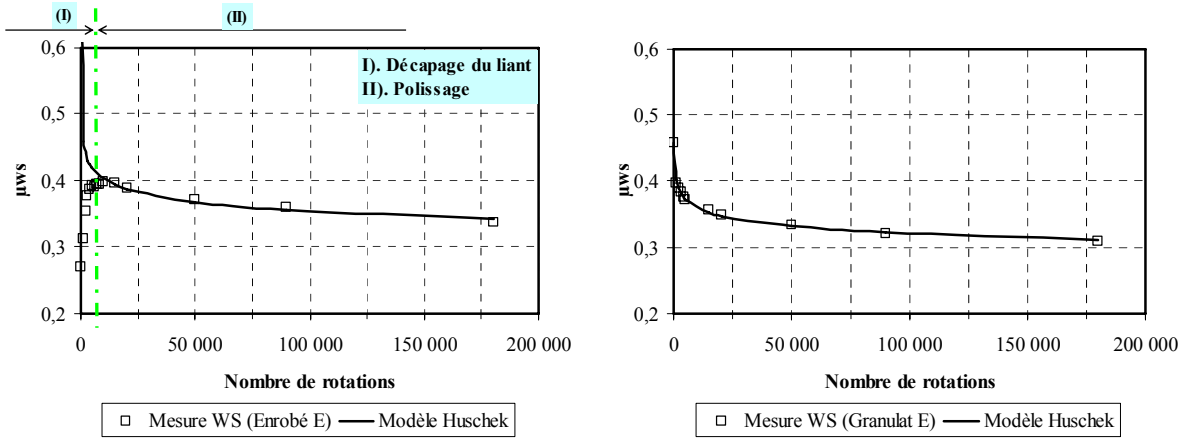

**(a) Cas d'un BBSG 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat C, PSV=53**

*Figure VIII.50 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek*



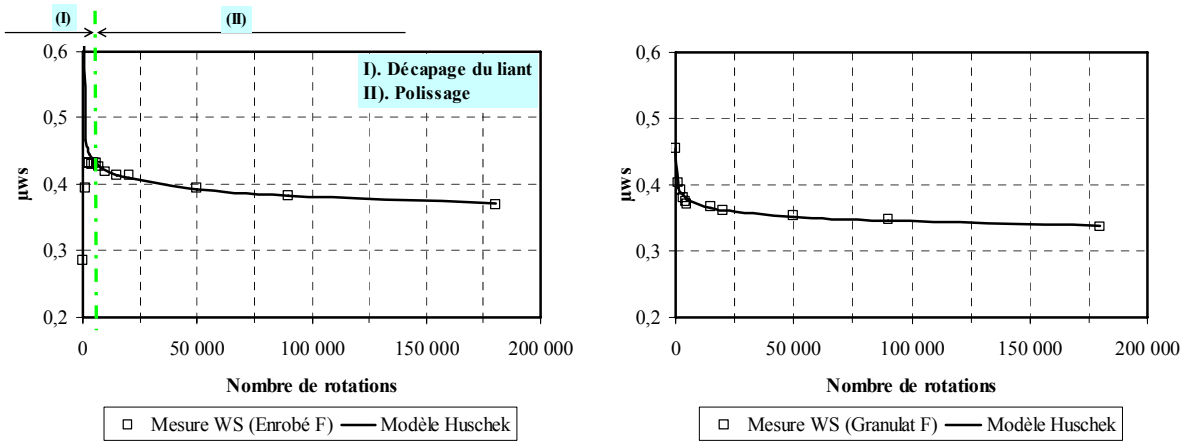

**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat D, PSV=51**

*Figure VIII.51 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek*



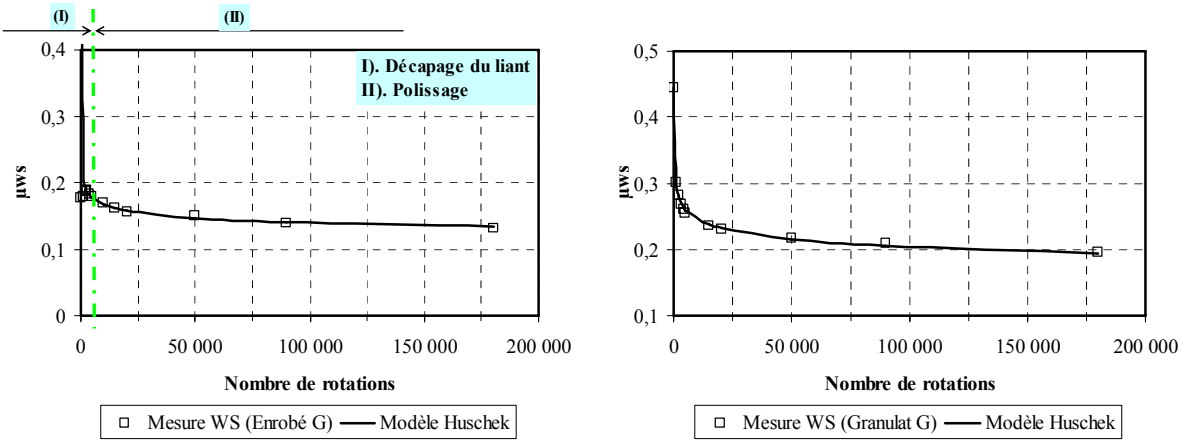

**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat E, PSV=50**

*Figure VIII.52 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek*




**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat F, PSV=49**

*Figure VIII.53 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek*




**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat G, PSV=41**

*Figure VIII.54 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle Huschek*

## 5) Coefficients de la formule du modèle Huschek

| Coefficient \ Site | Angers | Clisson | Coëx |
|---|---|---|---|
| **a** | 1,03E+00 | 1,04E+00 | 7,81E-01 |
| **b** | 9,98E-02 | 9,50E-02 | 9,98E-02 |
| **c** | -1,07E-01 | -1,03E-01 | -4,50E-02 |

*Tableau VIII.14 : Coefficients de la formule du modèle Huschek, sites d'Angers, Clisson et Coëx*

| Coefficient \ Section | A | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **a** | 7,57E-01 | 8,28E-01 | 8,32E-01 | 9,17E-01 | 6,77E-01 | 6,35E-01 | 3,55E-01 |
| **b** | 1,81E-04 | 3,62E-03 | 1,99E-04 | 1,60E-04 | 1,97E-04 | 3,11E-04 | 1,81E-04 |
| **c** | -4,86E-02 | -5,03E-02 | -6,56E-02 | -8,69E-02 | -5,62E-02 | -4,44E-02 | -8,14E-02 |

*Tableau VIII.15 : Coefficients de la formule du modèle Huschek, enrobés fabriqués en laboratoire de A à G*

| Coefficient \ Section | F4 | F5 | F6 | F7 | F8 |
|---|---|---|---|---|---|
| **a** | 6,88E-01 | 7,06E-01 | 5,86E-01 | 7,10E-01 | 5,34E-01 |
| **b** | 1,70E+03 | 1,57E+02 | 3,75E+02 | 9,17E+02 | 1,05E+02 |
| **c** | -5,19E-02 | -5,31E-02 | -2,30E-02 | -5,45E-02 | -1,60E-02 |

*Tableau VIII.16 : Coefficients de la formule du modèle Huschek, site de Saint-Fulgent*

| Coefficient \ Section | B | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|
| **a** | 6,44E-01 | 7,85E-01 | 1,06E+00 | 1,37E+00 | 1,26E+00 |
| **b** | 1,31E+03 | 2,46E+03 | 3,63E+03 | 1,10E+04 | 9,15E+03 |
| **c** | -6,54E-02 | -7,62E-02 | -9,99E-02 | -1,19E-01 | -1,11E-01 |

*Tableau VIII.17 : Coefficients de la formule du modèle Huschek, site de Fontenay*

| Coefficient \ Section | A | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **a** | 5,57E-01 | 1,32E+00 | 7,90E-01 | 6,61E-01 | 5,71E-01 | 4,91E-01 | 5,19E-01 |
| **b** | 8,74E+01 | 1,98E+04 | 4,11E+02 | 4,58E+02 | 8,11E+01 | 1,12E+01 | 6,83E+00 |
| **c** | -2,07E-02 | -9,19E-02 | -8,74E-02 | -6,28E-02 | -5,01E-02 | -3,06E-02 | -8,15E-02 |

*Tableau VIII.18 : Coefficients de la formule du modèle Huschek, granulats de A à G*

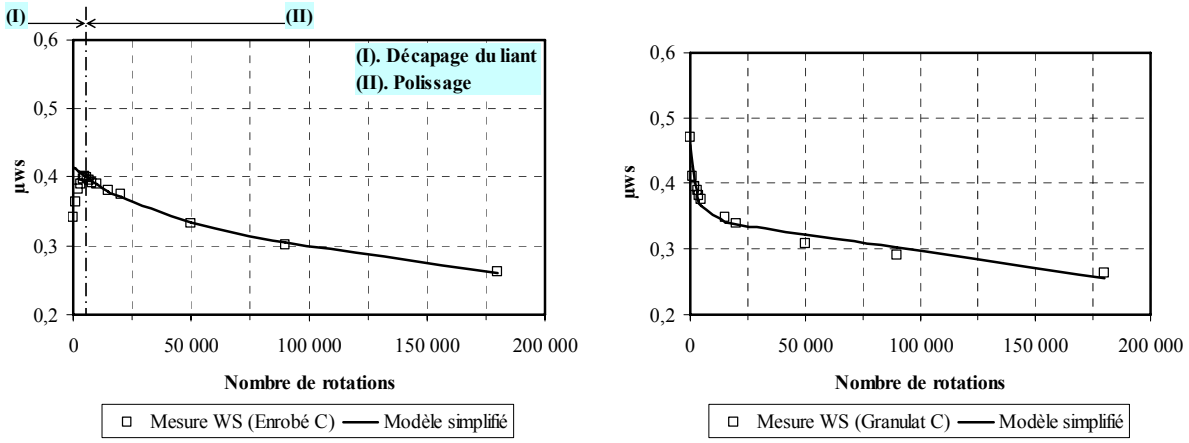
# Annexe H – Modèle simplifié à 4 paramètres

La formule (VI.2) permet de décrire notamment la phase de décapage du liant pour le cas des enrobés. Cependant, le nombre de paramètres est relativement élevé pour les praticiens. Partant du fait que l'obtention d'un niveau d'adhérence à partir d'une étude de formulation est relativement bien maîtrisée, et qu'il est plus difficile de savoir comment ce niveau d'adhérence va se maintenir dans le temps, le modèle d'évolution est simplifié pour ne prédire que ce qui se passe après le décapage du liant. Donc, en l'absence de bitume ou après son décapge, seul une partie du modèle suffit à décrire l'évolution du frottement. Ce modèle sera dit « simplifiée » par la suite :

$$\mu_{WS} = ae^{-bN} - cN + d \qquad \text{(VIII.1)}$$

où : $\mu_{ws}$ est le coefficient de frottement mesuré avec la machine Wehner et Schulze ; $N$ est le nombre de rotations de polissage (ou le trafic) ; $a$, $b$, $c$, $d$ sont les paramètres à déterminer par ajustement.

L'intérêt de cette nouvelle expression analytique est qu'elle nécessite moins de coefficients à déterminer. Cette expression par la suite correspond au « modèle simplifié ». Elle décrit bien l'évolution du frottement des échantillons de granulats et d'enrobés après le décapage du liant, comme illustré à la Figure VIII.55.




**(a) Cas d'un BBSG 0/10, site d'Angers** **(b) Cas du granulat C (PSV = 53)**

*Figure VIII.55 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC »*

Comme pour le modèle complet, le modèle simplifié est aussi satisfaisant pour l'ensemble des mesures réalisées au nombre de 285 points (cf. Figure VIII.56). Il faut mentionner que les ajustements dans le cas des enrobés sont faits après la phase de décapage du liant.

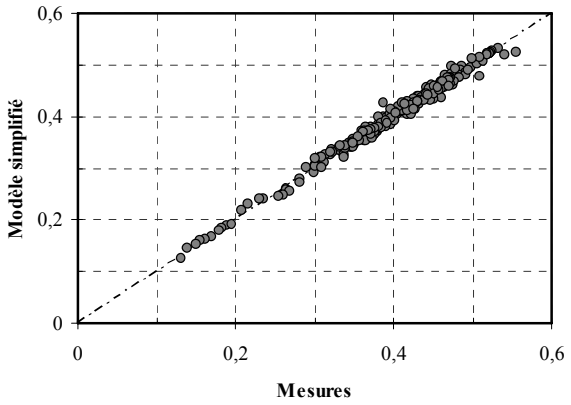
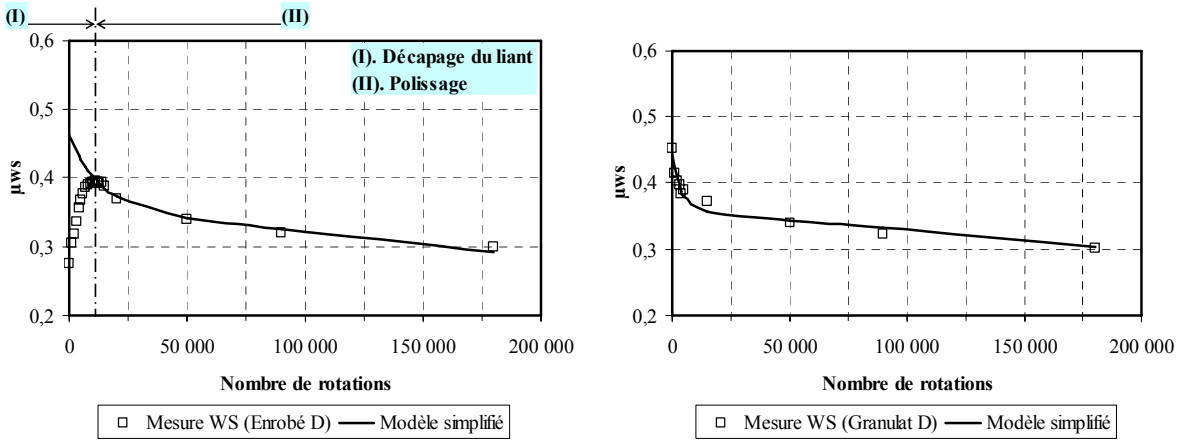


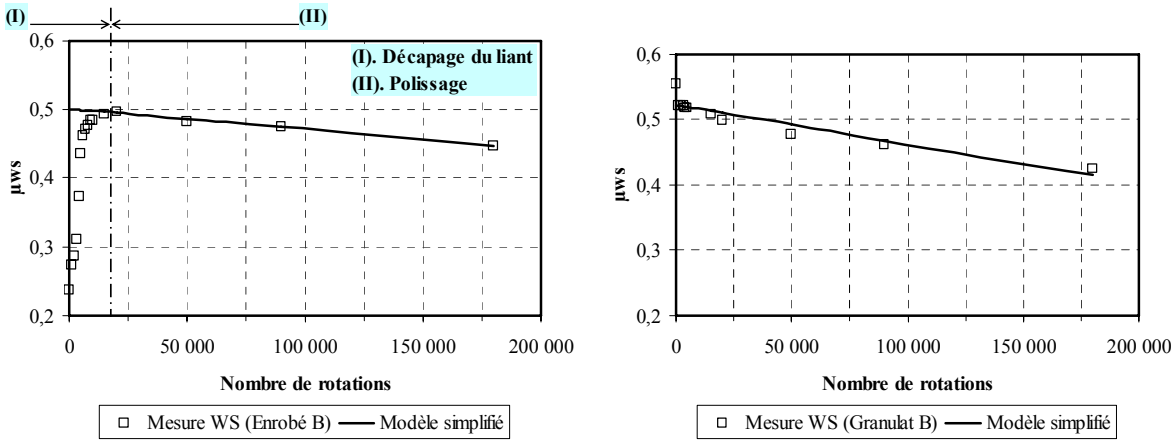

*Figure VIII.56 : Corrélation entre les valeurs mesurées et ajustées à partir du modèle simplifié (285 points de mesure, $R^2$ = 0,99)*

1) Enrobés prélevés *in situ* (sites de Clisson et Coëx) et granulats




**(a) Cas d'un BBTM 0/10, site de Clisson** **(b) Cas du granulat D, PSV=51**

*Figure VIII.57 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC »*




**(a) Cas d'un BBTM 0/6, site de Coëx** **(b) Cas du granulat B, PSV=55**

*Figure VIII.58 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC »*

## 2) Enrobés prélevés *in situ* (site de Saint-Fulgent)

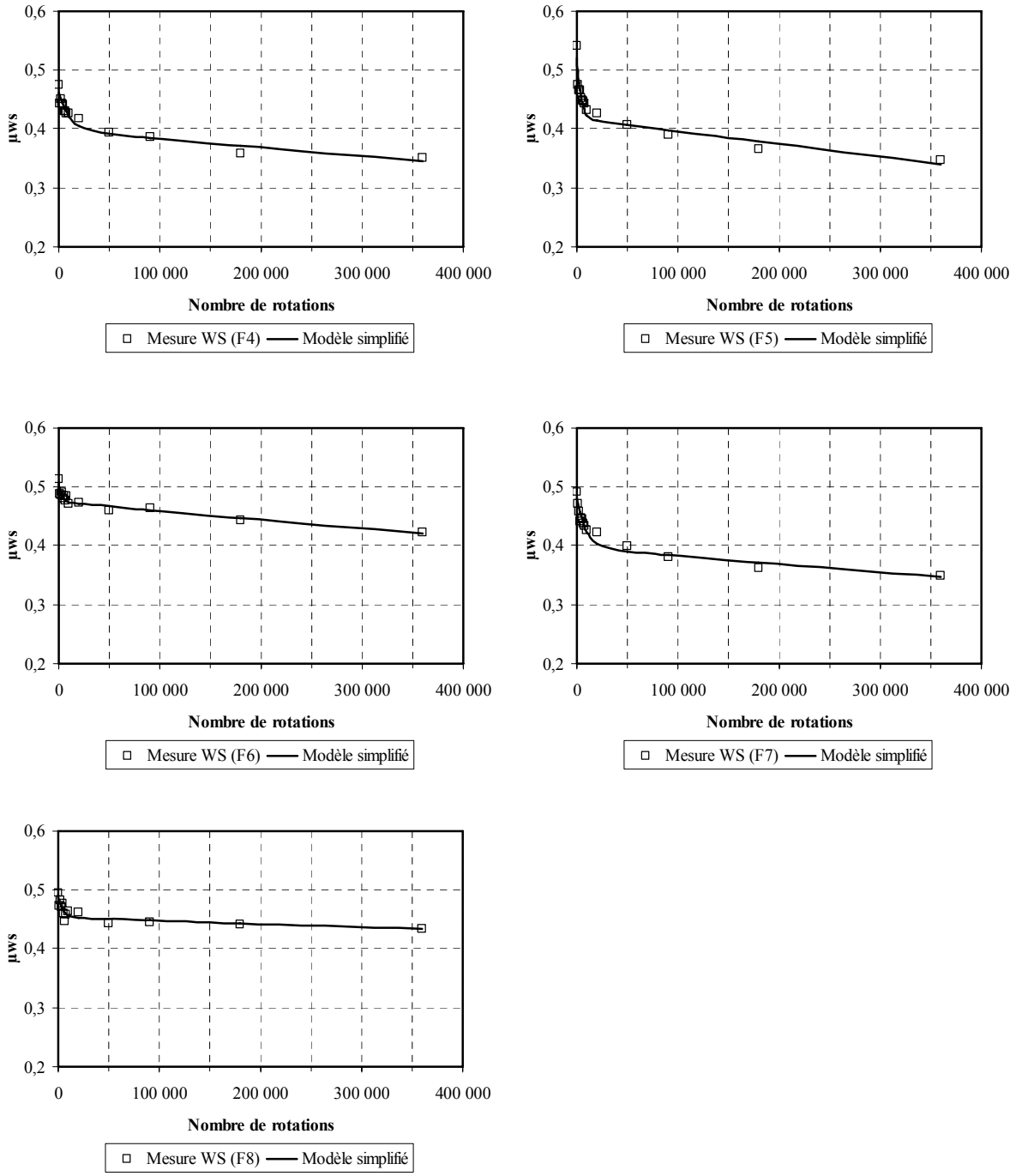
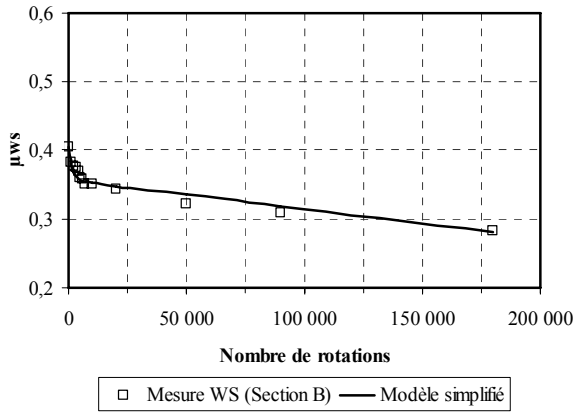
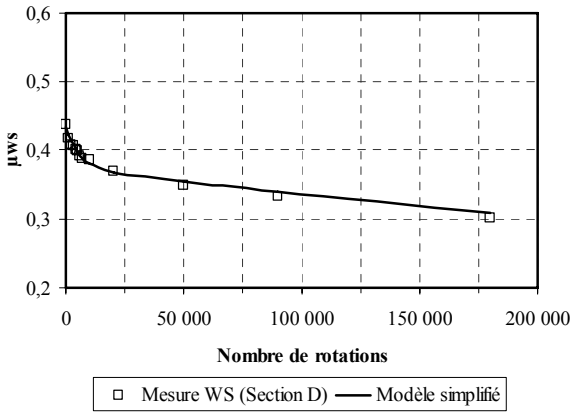



*Figure VIII.59 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » (cas du BBTM0/10, site de Saint-Fulgent, PSV = 51, 61)*

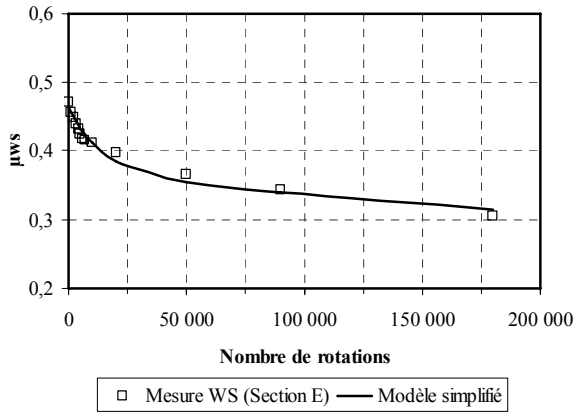
## 3) Enrobés prélevés *in situ* (site de Fontenay)



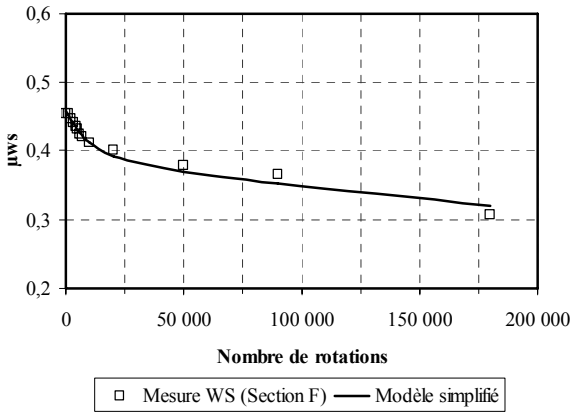

**BBDr 0/10**



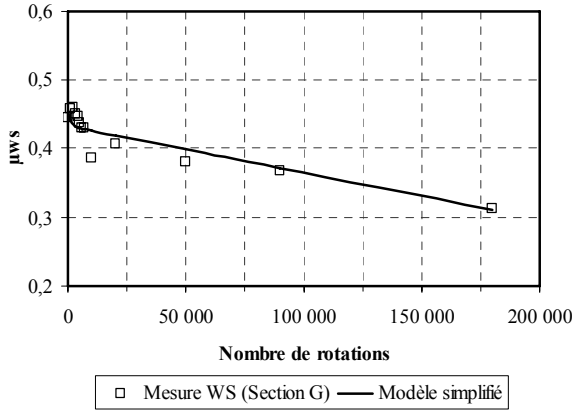

**BBTM 0/10 type2**




**BBTM 0/10 type1**



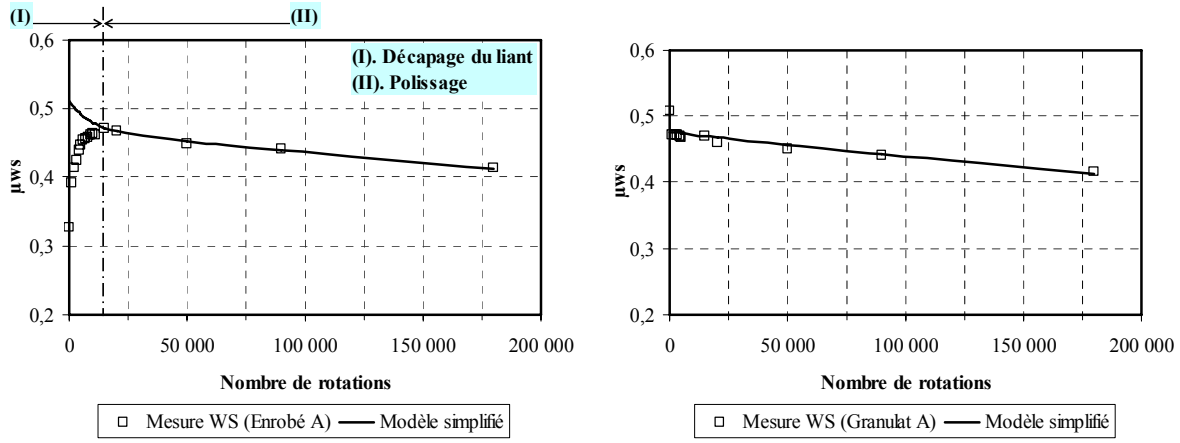

**BBTM 0/10 continu**




**BBSG 0/10**

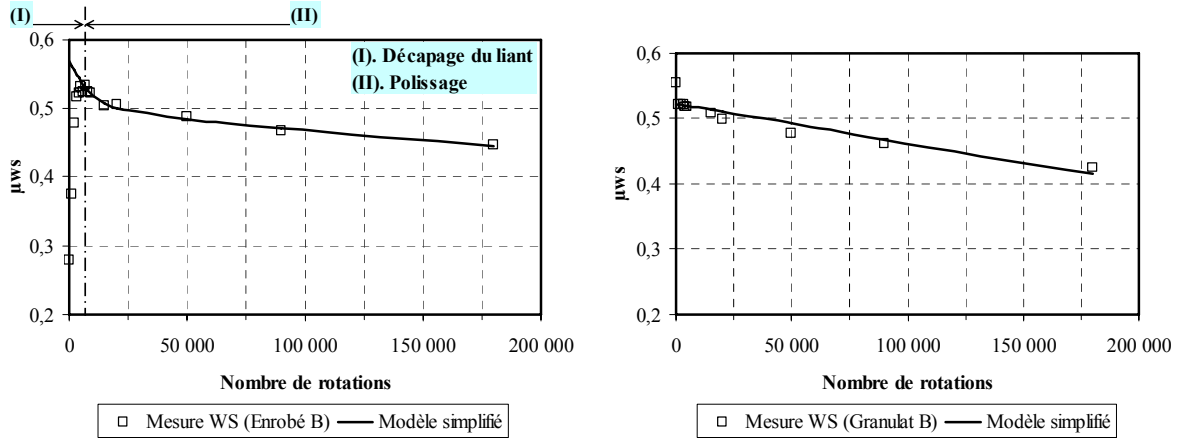
*Figure VIII.60 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC » (site de Fontenay, PSV = 50)*

## 4) Enrobés fabriqués en laboratoire et granulats



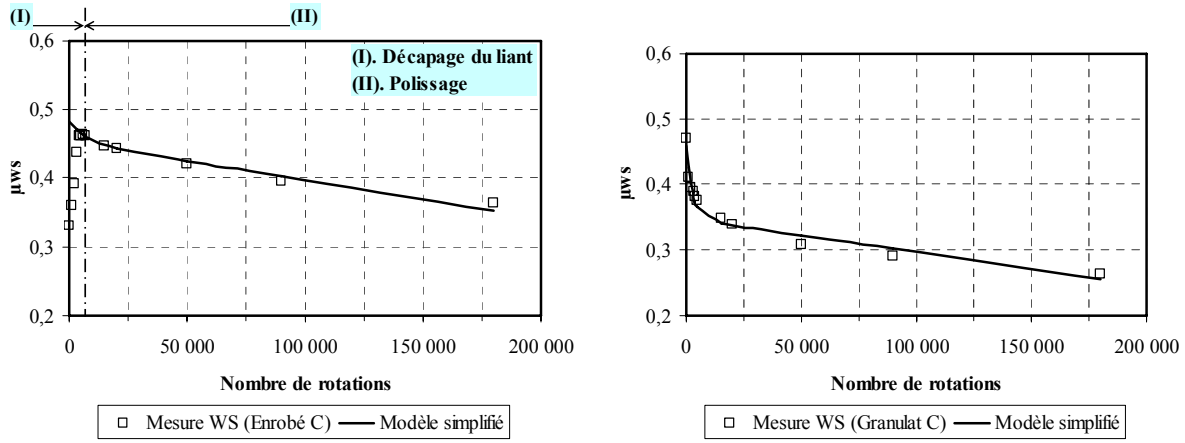

**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat A, PSV=56**

*Figure VIII.61 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC »*



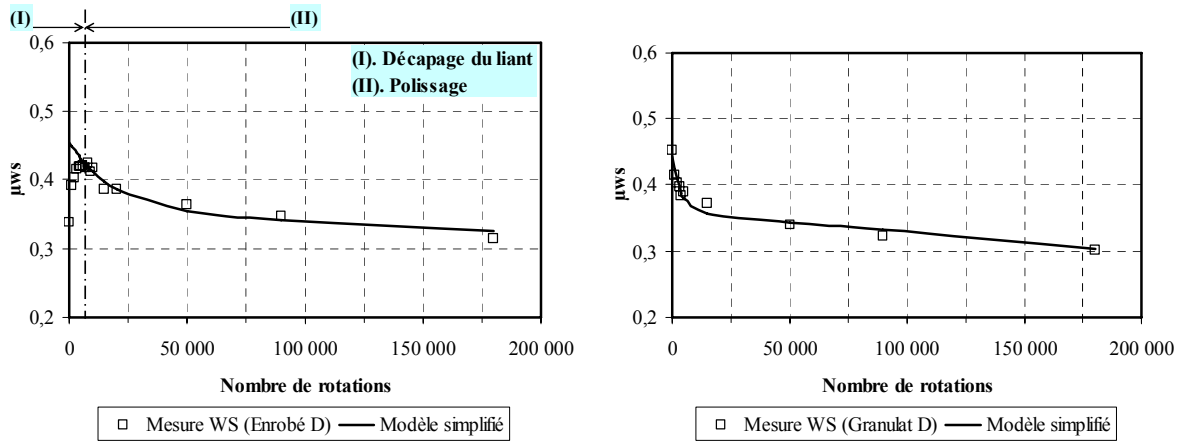

**(a) Cas d'un BBTM 0/6, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat B, PSV = 55**

*Figure VIII.62 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC »*



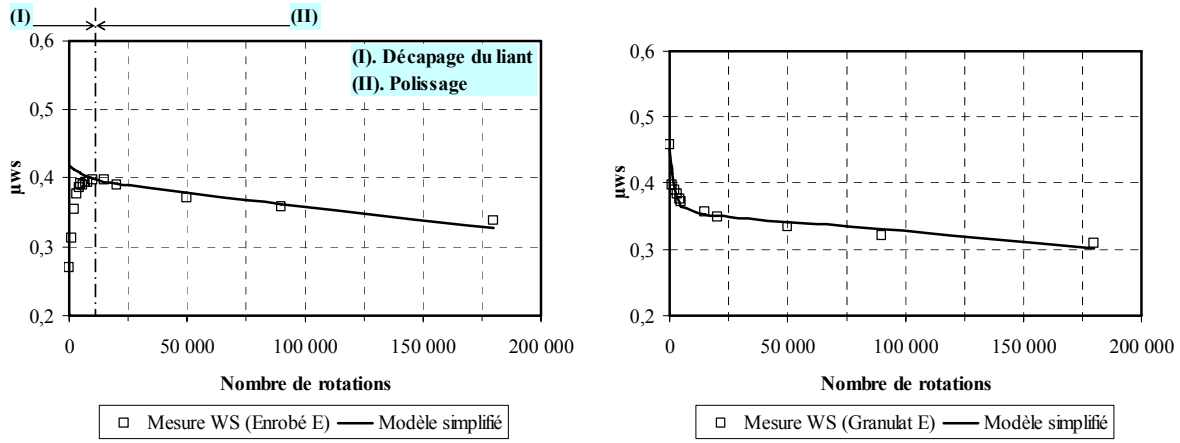

**(a) Cas d'un BBSG 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat C, PSV=53**

*Figure VIII.63 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC »*



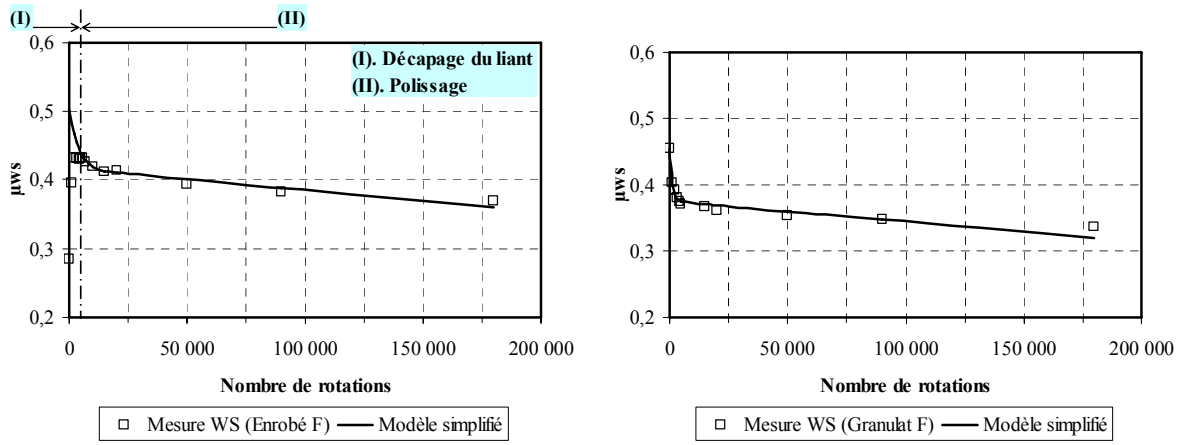

**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat D, PSV=51**

*Figure VIII.64 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC »*



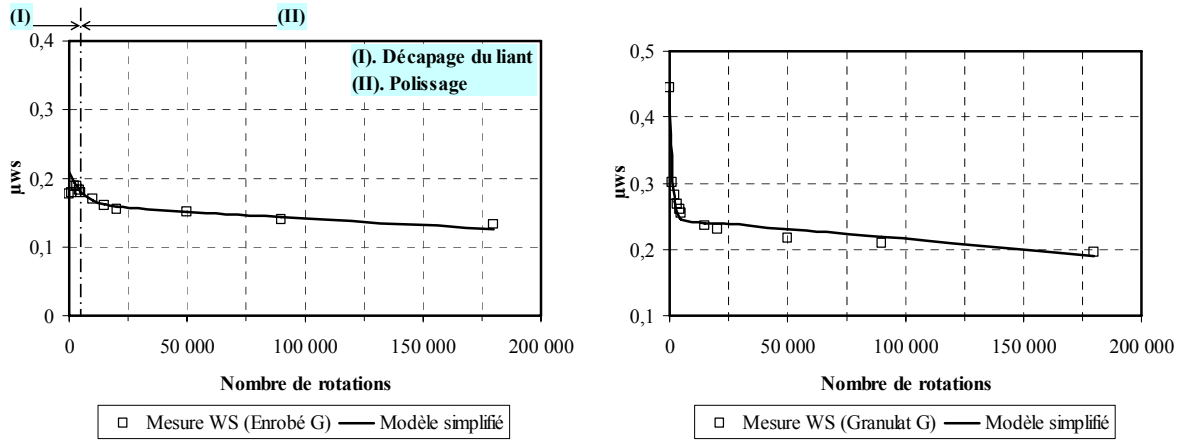

**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat E, PSV = 50**

*Figure VIII.65 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC »*




**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat F, PSV=49**

*Figure VIII.66 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC »*




**(a) Cas d'un BBTM 0/10, fabrication en laboratoire** **(b) Cas du granulat G, PSV=41**

*Figure VIII.67 : Courbes d'évolution comparées : mesures et modèle simplifié « LCPC »*

5) Coefficients de la formule du modèle simplifié

| Coefficient \ Site | Angers | Clisson | Coëx |
|---|---|---|---|
| **a** | 7,08E-02 | 1,04E-01 | 1,05E-01 |
| **b** | 3,31E-05 | 7,75E-05 | 8,30E-07 |
| **c** | 4,64E-07 | 3,69E-07 | 2,17E-07 |
| **d** | 3,43E-01 | 3,58E-01 | 3,96E-01 |

*Tableau VIII.19 : Coefficients de la formule du modèle simplifié, sites d'Angers, Clisson et Coëx*

| Coefficient \ Section | A | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **a** | 4,17E-02 | 7,13E-02 | 3,16E-02 | 9,94E-02 | 2,04E-02 | 8,71E-02 | 4,67E-02 |
| **b** | 1,13E-04 | 1,03E-04 | 1,21E-04 | 5,26E-05 | 1,60E-04 | 2,58E-04 | 1,77E-04 |
| **c** | 3,18E-07 | 2,89E-07 | 5,43E-07 | 1,65E-07 | 4,00E-07 | 3,08E-07 | 2,00E-07 |
| **d** | 4,69E-01 | 4,98E-01 | 4,51E-01 | 3,55E-01 | 3,98E-01 | 4,16E-01 | 1,61E-01 |

*Tableau VIII.20 : Coefficients de la formule du modèle simplifié, enrobés fabriqués en laboratoire de A à G*

| Coefficient \ Section | F4 | F5 | F6 | F7 | F8 |
|---|---|---|---|---|---|
| **a** | 6,40E-02 | 1,03E-01 | 3,33E-02 | 8,28E-02 | 3,71E-02 |
| **b** | 8,96E-05 | 2,51E-04 | 3,48E-04 | 1,10E-04 | 2,57E-04 |
| **c** | 1,42E-07 | 2,15E-07 | 1,47E-07 | 1,41E-07 | 5,41E-08 |
| **d** | 3,97E-01 | 4,17E-01 | 4,74E-01 | 3,97E-01 | 4,54E-01 |

*Tableau VIII.21 : Coefficients de la formule du modèle simplifié, site de Saint-Fulgent*

| Coefficient \ Section | B | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|
| **a** | 4,77E-02 | 6,10E-02 | 9,69E-02 | 7,20E-02 | 2,11E-02 |
| **b** | 6,87E-04 | 1,67E-04 | 6,99E-05 | 9,15E-05 | 9,01E-04 |
| **c** | 4,26E-07 | 3,51E-07 | 2,85E-07 | 3,72E-07 | 6,77E-07 |
| **d** | 3,57E-01 | 3,72E-01 | 3,66E-01 | 3,87E-01 | 4,33E-01 |

*Tableau VIII.22 : Coefficients de la formule du modèle simplifié, site de Fontenay*

| Coefficient \ Section | A | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **a** | 5,94E-02 | 1,17E-01 | 1,11E-01 | 8,37E-02 | 9,29E-02 | 7,93E-02 | 1,95E-01 |
| **b** | 2,61E-06 | 1,40E-06 | 3,30E-04 | 2,65E-04 | 4,87E-04 | 9,31E-04 | 9,77E-04 |
| **c** | 2,36E-07 | 4,55E-07 | 5,02E-07 | 3,08E-07 | 3,08E-07 | 3,08E-07 | 3,00E-07 |
| **d** | 4,17E-01 | 4,06E-01 | 3,47E-01 | 3,59E-01 | 3,58E-01 | 3,76E-01 | 2,45E-01 |

*Tableau VIII.23 : Coefficients de la formule du modèle simplifié, granulats de A à G*

# Annexe I – Étude des paramètres du modèle proposé simplifié en fonction des caractéristiques des matériaux

L'un des objectifs est de voir comment les caractéristiques des granulats interviennent dans le modèle. Pour compléter des données des sites expérimentaux, celles provenant des quatre granulats testés en laboratoire sont également utilisées (cf. Tableau VIII.24). Rappelons que la taille des granulats utilisée dans la préparation des échantillons est de 7,2/10 mm, sauf pour le lot B (PSV = 55) qui a une granulométrie de 4/6,3 mm.

| N° du granulat | Nature | Mélange bitumineux | Fraction du granulat | PSV | LA | MDE |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **A** | Rhyolite | BBTM 0/10 | 7,2/10 | 56 | 15 | 9 |
| **B** | Rhyolite | BBTM 0/6 | 4/6,3 | 55 | 15 | 9 |
| **C** | Spilite | BBSG 0/10 | 7,2/10 | 53 | 9 | 10 |
| **D** | Gabbro | BBTM 0/10 | 7,2/10 | 51 | 15 | 10 |
| **E** | Diorite | BBTM 0/10 | 7,2/10 | 50 | 12 | 12 |
| **F** | Leptinite | BBTM 0/10 | 7,2/10 | 49 | 15 | 4 |
| **G** | Calcaire | BBTM 0/10 | 7,2/10 | 41 | 21 | 12 |

*Tableau VIII.24 : Caractéristiques des granulats utilisés en laboratoire*

Les caractéristiques considérées ici sont le PSV pour les granulats, la microrugosité et la macrorugosité pour les enrobés. Les différents paramètres de la fonction d'ajustement auxquels nous allons nous intéresser sont représentés à la figure suivante : le coefficient de frottement initial (a + d), la pente à l'origine (- ab - c) et l'intersection à l'origine (N = 0) (d). La détermination de ces trois paramètres permet de caractériser complètement l'évolution de la courbe.

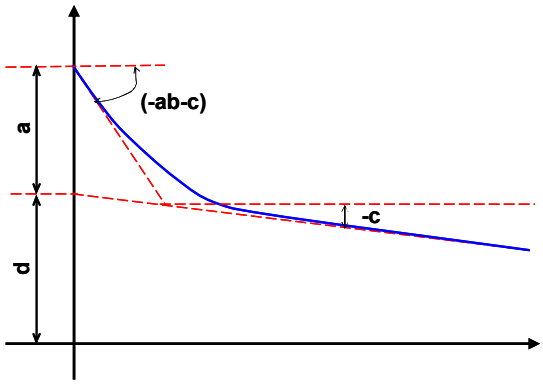



*Figure VIII.68 : Représentation des paramètres de la formule*

Coefficient de frottement à l'état initial (a + d)

Pour N = 0, $\mu_{ws}$ = a + d représente le coefficient de frottement initial. Ce coefficient est réel pour des granulats, mais fictif pour des mélanges bitumineux, car la formule (VIII.1) ne s'applique qu'à ces mélanges qu'après le décapage du liant.

On note que la courbe du granulat B (PSV = 55, cf. Figure VIII.69) est au-dessus de toutes les autres, même à l'origine. Il s'agit justement du granulat utilisé pour fabriquer le mélange BBTM 0/6. On cherche donc à relier (a + d) à la taille des grains.

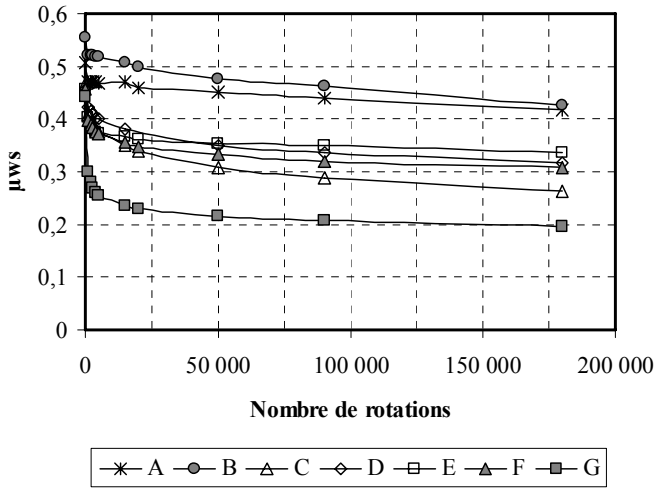



*Figure VIII.69 : Évolutions de l'adhérence de sept granulats (deux classes granulaires : 4/6,3, 7,2/10)*

*Classe granulaire 4/6,3 : granulat B ; Classe granulaire 7,2/10 : autres granulats.*

Les plages de valeurs, par exemple 0/10 mm, ne fournissent que des extrêmes mais pas la taille réelle des grains une fois qu'ils sont introduits dans les mélanges. Celle-ci peut être déterminée à partir des cartographies de hauteurs issues des mesures de macrotexture. Les cartographies des surfaces d'échantillons des enrobés et des granulats sont analysées à l'aide du logiciel TOPOSURF [146].

Le paramètre suivant est utilisé pour l'évaluation du paramètre « taille » des cartographies :

$$SP_{mx} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{1024} n_i} \sum_{i=1}^{1024} \sum_{j=1}^{n_i} S_{ij} \qquad \text{(VIII.2)}$$

où $SP_{mx}$ est la taille dans la direction $X$ ; $S_{ij}$ : taille élémentaire du profil n°(i) au tronçon n°(j) ; $n_i$ est le nombre de tronçons trouvés sur le profil n°(i).

Le même calcul est fait dans la direction Y. Les notions de « tronçon » et de « taille élémentaire » sont illustrées à la Figure VIII.70. La ligne définissant les tronçons est celle correspondant à la hauteur moyenne.

La moyenne des paramètres $SP_{mx}$ et $SP_{my}$ donne le paramètre $SP_m$, qui sera utilisé pour caractériser la taille réelle des grains. Cette caractérisation peut être également évaluée sur des surfaces de mélanges bitumineux.

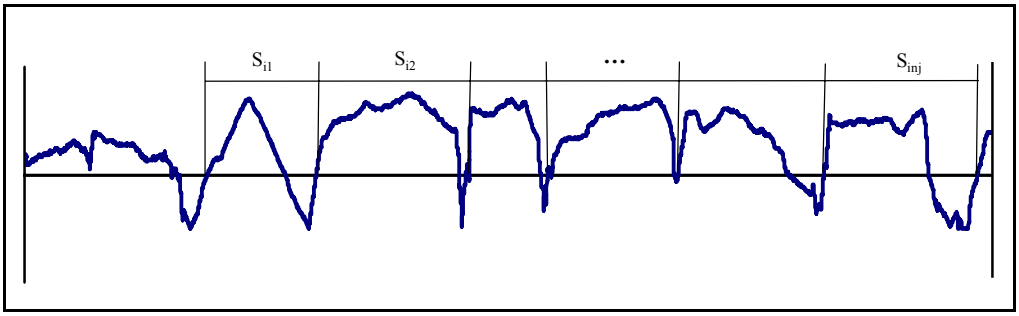



*Figure VIII.70 : Calcul de la macrorugosité moyenne*

La relation entre (a + d) et $SP_m$ pour sept granulats est montrée à la Figure VIII.71. On constate que le coefficient de frottement à l'origine varie en sens inverse de la taille des grains. Nous constatons une variation linéaire du coefficient de frottement de 0,55 à 0,4 qui est donnée en fonction de la macrorugosité moyenne $SP_m$ :

$$(a+d) = -0{,}02SP_m + 0{,}63 \qquad \text{(VIII.3)}$$

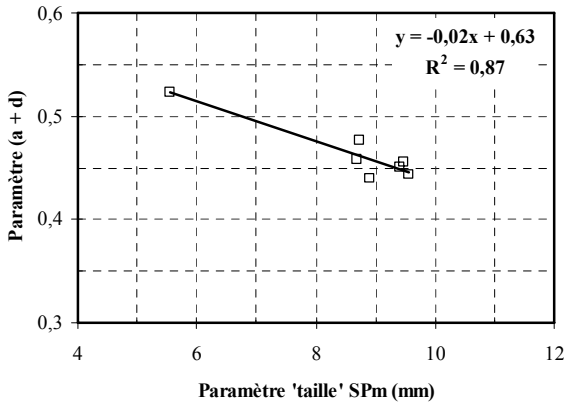



*Figure VIII.71 : Relation entre le coefficient de frottement initial et la taille des grains pour le cas des granulats*

Pour les enrobés, les ajustements de la formule (VIII.1) ne sont faits qu'après la phase de décapage du liant. Le paramètre (a + d) représente la valeur maximale du coefficient de frottement pour les échantillons des sites d'Angers, Clisson et Coëx et la valeur initiale du coefficient de frottement pour les échantillons des sites de Saint-Fulgent et Fontenay. Il faut rappeler que les échantillons de ces derniers ont été déjà décapés par le climat lorsqu'ils ont été prélevés en rive après quelques années de circulation. La courbe d'évolution de ces échantillons ne comprend que la phase de polissage du granulat.

Comme dans le cas des granulats, la relation entre les valeurs (a + d) et $SP_m$ est aussi établie pour le cas des enrobés, comme on peut le voir sur la Figure VIII.72. Cette relation n'est pas satisfaisante ($R^2$ = 0,35). Cependant, la somme (a + d) pour le cas des enrobés varie de la même manière que dans le cas des granulats (cf. Figure VIII.71).

Cette relation entre la somme (a + d) et la macrorugosité est aussi donnée :

$$(a+d) = -0{,}02SP_m + 0{,}62 \qquad \text{(VIII.4)}$$

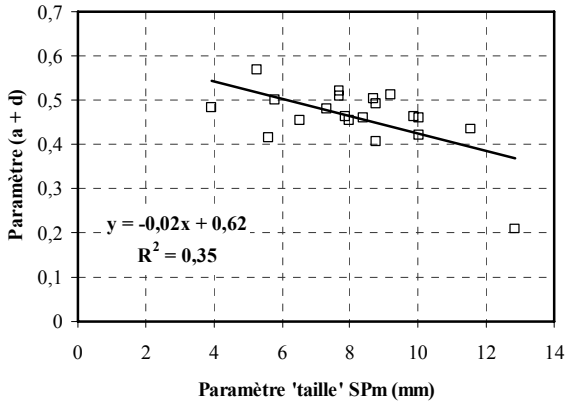



*Figure VIII.72 : Relation entre le coefficient de frottement maximal et la taille des grains pour le cas des enrobés*

La formule (VIII.4) est sensiblement la même que celle de la formule (VIII.3). Ceci démontre que cette relation est valable pour le cas des enrobés. Nous avons donc une relation entre le paramètre (a + d) et le paramètre de la macrorugosité $SP_m$ montrée à la Figure VIII.73 qui s'exprime par la formule (VIII.4) pour le cas des granulats.

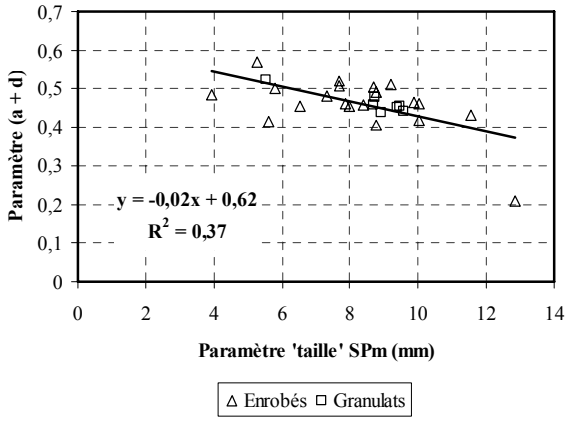



*Figure VIII.73 : Relation entre le coefficient de frottement maximal et la taille des grains*

Par ailleurs, aucune relation évidente n'est trouvée entre le paramètre (a + d) et le PSV des granulats (cf. Figure VIII.74). Ce résultat est presque prévisible, car le PSV ne traduit pas l'état de la microtexture des granulats avant, mais plutôt après l'action de polissage.

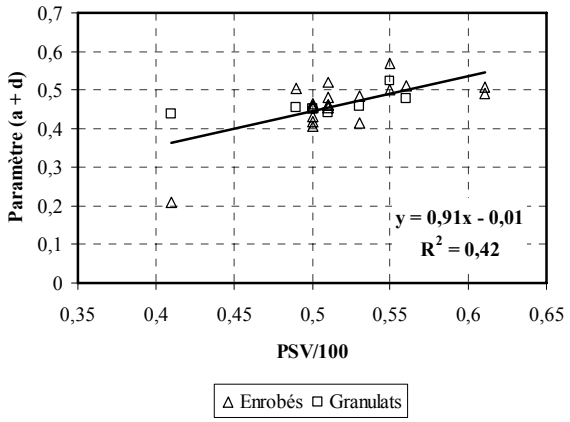



*Figure VIII.74 : Relation entre le coefficient de frottement maximal et PSV*

Les figures suivantes montrent d'une part, les relations entre le coefficient de frottement $\mu_{ws}$ et les paramètres d'indenteur θ et Cot α (cf. Figure VIII.75), et d'autre part, celles entre le coefficient de frottement et les paramètres mécaniques des matériaux LA et MDE (cf. Figure VIII.76). Aucune relation nette n'est observée.

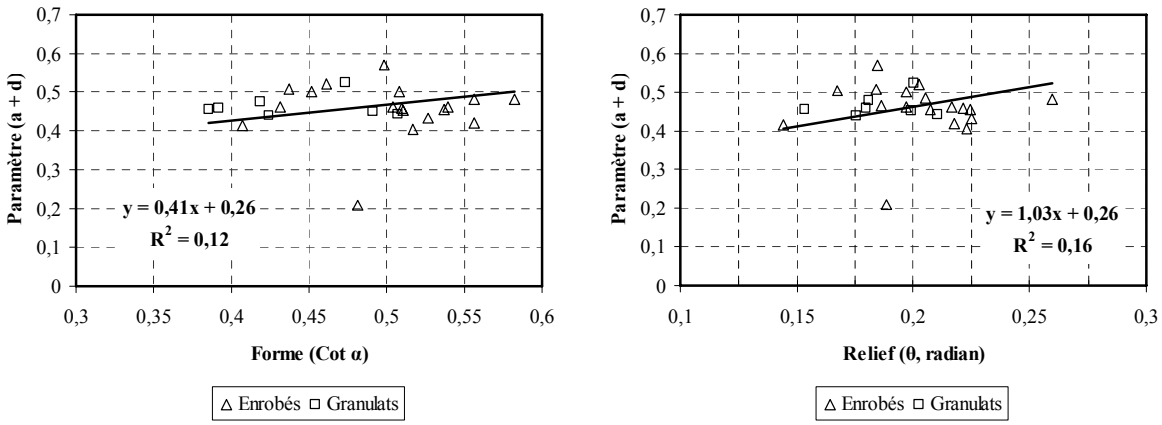



*Figure VIII.75 : Relations entre le coefficient de frottement maximal et le paramètre de forme et relief*

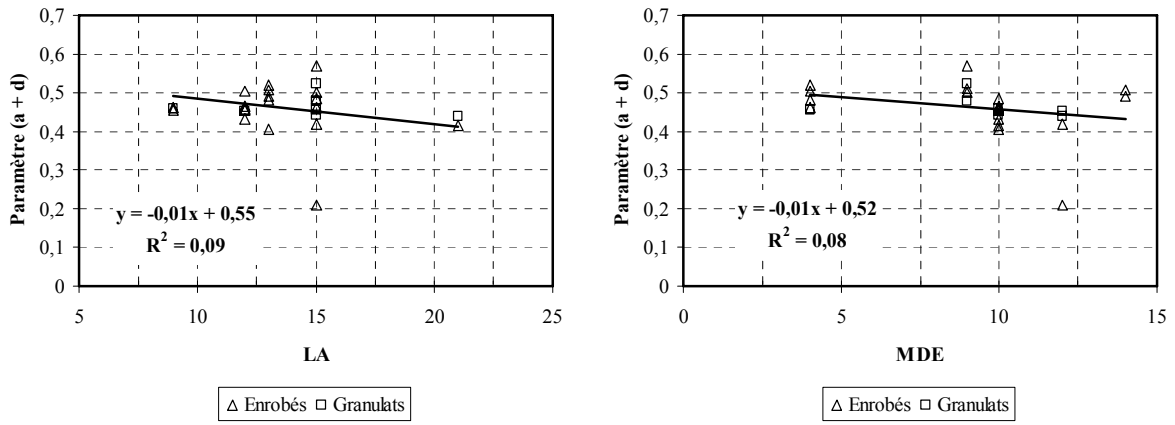



*Figure VIII.76 : Relations entre le coefficient de frottement maximal et les valeurs LA et MDE*

<u>Étude de la pente à l'origine</u>

La dérivée par rapport à N de la formule (VIII.1) donne :

$$\frac{d\mu}{dN} = -abe^{-bN} - c \qquad \text{(VIII.5)}$$

Pour N = 0, la pente est égale à (- ab - c). La relation entre cette pente (en valeur absolue) et le PSV est montrée dans la Figure VIII.77. Une échelle logarithmique est utilisée sur l'axe des Y pour mieux voir la tendance des points proches de 0. L'ensemble des éprouvettes d'enrobés et de granulats est considéré. On voit que la pente à l'origine de la courbe d'évolution (en valeur absolue) varie en sens inverse de celui du PSV des granulats. Ce résultat veut dire que plus le PSV du granulat est faible, plus rapide sera la décroissance de l'adhérence au début du processus de polissage. La relation pente–PSV n'est pas complètement linéaire, à cause du point correspondant à l'éprouvette composée de granulats de calcaire. En pratique, le granulat de calcaire n'est pas utilisé dans la bande de roulement, ce point est enlevé pour établir la relation.

L'analyse de ces courbes (d'enrobés et de granulats) montre que ces dernières ont la même pente et sont presque superposables (mise à part celle relative au granulat calcaire qui est loin du lot). L'équation liant ces deux grandeurs (la pente initiale en absolue et le PSV) pour le cas de granulats s'écrit aussi :

$$(ab + c) = 10^{12} e^{-0,76PSV} \qquad \text{(VIII.6)}$$

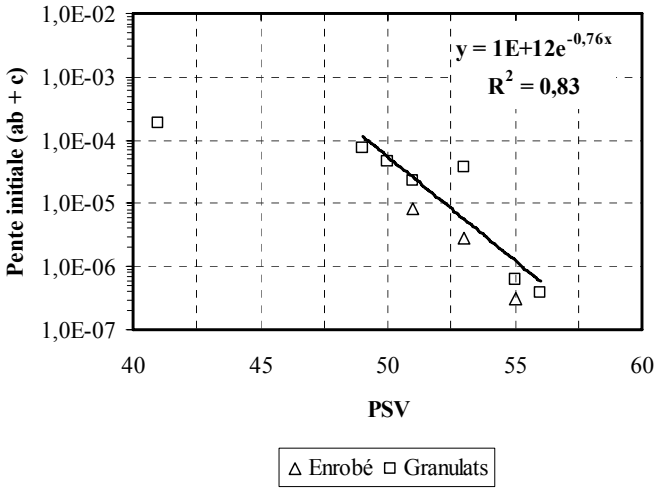



*Figure VIII.77 : Relation entre la pente à l'origine et PSV dans le cas des granulats (sauf calcaire)*

Cependant, la relation ci-dessus n'est satisfaisante ni pour les enrobés décapés (sites de Saint-Fulgent et Fontenay) ni pour les enrobés fabriqués en laboratoire (cf. Figure VIII.78).

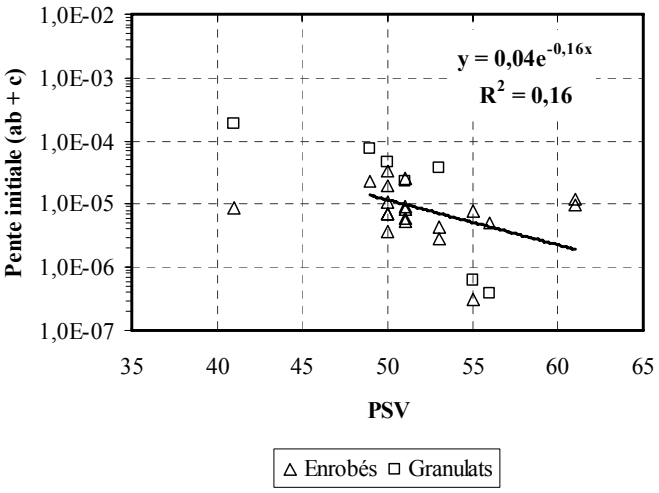



*Figure VIII.78 : Relation entre la pente à l'origine et PSV*

Aucune relation linéaire ne peut être établie entre la pente à l'origine et la taille des grains $SP_m$ (cf. Figure VIII.79) ou entre la pente à l'origine et les paramètres d'indenteur θ et Cot α (cf. Figure VIII.80), ou entre la pente à l'origine et les paramètres mécaniques des matériaux LA et MDE (cf. Figure VIII.81). Les valeurs du coefficient $R^2$ sont très faibles.

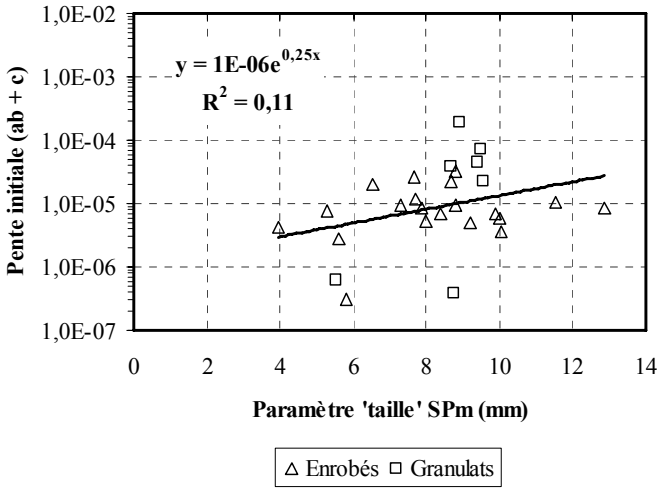



*Figure VIII.79 : Relation entre la pente à l'origine et la taille des grains $SP_m$*

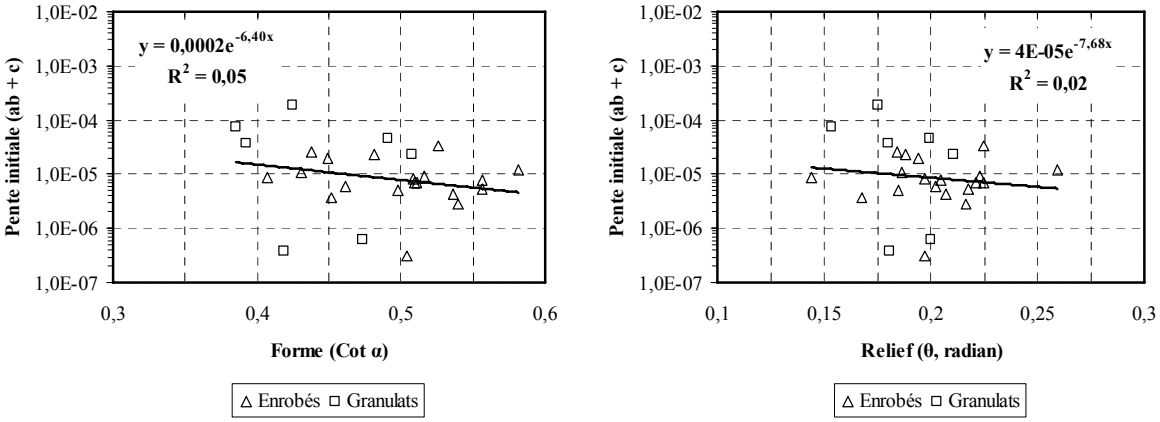



*Figure VIII.80 : Relations entre la pente à l'origine et la forme et le relief*

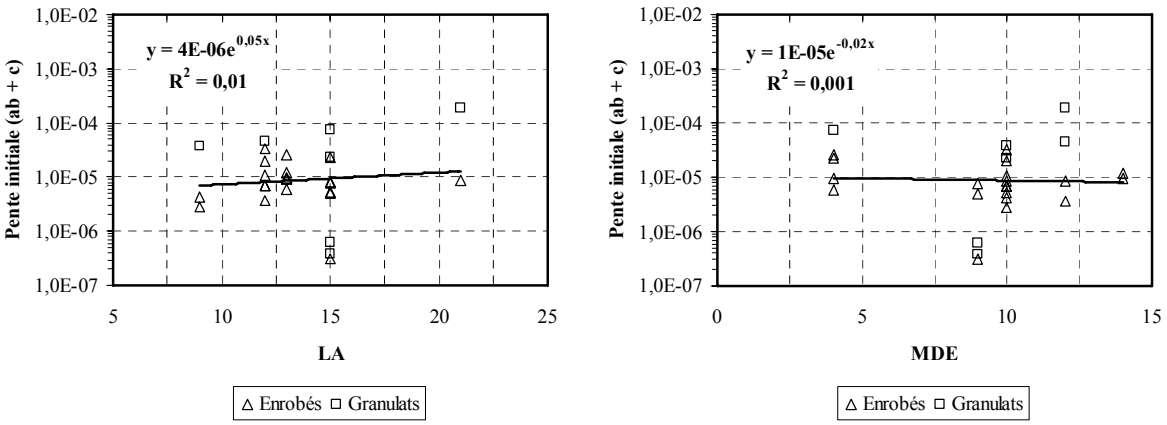



*Figure VIII.81 : Relations entre la pente à l'origine et les valeurs de LA et de MDE*

Cependant, une relation semblable est trouvée entre le paramètre (b) et le PSV, sauf pour le granulat calcaire (cf. Figure VIII.82). Ceci est logique car la formule ( est contrôlée par la fonction exponentielle en début du processus d'évolution, donc le paramètre (b) devrait se comporter comme la pente à l'origine.

Cette relation entre le paramètre (b) et le PSV s'écrit donc :

$$(b) = 8 \times 10^{16} e^{-0,92PSV} \qquad \text{(VIII.7)}$$

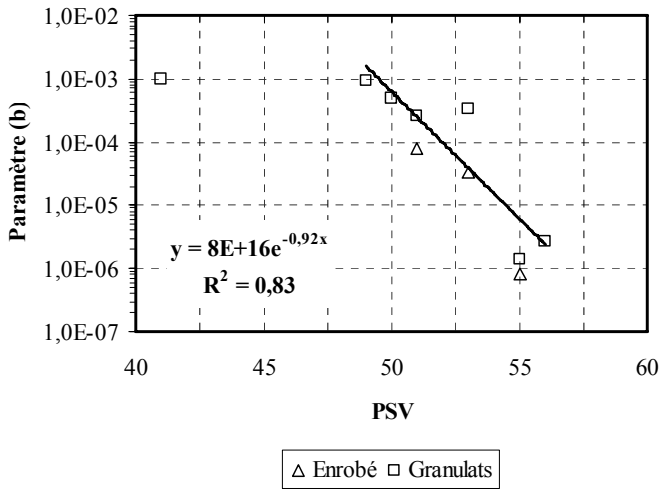



*Figure VIII.82 : Relation entre le paramètre (b) et PSV (sauf calcaire)*

Par contre, la relation entre le paramètre (b) et le PSV pour les enrobés décapés et les enrobés fabriqués en laboratoire n'est pas satisfaisante, comme le montre la Figure VIII.83.

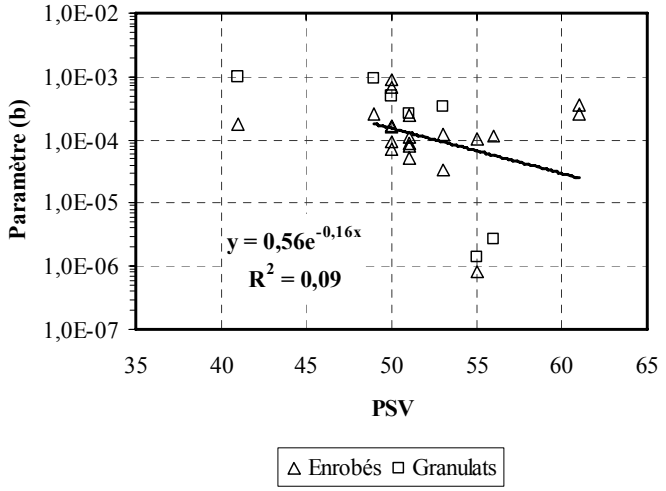



*Figure VIII.83 : Relation entre le paramètre (b) et PSV*

Aucune relation linéaire n'est établie entre le paramètre (b) et la taille des grains $SP_m$ (cf. Figure VIII.84), ou entre le paramètre (b) et les paramètres d'indenteur θ et Cotg α (cf. Figure VIII.85), ou entre le paramètre (b) et les paramètres mécaniques des matériaux LA et MDE (cf. Figure VIII.86).

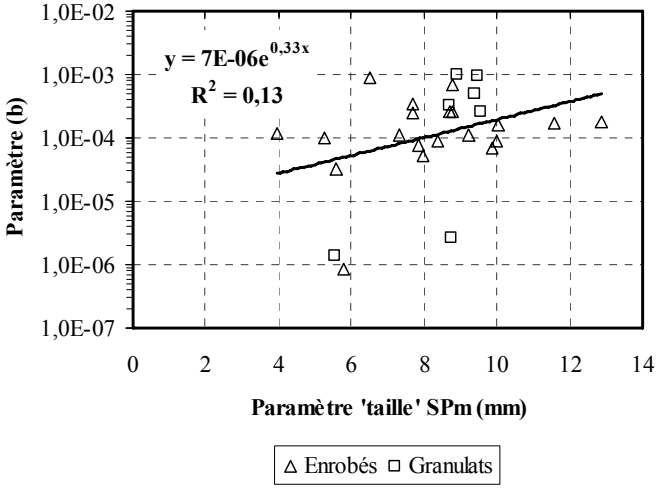



*Figure VIII.84 : Relation entre le paramètre (b) et la taille des grains $SP_m$*

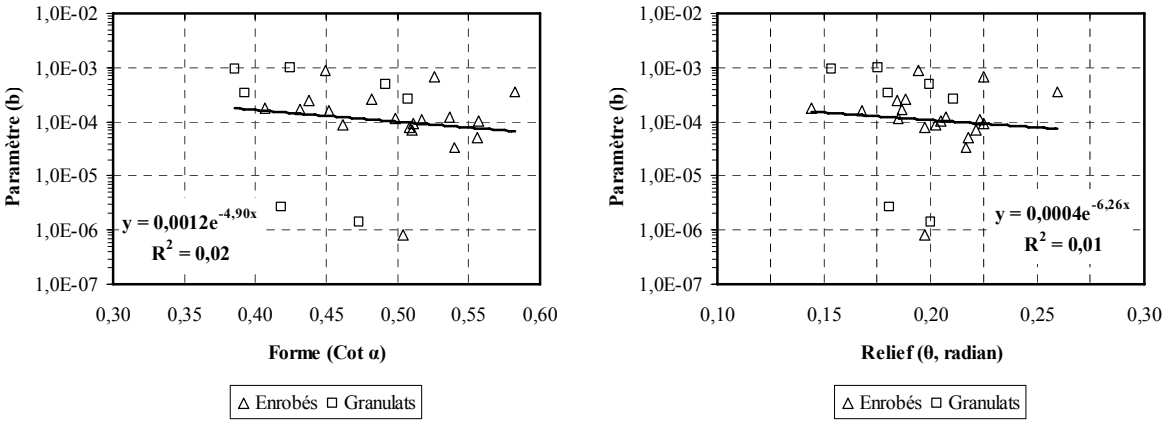



*Figure VIII.85 : Relations entre le paramètre (b) et la forme et le relief*

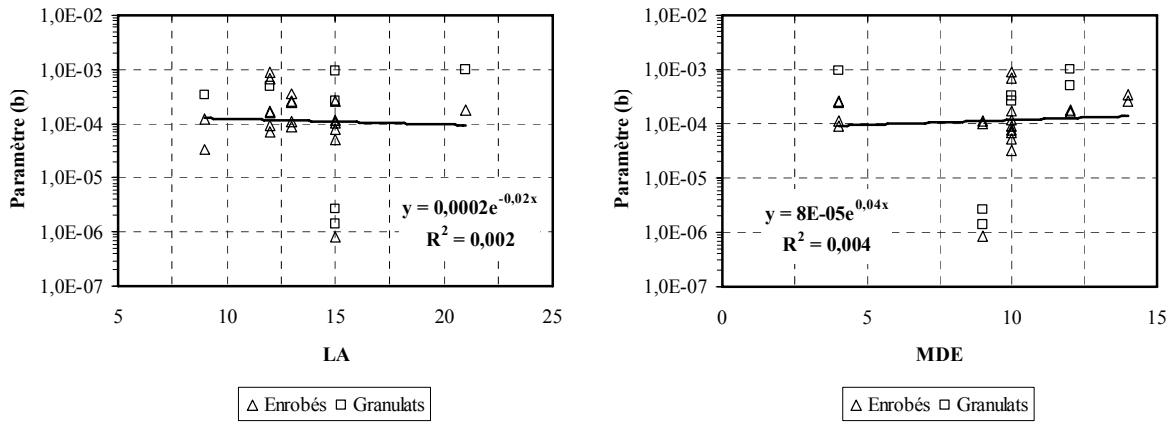



*Figure VIII.86 : Relations entre le paramètre (b) et les valeurs de LA et de MDE*

Étude de la valeur de l'intersection (d)

Le paramètre (d) est l'intersection de cette droite et de l'axe des ordonnées. Nous constatons une superposition de cette valeur pour des carottes d'enrobés et des galettes de granulats (cf. Figure VIII.87).

Une relation linéaire est observée entre le paramètre (d) et le PSV (cf. Figure VIII.87). Cette tendance est évidemment à confirmer, car elle est « aidée » par la présence d'un point extrême correspondant au granulat calcaire. Cette relation est logique car le frottement pour des granulats polis (par exemple : après 90 000 rotations de polissage) est lié au PSV (cf. Figure IV.5, page 100).

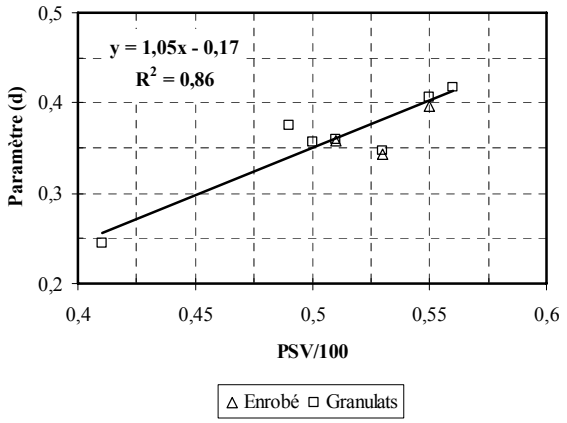



*Figure VIII.87 : Relation entre le paramètre (d) et PSV dans le cas des granulats*

La Figure VIII.88 montre que la relation entre le paramètre (d) et la valeur PSV est acceptable pour le cas des granulats et des enrobés. Cette relation peut être exprimée par :

$$(d) = 1{,}23\frac{PSV}{100} - 0{,}25 \qquad \text{(VIII.8)}$$

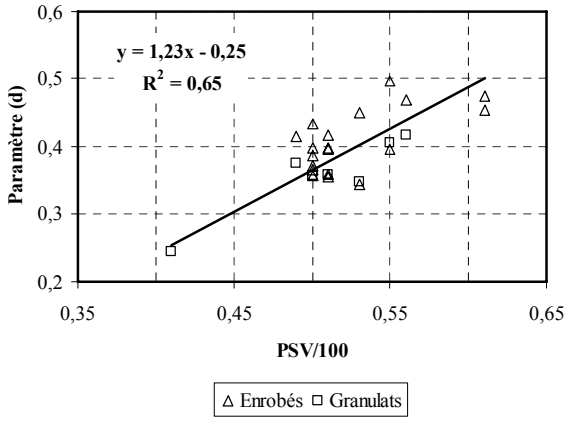



*Figure VIII.88 : Relation entre le paramètre (d) et PSV*

La variation du paramètre (d) en fonction de la microrugosité est montrée sur la courbe de la Figure VIII.89. Une relation linéaire pour le cas des granulats est proposée. Plus le paramètre θ augmente, plus le paramètre (d) croît. En fait, la plus grande valeur du paramètre θ correspond à la surface plus rugueuse. Cette dernière apporte un coefficient de frottement plus élevé ; le paramètre (d) augmente donc.

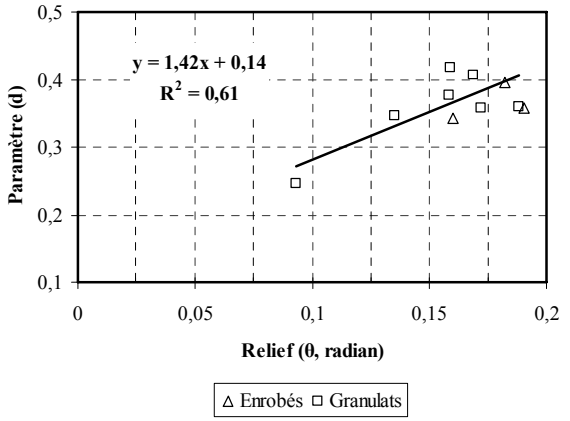



*Figure VIII.89 : Relation entre le paramètre (d) et le relief θ à 180 000 rotations pour le cas des granulats*

Par contre, aucune relation linéaire ne semble exister entre le paramètre (d) et la taille des grains $SP_m$ (cf. Figure VIII.90), ou entre le paramètre (d) et les paramètres d'indenteur θ et Cot α (cf. Figure VIII.91), ou entre le paramètre (d) et les paramètres mécaniques des matériaux LA et MDE (cf. Figure VIII.91).

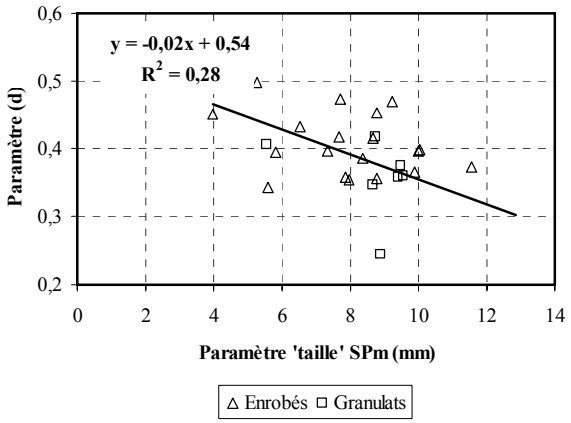



*Figure VIII.90 : Relation entre le paramètre (d) et la taille des grains $SP_m$*

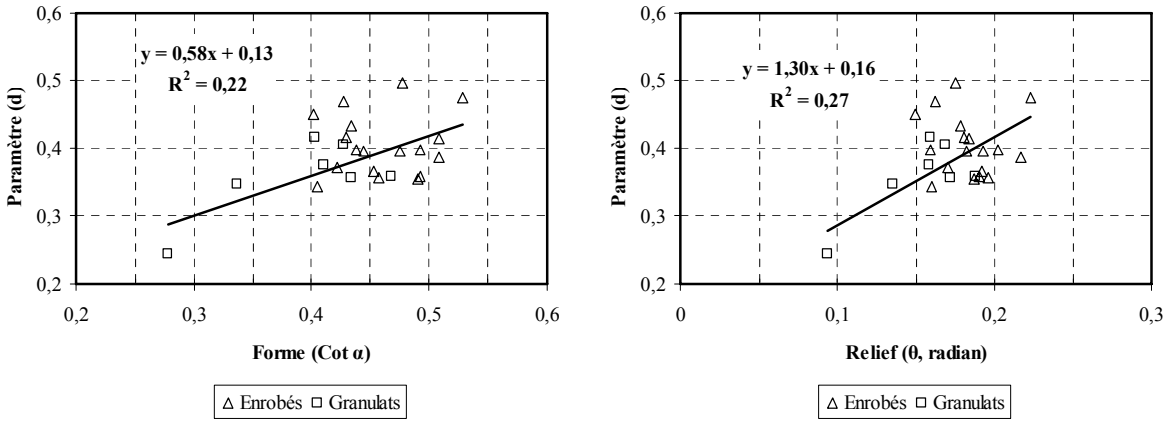



*Figure VIII.91 : Relations entre le paramètre (d) et la forme (et le relief) à 180 000 rotations*

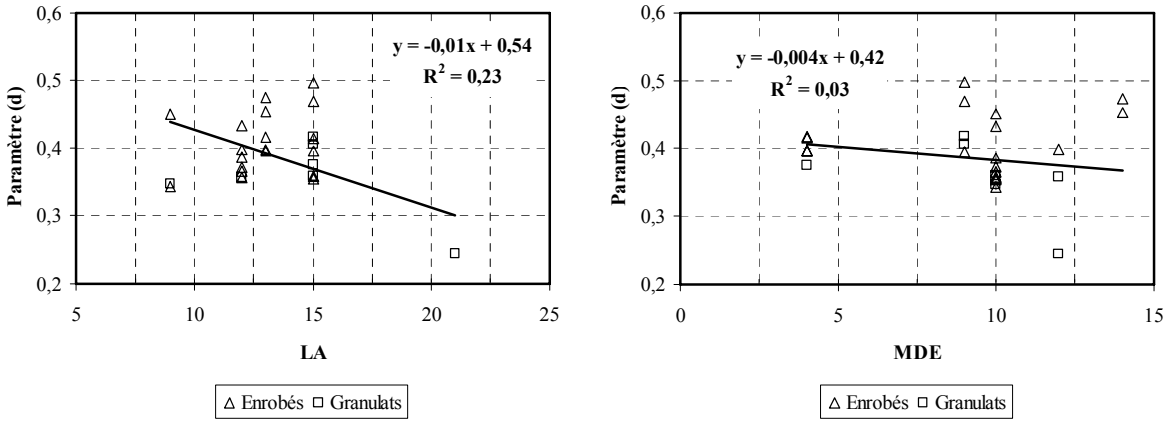



*Figure VIII.92 : Relations entre le paramètre (d) et les valeurs de LA et de MDE*

En résumé, une relation linéaire est établie entre le coefficient de frottement initial (a + d) de la formule et la macrotexture (exprimée par la taille moyenne des grains, relevée par

cartographie des surfaces). Plus la macrorugosité est grande, plus le coefficient de frottement est faible. Dans un deuxième temps, la pente initiale (- ab - c) est reliée au PSV. Quand le PSV augmente, la valeur absolue de cette pente diminue.

D'autres caractéristiques relatives aux matériaux (MDE, LA) ont aussi fait l'objet de recherche de corrélation avec les paramètres de la formule. Aucune relation linéaire intéressante n'a été obtenue.

# Annexe J – Validation de la relation CFL80/$\mu_{ws}$

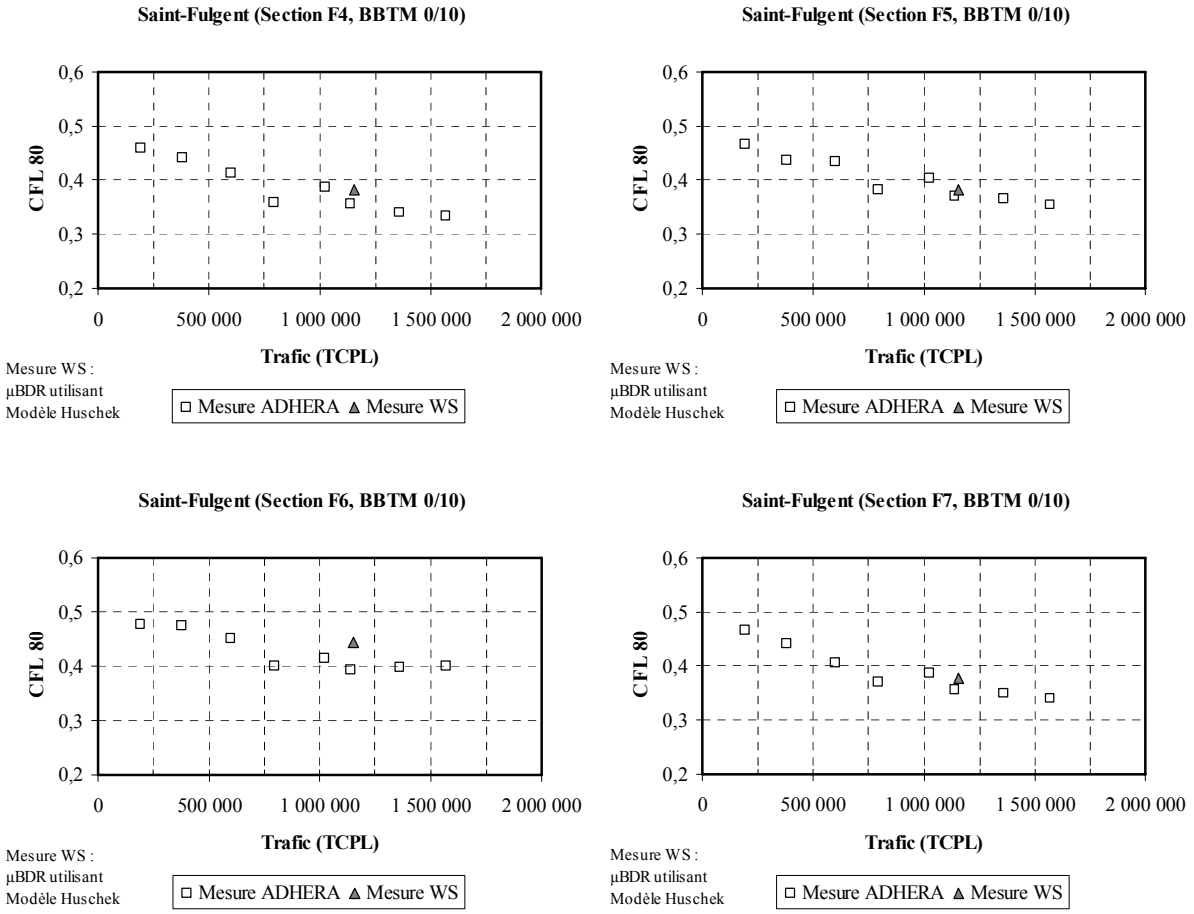



*Figure VIII.93 : Validation de la relation CFL80/$\mu_{ws}$, site de Saint-Fulgent*

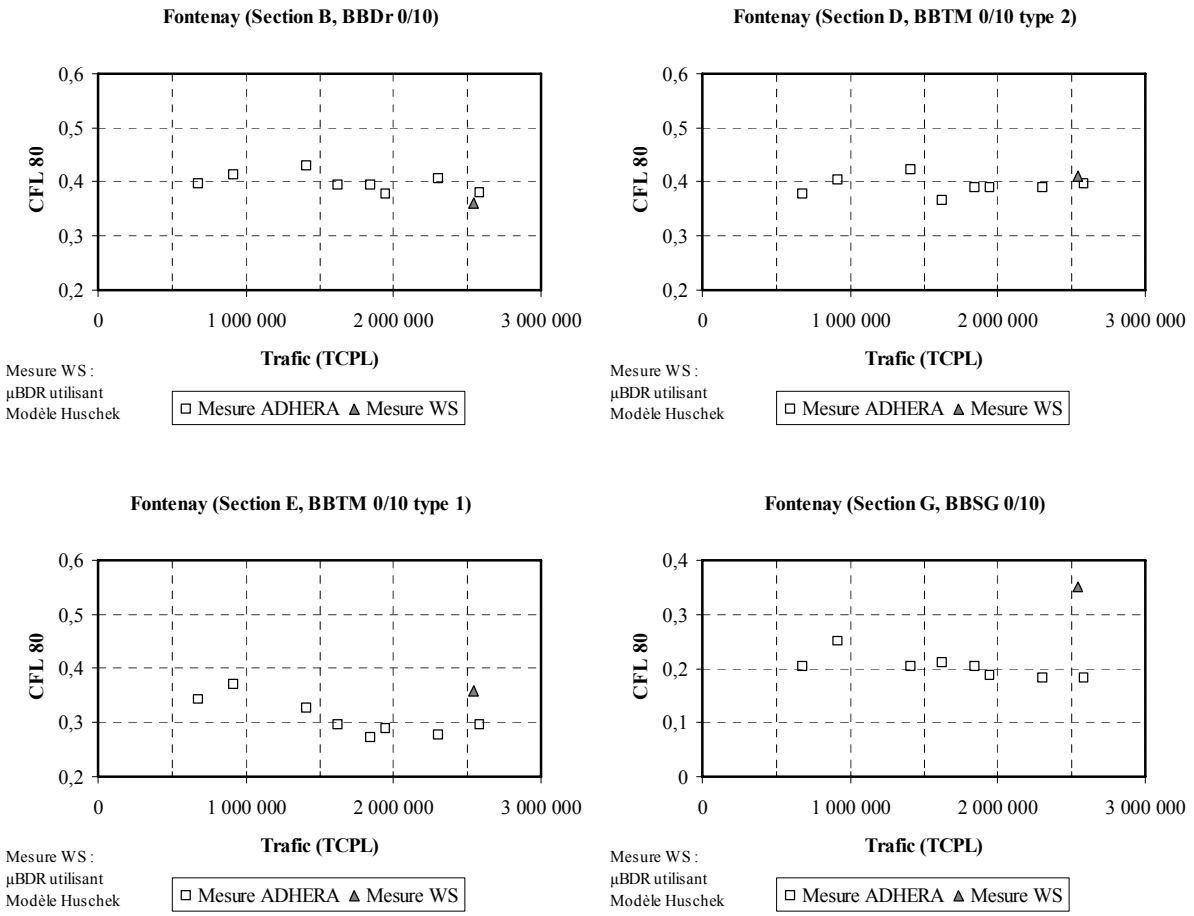



*Figure VIII.94 : Validation de la relation CFL80/$\mu_{ws}$, site de Fontenay*

# Annexe K – Coefficients de frottement mesurés et ajustés

k variable

| Trafic | $\mu_i^m$(BDR, TCPL) | $\mu_i^c$(BDR, TCPL) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,34 | 0,34 | 0 |
| 213840 | 0,41 | 0,40 | 1,00E-04 |
| 356400 | 0,42 | 0,40 | 4,00E-04 |
| 475200 | 0,39 | 0,39 | 0 |
| 617760 | 0,41 | 0,39 | 4,00E-04 |
| 760320 | 0,36 | 0,38 | 4,00E-04 |

*Tableau VIII.25 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site d'Angers, N=0,019×TCPL*

| Trafic | $\mu_i^m$(BDR, TCPL) | $\mu_i^c$(BDR, TCPL) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,28 | 0,27 | 1,00E-04 |
| 84240 | 0,42 | 0,42 | 0 |
| 140400 | 0,41 | 0,43 | 4,00E-04 |
| 187200 | 0,41 | 0,43 | 4,00E-04 |
| 243360 | 0,44 | 0,42 | 4,00E-04 |
| 299520 | 0,43 | 0,42 | 1,00E-04 |

*Tableau VIII.26 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Clisson, N=0,018×TCPL*

| Trafic | $\mu_i^m$(BDR, TCPL) | $\mu_i^c$(BDR, TCPL) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,24 | 0,21 | 9,00E-04 |
| 54360 | 0,47 | 0,51 | 1,60E-03 |
| 108720 | 0,46 | 0,50 | 1,60E-03 |
| 163080 | 0,51 | 0,48 | 9,00E-04 |
| 217440 | 0,48 | 0,47 | 1,00E-04 |

*Tableau VIII.27 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Coëx, N=0,493×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 190 000 | 0,46 | 0,40 | 3,60E-03 |
| 380 000 | 0,44 | 0,39 | 2,50E-03 |
| 600 000 | 0,41 | 0,39 | 4,00E-04 |
| 795 000 | 0,36 | 0,38 | 4,00E-04 |
| 1 025 000 | 0,39 | 0,38 | 1,00E-04 |
| 1 140 000 | 0,36 | 0,38 | 4,00E-04 |
| 1 362 000 | 0,34 | 0,37 | 9,00E-04 |
| 1 570 000 | 0,33 | 0,37 | 1,60E-03 |

*Tableau VIII.28 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F4, N=0,105×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 190 000 | 0,47 | 0,42 | 2,50E-03 |
| 380 000 | 0,44 | 0,41 | 9,00E-04 |
| 600 000 | 0,43 | 0,41 | 4,00E-04 |
| 795 000 | 0,38 | 0,40 | 4,00E-04 |
| 1 025 000 | 0,40 | 0,40 | 0 |
| 1 140 000 | 0,37 | 0,40 | 9,00E-04 |
| 1 362 000 | 0,37 | 0,39 | 4,00E-04 |
| 1 570 000 | 0,35 | 0,39 | 1,60E-03 |

*Tableau VIII.29 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F5, N=0,145×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 190 000 | 0,48 | 0,47 | 1,00E-04 |
| 380 000 | 0,47 | 0,47 | 0 |
| 600 000 | 0,45 | 0,46 | 1,00E-04 |
| 795 000 | 0,40 | 0,45 | 2,50E-03 |
| 1 025 000 | 0,41 | 0,44 | 9,00E-04 |
| 1 140 000 | 0,39 | 0,44 | 2,50E-03 |
| 1 362 000 | 0,40 | 0,43 | 9,00E-04 |
| 1 570 000 | 0,40 | 0,42 | 4,00E-04 |

*Tableau VIII.30 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F6, N=0,199×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 190 000 | 0,47 | 0,42 | 2,50E-03 |
| 380 000 | 0,44 | 0,40 | 1,60E-03 |
| 600 000 | 0,41 | 0,40 | 1,00E-04 |
| 795 000 | 0,37 | 0,39 | 4,00E-04 |
| 1 025 000 | 0,39 | 0,39 | 0 |
| 1 140 000 | 0,36 | 0,39 | 9,00E-04 |
| 1 362 000 | 0,35 | 0,39 | 1,60E-03 |
| 1 570 000 | 0,34 | 0,39 | 2,50E-03 |

*Tableau VIII.31 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F7, N=0,122×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 190 000 | 0,47 | 0,49 | 4,00E-04 |
| 380 000 | 0,47 | 0,48 | 1,00E-04 |
| 600 000 | 0,47 | 0,48 | 1,00E-04 |
| 795 000 | 0,43 | 0,47 | 1,60E-03 |
| 1 025 000 | 0,43 | 0,47 | 1,60E-03 |
| 1 140 000 | 0,41 | 0,47 | 3,60E-03 |
| 1 362 000 | 0,42 | 0,47 | 2,50E-03 |
| 1 570 000 | 0,41 | 0,46 | 2,50E-03 |

*Tableau VIII.32 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F8, N=0,175×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 680 000 | 0,40 | 0,38 | 4,00E-04 |
| 920 000 | 0,41 | 0,38 | 9,00E-04 |
| 1 410 000 | 0,43 | 0,37 | 3,60E-03 |
| 1 620 000 | 0,39 | 0,37 | 4,00E-04 |
| 1 840 000 | 0,39 | 0,37 | 4,00E-04 |
| 1 950 000 | 0,38 | 0,36 | 4,00E-04 |
| 2 300 000 | 0,41 | 0,36 | 2,50E-03 |
| 2 580 000 | 0,38 | 0,36 | 4,00E-04 |

*Tableau VIII.33 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section B, BBDr0/10, N=0,001×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 680 000 | 0,38 | 0,43 | 2,50E-03 |
| 920 000 | 0,40 | 0,43 | 9,00E-04 |
| 1 410 000 | 0,42 | 0,42 | 0 |
| 1 620 000 | 0,37 | 0,42 | 2,50E-03 |
| 1 840 000 | 0,39 | 0,42 | 9,00E-04 |
| 1 950 000 | 0,39 | 0,42 | 9,00E-04 |
| 2 300 000 | 0,39 | 0,41 | 4,00E-04 |
| 2 580 000 | 0,40 | 0,41 | 1,00E-04 |

*Tableau VIII.34 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section D, BBTM0/10 type2, N=0,001×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 680 000 | 0,34 | 0,41 | 4,90E-03 |
| 920 000 | 0,37 | 0,40 | 9,00E-04 |
| 1 410 000 | 0,33 | 0,38 | 2,50E-03 |
| 1 620 000 | 0,30 | 0,37 | 4,90E-03 |
| 1 840 000 | 0,27 | 0,37 | 1,00E-02 |
| 1 950 000 | 0,29 | 0,37 | 6,40E-03 |
| 2 300 000 | 0,28 | 0,36 | 6,40E-03 |
| 2 580 000 | 0,30 | 0,36 | 3,60E-03 |

*Tableau VIII.35 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section E, BBTM0/10 type1, N=0,017×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 680 000 | 0,37 | 0,42 | 2,50E-03 |
| 920 000 | 0,40 | 0,41 | 1,00E-04 |
| 1 410 000 | 0,37 | 0,39 | 4,00E-04 |
| 1 620 000 | 0,33 | 0,39 | 3,60E-03 |
| 1 840 000 | 0,36 | 0,39 | 9,00E-04 |
| 1 950 000 | 0,36 | 0,39 | 9,00E-04 |
| 2 300 000 | 0,35 | 0,38 | 9,00E-04 |
| 2 580 000 | 0,36 | 0,38 | 4,00E-04 |

*Tableau VIII.36 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section F, BBTM0/10 continu, N=0,013×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 680 000 | 0,20 | 0,41 | 4,41E-02 |
| 920 000 | 0,25 | 0,41 | 2,56E-02 |
| 1 410 000 | 0,20 | 0,39 | 3,61E-02 |
| 1 620 000 | 0,21 | 0,38 | 2,89E-02 |
| 1 840 000 | 0,20 | 0,37 | 2,89E-02 |
| 1 950 000 | 0,19 | 0,37 | 3,24E-02 |
| 2 300 000 | 0,18 | 0,36 | 3,24E-02 |
| 2 580 000 | 0,18 | 0,35 | 2,89E-02 |

*Tableau VIII.37 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section G, BBSG0/10, N=0,047×TCPL*

k constant

| Trafic | $\mu_i^m$(BDR, TCPL) | $\mu_i^c$(BDR, TCPL) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,34 | 0,34 | 0 |
| 213840 | 0,41 | 0,4 | 1,00E-04 |
| 356400 | 0,42 | 0,39 | 9,00E-04 |
| 475200 | 0,39 | 0,39 | 0 |
| 617760 | 0,41 | 0,38 | 9,00E-04 |
| 760320 | 0,36 | 0,37 | 1,00E-04 |

*Tableau VIII.38 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site d'Angers, N=0,024×TCPL*

| Trafic | $\mu_i^m$(BDR, TCPL) | $\mu_i^c$(BDR, TCPL) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,28 | 0,27 | 1,00E-04 |
| 84240 | 0,42 | 0,42 | 0 |
| 140400 | 0,41 | 0,42 | 1,00E-04 |
| 187200 | 0,41 | 0,42 | 1,00E-04 |
| 243360 | 0,44 | 0,42 | 4,00E-04 |
| 299520 | 0,43 | 0,41 | 4,00E-04 |

*Tableau VIII.39 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Clisson, N=0,024×TCPL*

| Trafic | $\mu_i^m$(BDR, TCPL) | $\mu_i^c$(BDR, TCPL) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,24 | 0,21 | 9,00E-04 |
| 54360 | 0,47 | 0,41 | 3,60E-03 |
| 108720 | 0,46 | 0,48 | 4,00E-04 |
| 163080 | 0,51 | 0,50 | 1,00E-04 |
| 217440 | 0,48 | 0,52 | 1,60E-03 |

*Tableau VIII.40 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Coëx, N=0,024×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^c$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 190 000 | 0,46 | 0,44 | 4,00E-04 |
| 380 000 | 0,44 | 0,43 | 1,00E-04 |
| 600 000 | 0,41 | 0,41 | 0 |
| 795 000 | 0,36 | 0,41 | 2,50E-03 |
| 1 025 000 | 0,39 | 0,40 | 1,00E-04 |
| 1 140 000 | 0,36 | 0,40 | 1,60E-03 |
| 1 362 000 | 0,34 | 0,40 | 3,60E-03 |
| 1 570 000 | 0,33 | 0,40 | 4,90E-03 |

*Tableau VIII.41 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F4, N=0,024×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 190 000 | 0,47 | 0,45 | 4,00E-04 |
| 380 000 | 0,44 | 0,43 | 1,00E-04 |
| 600 000 | 0,43 | 0,42 | 1,00E-04 |
| 795 000 | 0,38 | 0,42 | 1,60E-03 |
| 1 025 000 | 0,40 | 0,41 | 1,00E-04 |
| 1 140 000 | 0,37 | 0,41 | 1,60E-03 |
| 1 362 000 | 0,37 | 0,41 | 1,60E-03 |
| 1 570 000 | 0,35 | 0,41 | 3,60E-03 |

*Tableau VIII.42 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F5, N=0,024×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 190 000 | 0,48 | 0,48 | 0 |
| 380 000 | 0,47 | 0,48 | 1,00E-04 |
| 600 000 | 0,45 | 0,48 | 9,00E-04 |
| 795 000 | 0,40 | 0,48 | 6,40E-03 |
| 1 025 000 | 0,41 | 0,47 | 3,60E-03 |
| 1 140 000 | 0,39 | 0,47 | 6,40E-03 |
| 1 362 000 | 0,40 | 0,47 | 4,90E-03 |
| 1 570 000 | 0,40 | 0,47 | 4,90E-03 |

*Tableau VIII.43 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F6, N=0,024×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 190 000 | 0,47 | 0,45 | 4,00E-04 |
| 380 000 | 0,44 | 0,43 | 1,00E-04 |
| 600 000 | 0,41 | 0,41 | 0 |
| 795 000 | 0,37 | 0,41 | 1,60E-03 |
| 1 025 000 | 0,39 | 0,40 | 1,00E-04 |
| 1 140 000 | 0,36 | 0,40 | 1,60E-03 |
| 1 362 000 | 0,35 | 0,40 | 2,50E-03 |
| 1 570 000 | 0,34 | 0,39 | 2,50E-03 |

*Tableau VIII.44 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F7, N=0,024×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 190 000 | 0,47 | 0,47 | 0 |
| 380 000 | 0,47 | 0,46 | 1,00E-04 |
| 600 000 | 0,47 | 0,46 | 1,00E-04 |
| 795 000 | 0,43 | 0,46 | 9,00E-04 |
| 1 025 000 | 0,43 | 0,46 | 9,00E-04 |
| 1 140 000 | 0,41 | 0,46 | 2,50E-03 |
| 1 362 000 | 0,42 | 0,46 | 1,60E-03 |
| 1 570 000 | 0,41 | 0,46 | 2,50E-03 |

*Tableau VIII.45 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Saint-Fulgent, section F8, N=0,024×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 680 000 | 0,40 | 0,35 | 2,50E-03 |
| 920 000 | 0,41 | 0,35 | 3,60E-03 |
| 1 410 000 | 0,43 | 0,34 | 8,10E-03 |
| 1 620 000 | 0,39 | 0,34 | 2,50E-03 |
| 1 840 000 | 0,39 | 0,34 | 2,50E-03 |
| 1 950 000 | 0,38 | 0,34 | 1,60E-03 |
| 2 300 000 | 0,41 | 0,33 | 6,40E-03 |
| 2 580 000 | 0,38 | 0,33 | 2,50E-03 |

*Tableau VIII.46 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section B, BBDr0/10, N=0,024×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 680 000 | 0,38 | 0,37 | 1,00E-04 |
| 920 000 | 0,40 | 0,37 | 9,00E-04 |
| 1 410 000 | 0,42 | 0,36 | 3,60E-03 |
| 1 620 000 | 0,37 | 0,36 | 1,00E-04 |
| 1 840 000 | 0,39 | 0,36 | 9,00E-04 |
| 1 950 000 | 0,39 | 0,36 | 9,00E-04 |
| 2 300 000 | 0,39 | 0,35 | 1,60E-03 |
| 2 580 000 | 0,40 | 0,35 | 2,50E-03 |

*Tableau VIII.47 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section D, BBTM0/10 type2, N=0,024×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 680 000 | 0,34 | 0,39 | 2,50E-03 |
| 920 000 | 0,37 | 0,38 | 1,00E-04 |
| 1 410 000 | 0,33 | 0,37 | 1,60E-03 |
| 1 620 000 | 0,30 | 0,36 | 3,60E-03 |
| 1 840 000 | 0,27 | 0,36 | 8,10E-03 |
| 1 950 000 | 0,29 | 0,36 | 4,90E-03 |
| 2 300 000 | 0,28 | 0,36 | 6,40E-03 |
| 2 580 000 | 0,30 | 0,35 | 2,50E-03 |

*Tableau VIII.48 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section E, BBTM0/10 type1, N=0,024×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 680 000 | 0,37 | 0,40 | 9,00E-04 |
| 920 000 | 0,40 | 0,39 | 1,00E-04 |
| 1 410 000 | 0,37 | 0,38 | 1,00E-04 |
| 1 620 000 | 0,33 | 0,38 | 2,50E-03 |
| 1 840 000 | 0,36 | 0,37 | 1,00E-04 |
| 1 950 000 | 0,36 | 0,37 | 1,00E-04 |
| 2 300 000 | 0,35 | 0,37 | 4,00E-04 |
| 2 580 000 | 0,36 | 0,36 | 0 |

*Tableau VIII.49 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section F, BBTM0/10 continu, N=0,024×TCPL*

| Trafic | $CFL_i^{ip}$(TCPL, 80) | $CFL_i^{c}$(TCPL, 80) | $S_i^2$ |
|---|---|---|---|
| 680 000 | 0,20 | 0,42 | 4,84E-02 |
| 920 000 | 0,25 | 0,42 | 2,89E-02 |
| 1 410 000 | 0,20 | 0,41 | 4,41E-02 |
| 1 620 000 | 0,21 | 0,41 | 4,00E-02 |
| 1 840 000 | 0,20 | 0,40 | 4,00E-02 |
| 1 950 000 | 0,19 | 0,40 | 4,41E-02 |
| 2 300 000 | 0,18 | 0,40 | 4,84E-02 |
| 2 580 000 | 0,18 | 0,39 | 4,41E-02 |

*Tableau VIII.50 : Coefficients de frottement mesurés et ajustés du site de Fontenay, section G, BBSG0/10, N=0,024×TCPL*