



Adhérence des chaussées : de l'étude cognitive aux applications

Minh Tan Do

► To cite this version:

Minh Tan Do. Adhérence des chaussées : de l'étude cognitive aux applications. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Bordeaux I, 2010. tel-00851220

HAL Id: tel-00851220

<https://theses.hal.science/tel-00851220>

Submitted on 18 Sep 2013

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

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

Université de Bordeaux 1

**ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE
L'INGENIEUR**

**MEMOIRE D'HABILITATION
A DIRIGER DES RECHERCHES**

**ADHERENCE DES CHAUSSEES :
DE L'ETUDE COGNITIVE AUX APPLICATIONS**

Minh-Tan Do

JURY

M. H. Zahouani, Professeur, Ecole Centrale de Lyon	Rapporteur
M. J. Denape, Professeur, Ecole Nationale d'Ingénieur de Tarbes	Rapporteur
M. D. Breysse, Professeur, Université de Bordeaux 1	Rapporteur
Mme S. Yotte, Professeur, Université de Bordeaux 1	Examineur
Mme A. Jullien, Directeur de recherche, LCPC Nantes	Examineur
M. H. Di Benedetto, Professeur, ENTPE	Examineur

TABLE DES MATIERES

1	CURRICULUM VITAE	4
1.1	Diplômes et titres universitaires	4
1.2	Cursus professionnel	4
2	RECHERCHES DANS LE DOMAINE DES BETONS.....	8
2.1	Cadre de mes recherches	8
2.2	Fatigue des bétons à hautes performances.....	8
2.2.1	Résultats sur des éprouvettes de laboratoire	8
2.2.2	Résultats sur des poteaux armés	11
2.2.3	Analyse des durées de vie.....	13
2.3	Leçons tirées de cette période d'initiation à la recherche.....	15
2.3.1	Une sensibilisation à la complémentarité théorie/expérimentations	16
2.3.2	Un aperçu des méthodes d'encadrement de la recherche.....	16
2.3.3	La question du produit attendu	16
3	RECHERCHES DANS LE DOMAINE DE L'ADHERENCE.....	17
3.1	Généralités sur l'adhérence	17
3.1.1	Définition de l'adhérence	17
3.1.2	Influence de la texture des revêtements de chaussée sur l'adhérence	18
3.2	Comment présenter mes recherches dans le domaine de l'adhérence ?.....	20
3.3	Modèles reliant la texture à l'adhérence.....	21
3.3.1	Recherche d'un schéma physique.....	21
3.3.2	Que manquait-il aux modèles texture/adhérence ?	22
3.4	Microtexture	22
3.4.1	Mesure de la microtexture	23
3.4.2	Caractérisation de la microtexture	29
3.4.3	Modèles reliant la microtexture à l'adhérence à basse vitesse.....	35
3.4.4	Echelles influentes.....	45
3.4.5	Faut-il aller plus loin dans l'étude de la microtexture ?.....	48
3.5	Evolution de l'adhérence.....	49
3.5.1	Généralités.....	49
3.5.2	Un essai de laboratoire pour évaluer la résistance au polissage des bétons bitumineux	50
3.5.3	Modélisation.....	58
3.5.4	Evolution de la microtexture	64
3.5.5	Leçons tirées de ce bilan positif	65
3.5.6	Questions restées en suspens	66
3.6	Harmonisation des mesures d'adhérence.....	67
3.6.1	Problématique.....	67
3.6.2	Analyse des modèles adhérence/vitesse existants.....	68
3.6.3	Courbe de Stribeck	69
3.6.4	Un modèle simple basé sur la courbe de Stribeck	70
3.6.5	Un bilan mitigé lié à une économie inutile de théories	72
3.7	Information aux conducteurs de l'état d'adhérence des surfaces de chaussée.....	73
3.7.1	Problématique.....	73
3.7.2	Calcul d'une vitesse de passage en fonction de l'adhérence disponible	73
3.7.3	Bénéfices d'un projet appliqué.....	78
4	BILAN ET PERSPECTIVES	79
4.1	Bilan des connaissances	79
4.1.1	La logique des travaux menés.....	79
4.1.2	Constat sur la relation texture/adhérence	79
4.1.3	Constat sur la microtexture	80
4.1.4	Constat sur la prise en compte d'autres paramètres influents	80
4.1.5	Constat sur la prise en compte de l'évolution de l'adhérence dans le temps	81
4.2	Une méthodologie de conduite des recherches qui se met en place	81
4.3	Des idées pour continuer	82
5	ENCADREMENT DE THESES	86

5.1	Thèse de Yannick Beautru	87
5.2	Thèse de Dan Zhao.....	88
5.3	Thèse de Romarick Rotimbo	89
5.4	Thèse de Zhen-Zhong Tang.....	90
5.5	Thèse de Pierrick Legrand.....	91
6	AUTRES ENCADREMENTS	92
6.1	Projets de fin d'études	92
6.2	Chercheurs étrangers	92
6.3	Participations à des jurys.....	92
6.3.1	Jurys de thèses	92
6.3.2	Autres	93
7	CONTRATS DE RECHERCHE	93
7.1	Projets européens PCRD	93
7.1.1	Projet SKIDSAFE (2009-2012, <i>projet en cours</i>)	93
7.1.2	Projet TYROSAFE (2008-2010, <i>projet en cours</i>).....	93
7.1.3	Projet INTRO (2005-2008, <i>projet terminé</i>)	93
7.1.4	Projet TROWS (2000-2003, <i>projet terminé</i>).....	94
7.2	Autres types de projets européens.....	94
7.2.1	Action COST TU 0702 "Real-time monitoring, surveillance and control of road networks under adverse weather conditions" (2008-2012, <i>projet en cours</i>).....	94
7.2.2	Coopération franco-allemande dans le domaine de l'adhérence des chaussées (2002-2005, <i>projet terminé</i>) 94	
7.2.3	Projet HERMES(200-2004, <i>projet terminé</i>).....	95
7.3	Projets nationaux.....	95
7.3.1	Projet DIVAS (2007-2010, <i>projet en cours</i>)	95
7.3.2	Projet IRCAD (2004-2009, <i>projet terminé</i>)	95
8	ACTIVITES COLLECTIVES	96
8.1	Gestion de l'équipe Infrastructure et Sécurité Routière.....	96
8.2	Gestion du Laboratoire Texture/Adhérence	96
8.3	Actions de valorisation.....	97
9	ACCREDITATION, QUALIFICATION DE MATERIELS	98
10	LISTE DES PUBLICATIONS	98
10.1	Articles dans des revues internationales avec comité de lecture (ordre chronologique inverse)	98
10.2	Articles dans des revues nationales avec comité de lecture (ordre chronologique inverse)	99
10.3	Communications aux congrès (ordre chronologique inverse)	100
10.4	Relecture d'articles, activité éditoriales	102
10.5	Articles dans diverses revues technico-professionnelles	102
10.6	Autres communications (sans actes, sur invitation par exemple)	102
10.7	Livres	102
10.8	Rapports de recherche	103
10.9	Documents réglementaires	104
11	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	104
12	ACRONYMES	106

1 CURRICULUM VITAE

Nom : DO
Prénom : Minh-Tan
Date de naissance : 18/04/1964
Nationalité : Française

LCPC Centre de Nantes
Division Entretien, Sécurité et Acoustique des Routes
Route de Bouaye – BP 4129
44341 Bouguenais Cedex
Téléphone : 02 40 84 57 95
Télécopie : 02 40 84 59 92
E-Mail : minh-tan.do@lcpc.fr

1.1 Diplômes et titres universitaires

- Juin 1994 : Doctorat 3^{ème} cycle (Ph.D.) (Université de Sherbrooke, Faculté des Sciences Appliquées, Canada), « Fatigue des Bétons à Hautes Performances ».
- Octobre 1989 : Maîtrise en Sciences Appliquées (Université de Sherbrooke, Faculté des Sciences Appliquées, Canada), « Délaminage par Fatigue de l'Interface Chape Mince – Dalle de Chaussée »
- Juin 1988 : Ingénieur des Travaux Publics de l'Etat.

1.2 Cursus professionnel

- 2004 : Chef de la Section « Infrastructure et Sécurité Routière » de la Division « Entretien, Sécurité et Acoustique des Routes » du LCPC.
- 1992-2004 : Chercheur au sein de la Section « Surface de Chaussée et Dynamique des Véhicules » de la Division Entretien, Sécurité et Acoustique des Routes du LCPC.
- 1990-1992 : Chercheur au sein du groupe « Béton » de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Sherbrooke (Canada).
- 1988-1990 : Coopérant au sein du groupe « Béton » de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Sherbrooke (Canada).

De 1988 à 1992, j'ai été rattaché au groupe de recherche « Béton » de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Sherbrooke (Canada). Dirigé par le Professeur Pierre-Claude Aïtcin, ce groupe faisait aussi partie du Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) avec l'Université Laval (Québec), l'École polytechnique de Montréal et l'Université McGill (Montréal). Au niveau national, ce groupe faisait partie de la Chaire industrielle du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CSRNG) sur le béton, que le professeur Aïtcin pilotait de 1989 à 1998, regroupant diverses petites et moyennes

entreprises (PME), plusieurs bureaux d'ingénieurs-conseils, des multinationales du ciment, la Ville de Montréal et le ministère des Transports du Québec.

Depuis 1992, j'ai été affecté – en tant que chercheur puis en tant que responsable depuis 2004 – à l'équipe (« section » dans le schéma d'organisation du LCPC) « Infrastructure et Sécurité Routière » (ISR) de l'unité de recherche (« division » dans le schéma d'organisation du LCPC) « Entretien, Sécurité et Acoustique des Routes » (ESAR) du LCPC. La vocation de la division ESAR est d'assister les gestionnaires de réseaux routiers dans leur rôle de définition et de mise en œuvre des politiques d'entretien et d'exploitation. Les recherches de la division visent à améliorer la mobilité des usagers de la route tout en garantissant leur sécurité et leur confort, et veillant au respect de l'environnement. Les activités de la section ISR sont majoritairement orientées vers l'aspect de sécurité de la route.

J'ai donc travaillé dans deux domaines distincts : la fatigue des structures de béton et l'adhérence des chaussées. Mes activités de recherche sont présentées succinctement dans le tableau 1 et la Figure 1.

Tableau 1. Curriculum vitae succinct

Diplômes	Recherches	Valorisations	Encadrements
- Doctorat (6/1994) - Maîtrise en Sciences Appliquées (10/1989) - Ingénieur des Travaux Publics de l'Etat (6/1988)	<u>Mots clés</u> Adhérence, texture, polissage, contact, météorologie, mouillage, béton, fatigue, modèle, risque, prévision. <u>Publications</u> - Revues internationales à comité de lecture (14) - Revues nationales à comité de lecture (6) - Communications à des congrès (32) - Revues technico-professionnelles (3) - Livres (2) - Rapports de recherche (24) - Documents réglementaires (2)	<u>Projets internationaux</u> - TROWS, HERMES, INTRO, TYROSAFE, COST TU0702, SKIDSAFE <u>Coopérations internationales</u> - Coopération Californie-France - Coopération franco-allemande <u>Projets nationaux</u> - SARI/IRCAD, DIVAS, CLEAN <u>Contrats avec les administrations</u> - Direction des routes - SETRA <u>Collaborations industrielles</u> - Michelin, Renault, PSA, Lafarge, Siemens	<u>Chercheurs</u> - Thèses (5) dont deux soutenues - Projets de fin d'études (7) - Chercheurs étrangers (2) <u>Equipes de recherche françaises</u> - Responsable de l'équipe « Infrastructure et sécurité routière » (depuis 2004) - Responsable du laboratoire « Texture et adhérence » (depuis 2000) - Coordinateur et responsable de sujet du projet de recherche LCPC (Thème) « Contribution de Diverses Echelles de Texture Routière à l'Adhérence des Chaussées » (1996-1999). - Responsable de sujet du projet de recherche LCPC (Opération) « Adhérence » (2000-2004). - Responsable de sujet du projet de recherche LCPC (Opération) « Adhérence et Contrôlabilité » (2005-2009). - Coordinateur et responsable de sujet du projet PREDIT SARI/IRCAD « Informer du Risque de Perte de Contrôle en Conditions Atmosphériques Dégradées » (2005-2008). - Responsable de sujet du projet ANR DIVAS « Dialogue Infrastructure/Véhicule pour Améliorer la Sécurité » (2007-2010). <u>Equipes de recherche internationales</u> - Responsable de sujet du projet européen INTRO

		<u>Collaborations universitaires</u> - Berkeley (Etats-Unis) - Delft (Pays-Bas) - Poitiers - Ecoles Centrales de Nantes, Lyon - Catane (Italie)	(Intelligent Roads) (2005-2008). - Responsable de sujet du projet européen TYROSAFE (Tyre and Road Optimisation for Skid Resistance and Further Effects) (2008-2010). - Responsable de sujet du projet européen COST TU0702 « Real-time monitoring, surveillance and control of road networks under adverse weather conditions » (2008-2012).
--	--	--	---

Champ d'investigation					
	Microtexture	Adhérence et facteurs influents (vitesse, texture, mouillage, etc.)	Evolution de l'adhérence	Harmonisation des mesures d'adhérence	Surveillance et information en conditions atmosphériques dégradées
1993					
1994	Thème CH12				
1995					
1996					
1997					
1998					
1999	↓				
2000		Projet HERMES	Projet TROWS		
2001	Thèse P. Legrand	↓	↓		
2002			Coopération franco-allemande		
2003	↓	↓	↓		
2004			Thèse Z. Tang		Projet IRCAD
2005			↓		Projet INTRO
2006					
2007	Thèse R. Rotimbo		↓		Projet DIVAS
2008			Thèse D. Zhao	Projet TYROSAFE	Projet COST
2009		Projet SKIDSAFE/ Thèse Y. Beauru		↓	↓
2010	↓	Thèse D. Prevost		↓	↓
2011		↓			
2012		↓			
2013		↓			

Figure 1.Synthèse chronologique de mes principales activités

2 RECHERCHES DANS LE DOMAINE DES BETONS

2.1 Cadre de mes recherches

Les recherches menées dans le domaine du béton à l'Université de Sherbrooke à la fin des années 80 avaient un dénominateur commun : les bétons à hautes performances (BHP). Il s'agissait d'une solution innovante permettant d'augmenter la résistance à la compression (R_c) du béton et sa durabilité. Il était donc possible, pour atteindre la même résistance, de réduire les dimensions des pièces de structure. Il était également possible de réduire des risques de corrosion des armatures grâce à une meilleure imperméabilité du matériau. Ces avantages permettaient de proposer des structures plus légères et moins volumineuses, induisant des avantages économiques certains, et d'envisager des utilisations en milieux très agressifs (structures sous-marines, zones arctiques).

L'idée de base était d'agir sur deux paramètres limitant la résistance des bétons classiques ($R_c \cong 40$ MPa) : le rapport eau/ciment et la porosité du béton. L'ajout de l'eau augmente la maniabilité du béton frais, mais diminue sa résistance à la compression. Il s'agissait donc d'ajouter dans le mélange classique (eau, ciment, sable, gravillons) deux produits : des particules fines de silice pour remplir les pores et des super-plastifiants (adjuvants à base de polymères de synthèse) pour réduire la quantité d'eau tout en maintenant la même maniabilité.

S'agissant d'un nouveau matériau, les recherches avaient donc pour but de mieux comprendre le comportement des BHP à l'état fluide et à l'état solide. Je me suis intéressé, dans le cadre de ma thèse de doctorat à l'Université de Sherbrooke, à leur résistance à la fatigue, propriété importante pour des structures exposées aux charges répétées (trafic, vent, houle). Ma thèse visait à caractériser le comportement à la fatigue des éprouvettes de béton et celui des éléments structuraux comme des poteaux armés. Cette décomposition entre le matériau et la structure correspondait à deux lieux de déroulement de la thèse : l'Université de Sherbrooke et le LCPC à Paris. En effet, en complément d'une longue phase expérimentale à Sherbrooke destinée aux essais de fatigue en compression (chargements répétés entre deux niveaux de contrainte en compression imposés) et de fatigue alternée (chargements répétés entre une contrainte en compression et une contrainte en traction) sur des éprouvettes de laboratoire, j'ai eu l'opportunité de venir au LCPC en 1991 pour réaliser des essais sur des poteaux armés. Le LCPC souhaitait en effet faire une expertise pour le compte du SETRA sur le comportement à la fatigue du pont de Normandie. Une coopération a donc été développée avec l'Université de Sherbrooke dans ce domaine.

2.2 Fatigue des bétons à hautes performances

2.2.1 Résultats sur des éprouvettes de laboratoire

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes constituées de deux BHP notés B70 et B95 (R_c (28 jours) = 70 MPa et 95 MPa respectivement) et d'un béton classique noté B40 (R_c (28 jours) = 40 MPa). La forme des éprouvettes dépendait du type d'essais. Pour des essais de compression, j'utilisais des cylindres de 100 mm $\times$ 200 mm. Pour des essais alternés traction/compression, j'ai conçu un montage dédié (Figure 2) pour pouvoir appliquer des efforts de traction aux éprouvettes et pour que la rupture se produise au centre de celles-ci. Il s'agissait d'un exercice stimulant requérant de la théorie – utilisation des calculs aux éléments finis pour dimensionner la forme des éprouvettes et celle des supports d'aluminium – et de

l'expérimentation – choix de l'aluminium pour minimiser les contraintes de cisaillement à l'interface support/éprouvette, choix d'une colle suffisamment ductile pour résister aux efforts répétés.

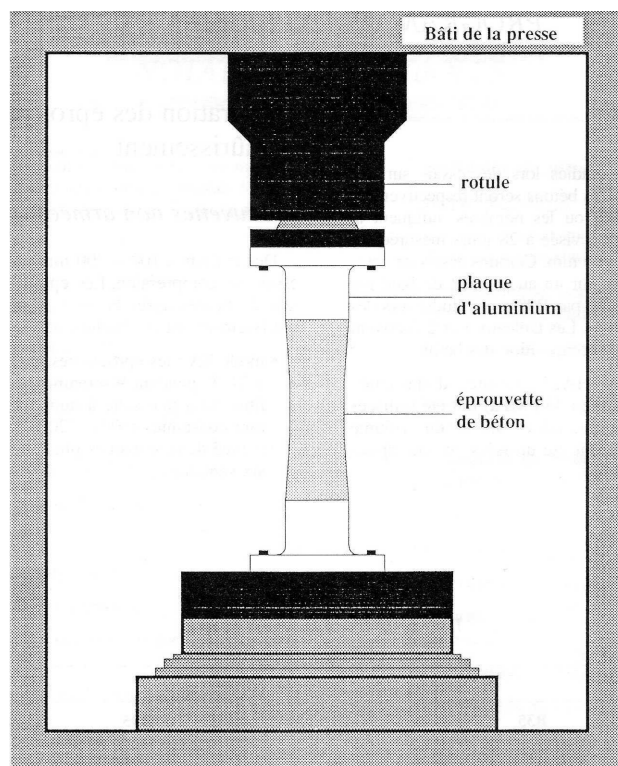


Figure 2. Montage pour essais de fatigue traction/compression

Les éprouvettes étaient équipées de jauges (deux placées sur des génératrices diamétralement opposées) permettant de suivre l'évolution des déformations axiales jusqu'à leur rupture. Un exemple est montré dans la Figure 3 où le nombre de cycles de chargement a été normalisé par le nombre de cycles enregistré à la rupture. Ce mode de présentation permet de grouper des éprouvettes ayant des durées de vie différentes.

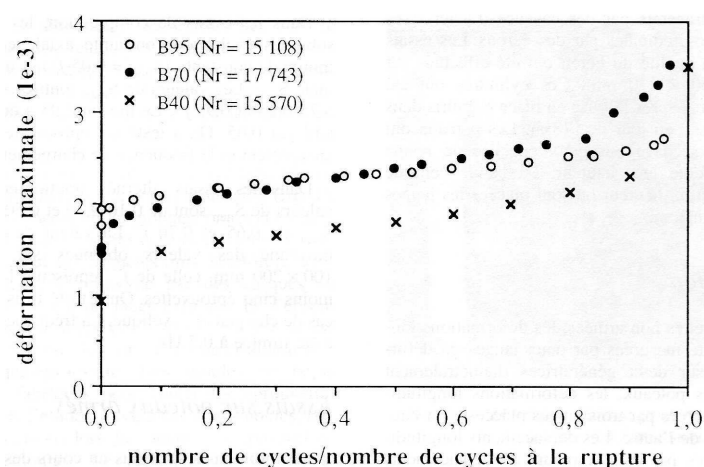


Figure 3. Evolution des déformations axiales des éprouvettes de béton

L'évolution de la déformation comporte trois phases : une croissance rapide au début (phase 1, jusqu'à 20% de la durée de vie) suivie d'une phase stable (phase 2, évolution linéaire) puis de nouveau (phase 3, à partir de 80% de la durée de vie) une autre croissance rapide jusqu'à la rupture. Cette évolution a souvent été attribuée à celle de la fissuration du matériau [1] :

- la première phase correspond à l'évolution des fissures existantes due, dans le cas du béton, essentiellement au retrait lors de la prise du ciment. Ces fissures sont inhérentes au matériau ;
- la deuxième phase correspond à un endommagement progressif du matériau dû à un cumul de cycles de chargement ;
- la troisième phase correspond à une propagation rapide de certaines fissures ayant atteint une taille critique. Cette phase est souvent instable, surtout pour des matériaux fragiles comme les BHP

On peut voir sur la Figure 3 qu'il n'y a pas de différence d'évolution entre les BHP et des bétons classiques. Par contre, il existe une relation étroite entre la pente de la partie linéaire (phase 2) de l'évolution des déformations (Figure 3) – appelée « taux de déformation linéaire » et notée $\Delta\varepsilon/\Delta n$ – et la durée de vie des éprouvettes, notée N_r (Figure 4). On peut interpréter cette correspondance par le fait que la durée de vie est liée à l'endommagement induit par des cycles de fatigue ; elle dépend donc plus de ce qui se passe dans la phase 2 que dans les phases 1 et 3.

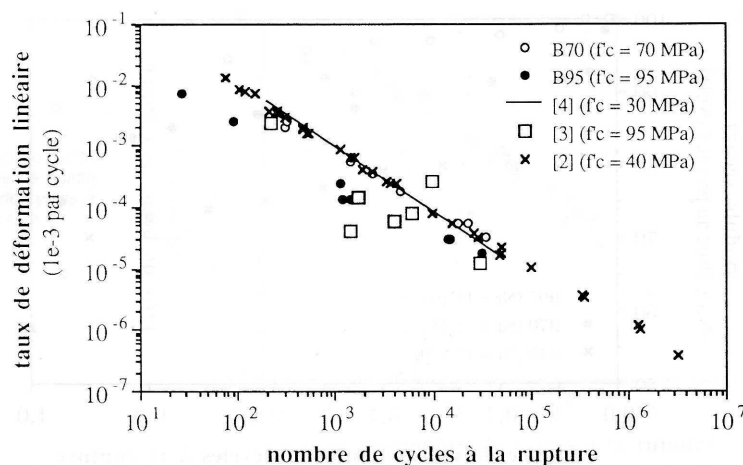


Figure 4. Relation entre taux de déformation linéaire et nombre de cycles à la rupture

Une régression linéaire entre $\log(\Delta\varepsilon/\Delta n)$ et $\log(N_r)$ donnait des relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 \log(N_{r,B40}) &= -1,04 \cdot \log(\Delta\varepsilon / \Delta n) - 0,14 \\
 (1) \quad \log(N_{r,B70}) &= -1,12 \cdot \log(\Delta\varepsilon / \Delta n) - 0,48 \\
 \log(N_{r,B95}) &= -1,17 \cdot \log(\Delta\varepsilon / \Delta n) + 1,19
 \end{aligned}$$

Avec $\Delta\varepsilon/\Delta n$ exprimé en $10^{-3}/\text{cycle}$.

La pente des droites de régression indique une différence entre ces bétons : une pente plus importante chez les BHP indique une plus grande sensibilité de leur résistance à la fatigue aux

déformations. Autrement dit, la même variation du taux de déformation linéaire induirait une plus grande variation du nombre de cycles à la rupture sur des éprouvettes de BHP comparée à un béton classique.

2.2.2 Résultats sur des poteaux armés

Un schéma des poteaux (diamètre : 30 cm ; hauteur : 1 m) utilisés pour des essais de fatigue au LCPC de Paris est montré dans la Figure 5.

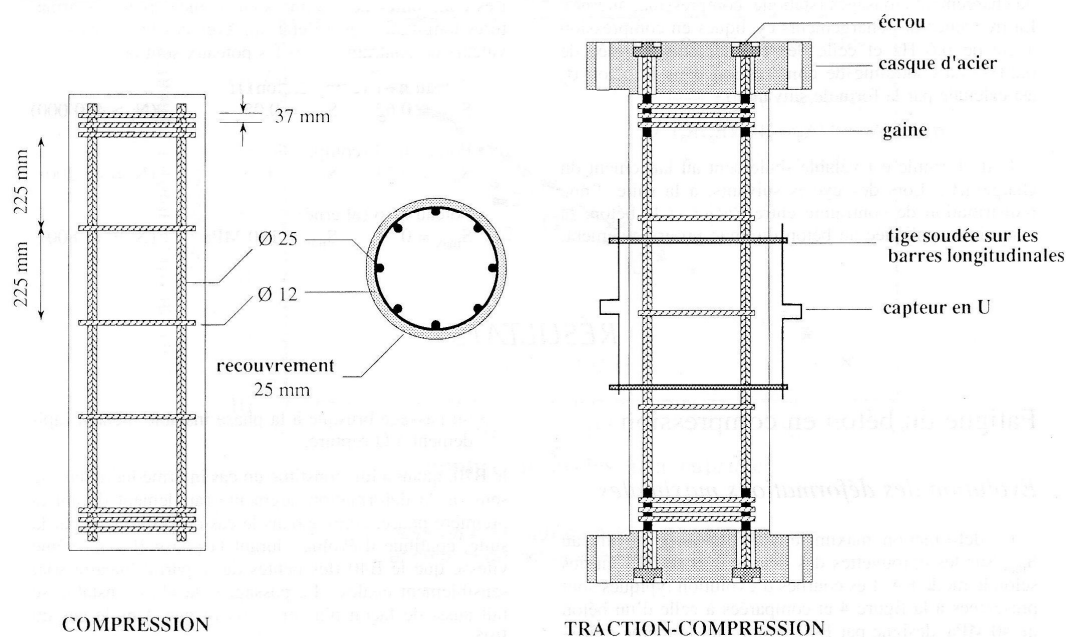


Figure 5. Poteaux pour essais de fatigue

Lors des essais alternés, les efforts de traction ont été transmis par des « casques » d'acier reliés aux armatures par des écrous. Les déformations axiales ont été mesurées à l'aide de trois jauges placées à mi-hauteur à 120° l'une de l'autre.

Au-delà de la simple observation des déformations, j'avais voulu en savoir plus sur les contributions respectives du béton et des armatures d'acier. Une mesure directe de ces contributions étant difficile, voire impossible, j'ai eu recours aux modèles pour obtenir des éléments quantitatifs. Un modèle simple [1] supposait qu'un poteau de béton armé fissuré travaille comme s'il était composé d'une partie composée du béton intact et d'une partie composée de barres d'armatures d'acier travaillant seul (Figure 6).

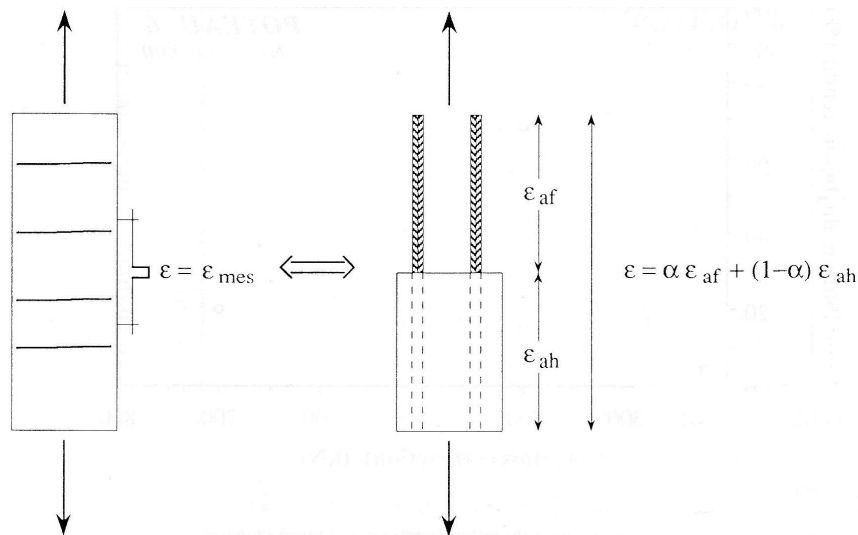


Figure 6. Modélisation de la déformation d'un poteau en béton armé fissuré

Cette décomposition permettait d'écrire :

$$(2) \quad \varepsilon_{mes} = \alpha \cdot \varepsilon_{af} + (1 - \alpha) \cdot \varepsilon_{ah}$$

Avec ε_{mes} : déformation mesurée ;

ε_{af} : déformation de l'acier seul ;

ε_{ah} : déformation de l'acier adhérent au béton ;

α : coefficient de répartition.

Le facteur $(1 - \alpha)$ quantifiait la participation du béton tendu : une diminution de ce facteur signifie une fissuration croissante du poteau. En faisant des hypothèses sur ε_{af} et ε_{ah} , je pouvais quantifier l'évolution de $(1 - \alpha)$ avec le nombre de cycles de chargement. Sur l'exemple montré dans la Figure 7, on peut voir que la contribution du béton tendu diminuait très rapidement avec le nombre de cycles de chargement.

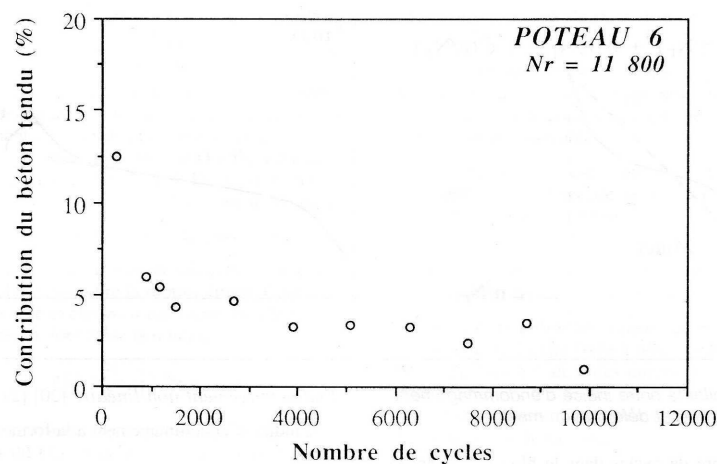


Figure 7. Contribution du béton sous charge cyclique

Les valeurs de $(1 - \alpha)$ indiquent qu'à partir de 1000 cycles de chargement, pratiquement toute la charge de traction était reprise par les armatures d'acier. La stabilisation de $(1 - \alpha)$ correspondait aussi à une stabilisation de la fissuration du poteau (observation visuelle). On voit que, malgré sa simplicité, le modèle de la référence [1] – qui est en réalité celui du CEB/FIP – permettait de suivre l'état de fissuration d'un élément de structure d'une façon adéquate.

2.2.3 Analyse des durées de vie

2.2.3.1 Nécessité de tenir compte de la dispersion des résultats

Si l'on exprime la contrainte maximale ($S_{\max}$) appliquée lors des essais de fatigue en compression comme une fraction de la résistance à la compression (f'_c), l'examen des durées de vie ne permet pas de distinguer les BHP des bétons classiques (Figure 8). Cette observation ne devrait pas induire des conclusions hâtives sur la résistance à la fatigue des BHP. En effet, pour les deux bétons illustrés dans le graphique de la Figure 8, une contrainte $S_{\max} = 0,5$ pour le BHP (42,5 MPa en valeur absolue) est déjà au-delà de ce qui peut être appliqué au béton classique ($f'_c = 35$ MPa). Pour une valeur de contrainte visée ou attendue, un BHP permet déjà d'endurer beaucoup plus de cycles de fatigue qu'un béton classique.

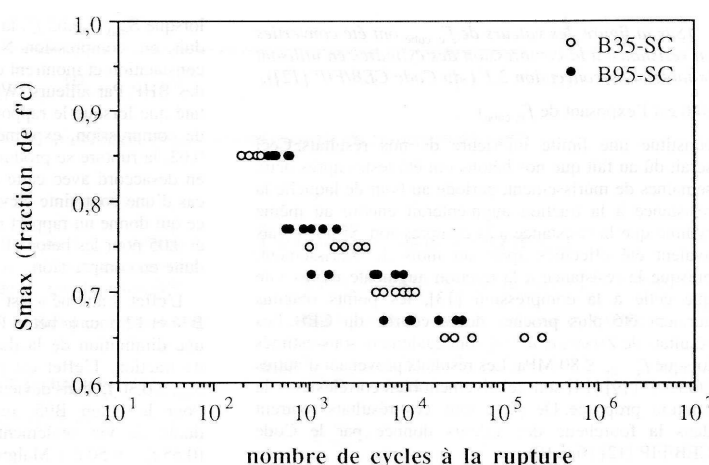


Figure 8. Résistance à la fatigue en compression – Comparaison BHP/béton classique

Le graphique de la Figure 8 a plutôt pour but d'illustrer le problème posé par la dispersion des durées de vie lors d'un essai de fatigue rendant difficile la prévision des durées de vie. A titre d'exemple, j'avais testé deux poteaux identiques dans les mêmes conditions et obtenu des résultats très différents : le premier a rompu à 47200 cycles alors que le second était resté intact après 270000 cycles. Les lois d'endommagement classiques comme celle de Miner ou des variantes [3][4] ne donnaient qu'une tendance moyenne. J'avais donc cherché à associer aux durées de vie moyenne une probabilité de rupture en m'inspirant des méthodes de calculs de fiabilité [5][6].

2.2.3.2 Apports d'une approche fiabiliste

L'approche utilisée permettait d'établir les diagrammes de Wöhler (variation du nombre de cycles à la rupture N_r en fonction de la charge appliquée S) avec une probabilité P_r . Elle comporte donc deux étapes : établissement d'une courbe S - N_r moyenne, puis établissement

d'une relation entre la durée de vie moyenne et celle associée à une valeur de probabilité de rupture.

Pour la première étape, j'ai choisi une formule de la littérature [7]. Pour la deuxième étape, la méthode du Committee on Fatigue and Fracture Reliability (CFFR) suppose que N_r suive une distribution de Weibull dont la fonction de distribution a la forme suivante :

$$(3) \quad F_N(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{u}\right)^\alpha\right]$$

Avec u : valeur extrême caractéristique ;

α : paramètre de forme (une valeur faible de α indique une plus grande dispersion des résultats).

Pour une valeur donnée de N_r , la valeur de la probabilité de rupture P_r est définie par :

$$(4) \quad P_r = P(N < N_r) = F_N(N_r)$$

Par inversion, on trouve :

$$(5) \quad N_r = u \cdot \left[\ln\left(\frac{1}{1-P_r}\right) \right]^{1/\alpha}$$

La durée de vie moyenne $E[N]$ est reliée à u et α par [6] :

$$(6) \quad E[N] = u \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$$

Avec

$$(7) \quad \Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt$$

D'où

$$(8) \quad N_r = \frac{[-\ln(1-P_r)]^{1/\alpha}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} E[N] = \frac{E[N]}{\gamma}$$

Le facteur γ défini par :

$$(9) \quad \gamma = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{[-\ln(1-P_r)]^{1/\alpha}}$$

peut être interprété comme un facteur de sécurité. Par cette approche, on ne choisit pas la valeur du facteur de sécurité par hasard mais en fonction du caractère aléatoire du phénomène (représenté par α) et du risque choisi (représenté par P_r).

Si l'on définit la fonction h telle que le produit $h(t).dt$ représente la probabilité de rupture d'un objet – ayant survécu jusqu'au temps t – durant l'intervalle de temps $(t, t+dt)$, h est définie par la formule suivante dans le cas d'une distribution de Weibull [5] :

$$(10) \quad h(t) = \alpha \cdot \left(\frac{t}{u} \right)^{\alpha-1}$$

La forme de la formule (10) est similaire à celle de l'évolution des déformations non élastiques, si l'on remplace le temps « t » par le nombre de cycles « n », qui représentent l'accumulation irréversible de l'endommagement du matériau. Utilisant des résultats expérimentaux de ma thèse, j'ai déterminé donc la valeur de α , qui est de l'ordre de 1,33.

Un exemple de validation est montré dans la Figure 9, où des résultats d'essais de fatigue en compression – de ma thèse et de la littérature – ont été comparés au fuseau formé par les diagrammes de Wöhler établis à $P_r = 0,05$ et $P_r = 0,95$.

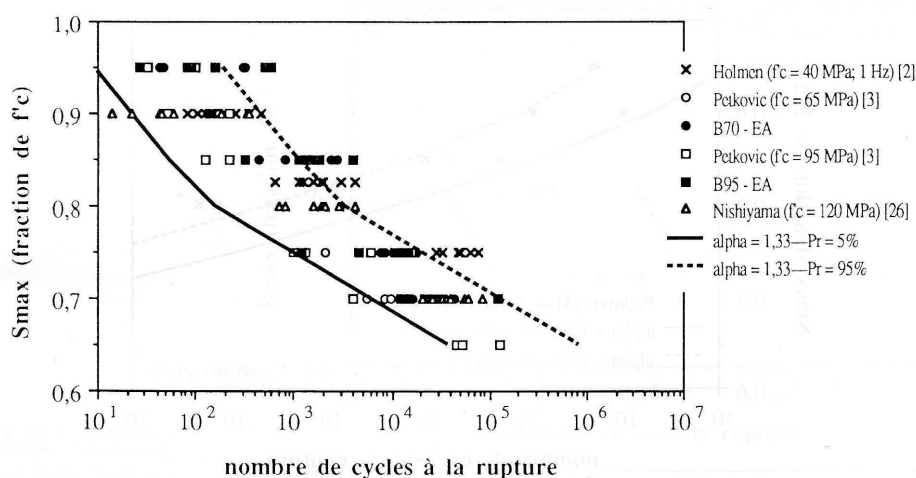


Figure 9. Comparaison entre résultats expérimentaux et diagrammes S-N_r-P_r

On voit que, malgré des dispersions importantes et malgré la diversité des sources de données, la plupart des mesures se trouvent dans le fuseau. Les points se trouvant à l'extérieur du fuseau sont prévisibles car le fuseau ne devait couvrir que 90% des cas. L'aspect positif pour la sécurité d'un ouvrage est le fait que le diagramme à $P_r = 0,05$ constituait la borne inférieure des résultats expérimentaux.

Pour les trois poteaux testés en fatigue dans ma thèse ($N_r = 11800$; 47200 et $N_r > 270000$ cycles), j'ai appliqué la méthode Miner en divisant ensuite la durée de vie moyenne par le facteur de sécurité γ (formule (9)) respectivement à $P_r = 0,05$ et $P_r = 0,95$. Les durées de vie extrêmes sont de 16050 ($P_r = 0,05$) et 345000 ($P_r = 0,95$) et encadraient effectivement les mesures observées. Il ne s'agit pas d'une validation rigoureuse, mais ce résultat démontrait une certaine pertinence de la méthode employée.

2.3 Leçons tirées de cette période d'initiation à la recherche

Le passage dans le domaine du béton était trop court (4 ans) pour que je puisse approfondir mes connaissances dans l'étude de ce matériau. Néanmoins, le fait d'avoir séjourné dans deux organismes différents m'avait procuré de nombreux leçons et questionnements.

2.3.1 Une sensibilisation à la complémentarité théorie/expérimentations

Baigné dans un environnement très empirique à Sherbrooke, j'ai été sensibilisé – lors de mon passage au LCPC de Paris – à l'usage de la théorie pour répondre à des questions parfois d'ordre pratique. En effet, la réalisation des essais de fatigue alternée requérait un montage particulier pour exercer des efforts de traction et compression sur des éprouvettes de béton. Il fallait donc dimensionner non seulement le montage mécanique mais aussi la forme des éprouvettes pour ne pas induire des contraintes trop élevées à l'interface éprouvette/support. L'usage du code de calculs par éléments finis CESAR au LCPC m'avait permis de réaliser ce travail avec des coûts – en termes de moyens humains et matériels – inférieurs à ceux qu'aurait induits une approche purement empirique.

Théorie ne signifie pas forcément complexité. Des modèles simples peuvent être utilisés pour interpréter des résultats parfois complexes au premier abord. J'ai en effet utilisé un modèle simple issu du Code Européen du Béton (CEB) pour quantifier la contribution du béton lors des essais sur des poteaux armés dans la phase de fissuration.

2.3.2 Un aperçu des méthodes d'encadrement de la recherche

Le financement d'une partie du personnel de l'équipe de recherche à Sherbrooke, ainsi que certains équipements d'essais, dépendait des contrats provenant des recherches financées par le gouvernement – provincial, fédéral – et par l'industrie. De ce fait, les chercheurs (professeurs assistants compris) consacraient une partie de leur temps aux activités contractuelles. Les étudiants, notamment les doctorants, devaient donc mener de façon presque autonome leurs travaux.

Je travaillais donc sans l'aide de conseiller d'étude. Cet environnement permettait d'acquérir une autonomie dans le travail quotidien et une certaine connaissance de l'ensemble des tâches à accomplir, et de voir mes limites. Il me poussait à prendre des initiatives et des contacts pour mener à bien ma thèse. Décrit d'une façon un peu simpliste, cette expérience m'a néanmoins initié au management de la recherche : acquérir une vision globale du projet, répartir les tâches incluant la délégation (là où se trouvent mes limites), gérer la relation entre les équipes, etc.

2.3.3 La question du produit attendu

Le programme de travail de ma thèse m'avait permis de voir comment extrapoler des résultats obtenus sur des éprouvettes à un élément de structure avec les difficultés qui y sont liées : changement d'échelles, prise en compte d'autres matériaux (armatures d'acier dans le cas présent). Cette étape très enrichissante a soulevé néanmoins quelques questions :

- comment les résultats sur des poteaux en béton armé contribuent-ils à l'évaluation de la résistance à la fatigue des ouvrages réels ?
- plus généralement, quel usage sera-t-il fait des résultats de ma thèse ? A quels types d'utilisateurs sont-ils destinés ?

Mon affectation au LCPC en 1993 ne me permettait plus de poursuivre ces travaux passionnants sur l'endommagement par fatigue. Cependant, je me suis investi dans un nouveau domaine de recherche avec cette envie d'étudier des phénomènes évoluant dans le temps – que je retrouverai avec plaisir dans l'étude du polissage des chaussées (3.5) – et ces

questionnements, qui vont m'aider à progressivement poser de bonnes questions, avant de démarrer une étude, sur les besoins, l'utilisateur final, etc.

3 RECHERCHES DANS LE DOMAINE DE L'ADHERENCE

3.1 Généralités sur l'adhérence

L'objet de ce paragraphe est de définir ce que l'on entend par « adhérence » et de préciser les limites de mes investigations dans ce domaine très vaste et très complexe.

3.1.1 Définition de l'adhérence

Même si le vocable « adhérence » est largement utilisé dans la littérature, sa définition est ambiguë et ne fait pas l'unanimité même au sein des experts. La définition adoptée pour ce mémoire est la suivante :

« L'adhérence désigne des forces de contact développées à l'interface entre le pneumatique et la surface de chaussée permettant de conserver la trajectoire désirée d'un véhicule lors d'une manœuvre de conduite ».

Ces forces de contact se décomposent en une composante longitudinale F_x et une composante transversale F_y (Figure 10). Dans ce mémoire, on parlera d'un coefficient de frottement « μ » défini par la formule suivante :

$$(11) \quad \mu = \frac{F}{F_z}$$

Avec F : force de contact, sans distinction entre les directions longitudinale et transversale ;

F_z : force verticale exercée entre le pneumatique et la surface de chaussée (pour être rigoureux, l'effort F_z de la Figure 10 devrait être réparti sur les quatre pneumatiques).

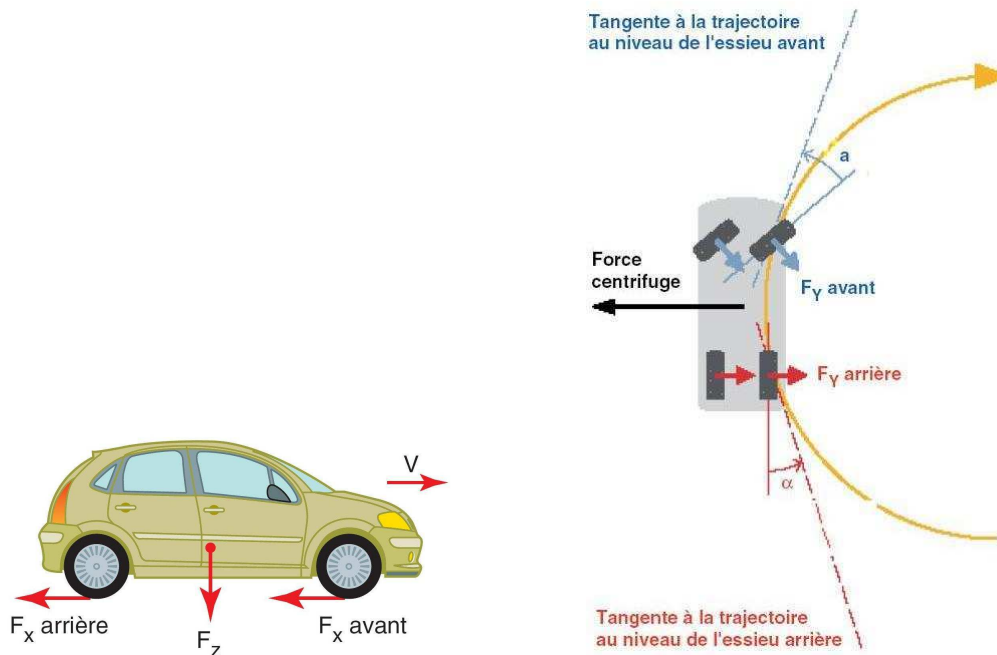


Figure 10. Forces de contact pneumatique/chaussée [8]

Nous verrons dans le paragraphe 3.1.2 que mes recherches sont limitées à l'adhérence sur des chaussées mouillées. Le coefficient de frottement μ fait donc référence aux forces de contact développées en présence d'eau. De plus, nous parlerons d'« adhérence disponible », à savoir, le maximum que peut mobiliser un couple donné pneumatique/revêtement de chaussée. Cette notion est à opposer, en cas de besoin, à la notion d'« adhérence mobilisée », qui dépend de la manœuvre imposée au véhicule. Même si la dynamique des véhicules n'est pas l'objet principal de ce mémoire, on comprend néanmoins intuitivement que le contrôle d'un véhicule dépend du rapport entre ce qui est mobilisé et ce qui est disponible.

3.1.2 Influence de la texture des revêtements de chaussée sur l'adhérence

L'adhérence résulte du contact entre le pneumatique et la surface de chaussée, et dépend donc des facteurs suivants :

- caractéristiques du pneumatique (taille, largeur, profondeur de sculptures, gomme, etc.) ;
- caractéristiques du revêtement de chaussée (texture, nature du bitume, etc.) ;
- conditions de contact (vitesse et glissement de la roue, charge à la roue, etc.) ;
- présence de « polluants » à l'interface (eau, particules provenant de l'atmosphère et du pneumatique, etc.).

D'une façon générale, l'ingénieur routier s'intéresse davantage à l'adhérence sur chaussée mouillée – les accidents sur chaussée sèche étant plus liés à un problème de géométrie (tracé, visibilité) – en agissant, parmi les facteurs influents cités, sur le revêtement de chaussée. La texture, en particulier, joue un rôle primordial car elle évacue l'eau et, après avoir rétabli le contact avec le pneumatique, génère des forces de frottement d'adhésion et d'hystérésis. La texture d'un revêtement de chaussée provient de celle des granulats (sable et gravillons) et du mode de mise en œuvre du revêtement. Elle est donc composée d'aspérités de tailles variables,

qui peuvent être séparées en échelles. Les deux échelles couramment considérées sont la macrotexture et la microtexture.

La macrotexture (Figure 11) est définie comme des irrégularités de surface dont les dimensions sont comprises entre 0,1 mm et 20 mm verticalement, et entre 0,5 mm et 50 mm horizontalement. La microtexture (Figure 11) est définie comme des irrégularités de surface dont les dimensions sont comprises entre 0,001 mm et 0,5 mm verticalement et inférieures à 0,5 mm horizontalement.

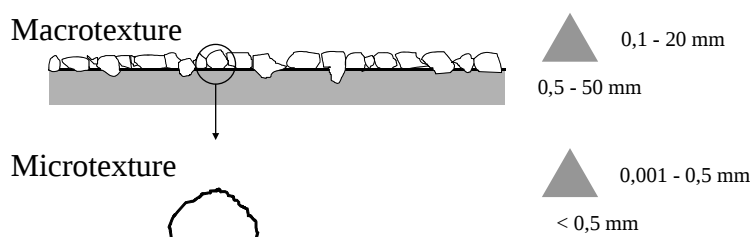


Figure 11. Echelles de texture des surfaces de chaussée

Le schéma de la Figure 12 illustre les rôles respectifs de ces deux échelles de texture.

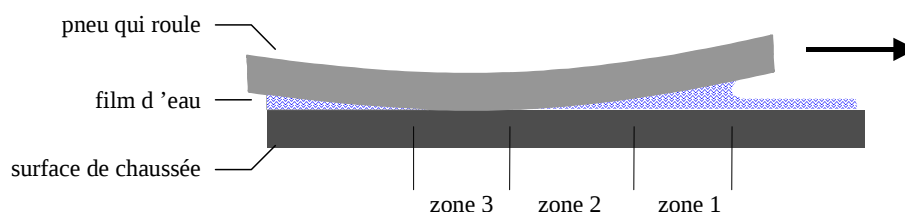


Figure 12. Aire de contact entre un pneumatique et une surface de chaussée en présence d'eau

La macrotexture permet, avec les sculptures du pneumatique, d'évacuer la lame d'eau (épaisseur de l'ordre du millimètre) s'accumulant devant la roue (zone 1) et susceptible de la soulever entraînant l'aquaplanage. Le drainage est rendu possible grâce à l'écoulement de l'eau à travers le réseau de « réservoirs » communicants qu'offre la macrotexture (Figure 13).

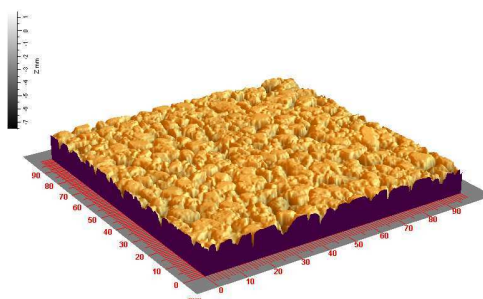


Figure 13. Cartographie de hauteurs d'une surface de chaussée (10 cm × 10 cm)

Lorsque la lame d'eau est réduite à un film mince (épaisseur de l'ordre du dixième de millimètre) (zone 2), son expulsion n'est possible que par de fortes pressions provenant des aspérités anguleuses formant la microtexture. Les forces de frottement sont générées à l'arrière de l'aire de contact (zone 3 de la Figure 12) notamment par la déformation des pains de gomme – viscoélastiques – par des aspérités de la microtexture.

Le graphique de la Figure 14 montre des observations expérimentales, qui soulignent l'influence des échelles de texture sur l'adhérence des chaussées mouillées. On voit :

- que la macrotexture influe sur la variation de l'adhérence avec la vitesse ;
- que la microtexture influe sur le niveau d'adhérence, l'effet étant plus visible à faible vitesse.

En effet, l'adhérence des surfaces à faible macrotexture comme le sable enrobé décroît très vite avec la vitesse comparée à l'adhérence des BBTM, qui ont une macrotexture élevée. On voit aussi qu'à 40 km/h, l'adhérence est plus élevée sur le sable enrobé que sur le BBTM usé. Cette différence est due à la microtexture de ces deux surfaces (respectivement élevée et faible).

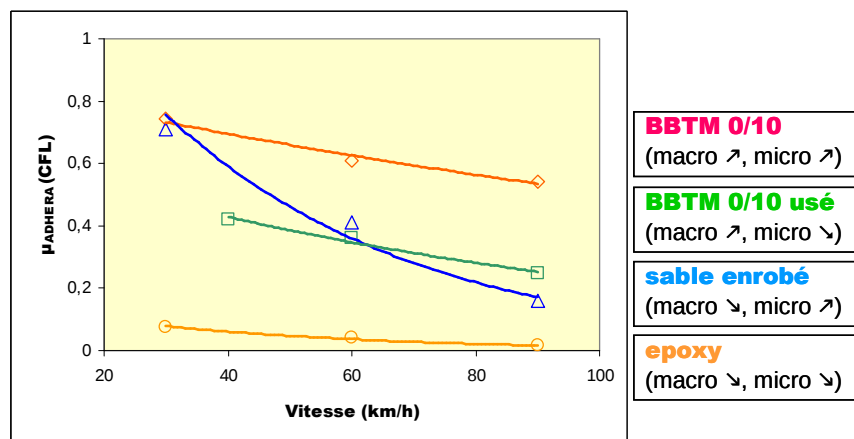


Figure 14. Variation de l'adhérence avec la vitesse pour diverses textures (revêtements de la piste de référence du LCPC de Nantes)

3.2 Comment présenter mes recherches dans le domaine de l'adhérence ?

Au sein de la division ESAR, je suis responsable des recherches sur l'adhérence des chaussées. Ces recherches ont pour objectifs d'une part de mettre en relation l'adhérence et ses facteurs influents, et d'autre part d'évaluer l'influence de l'adhérence sur le risque de perte de contrôle des véhicules.

L'enchaînement des thématiques de recherche présentées dans les paragraphes suivants suit une logique qui s'est constituée dans le temps au fil des projets auxquels j'ai contribué en tant que participant ou animateur. Ce n'est donc pas une présentation dans un ordre chronologique. Elle a cependant le mérite de poser le contexte et de montrer au lecteur la progression de mes réflexions.

3.3 Modèles reliant la texture à l'adhérence

3.3.1 Recherche d'un schéma physique

L'objet de ce paragraphe est de démontrer, à travers quelques exemples représentatifs de modèles publiés dans la littérature, que les modèles de texture – adhérence, malgré leurs apparences variées, suivent néanmoins sensiblement le même schéma.

Un modèle très connu est celui développé dans les années 80 au Pennsylvania State University (Penn State) [8]. Il se présentait sous une forme simple :

$$(12) \quad \mu = c_0 e^{-c_1 V}$$

Avec μ : coefficient de frottement longitudinal ;

V : vitesse de mesure ;

c_0, c_1 : paramètres obtenus par ajustement (par convention, $c_0 > 0$ et $c_1 > 0$).

Les auteurs du modèle ont relié ensuite le paramètre c_0 à un coefficient de frottement mesuré au pendule SRT caractérisant la microtexture, et c_1 au paramètre normalisé profondeur moyenne de texture (PMT) [10] caractérisant la macrotexture.

Horne et Buhlmann [11] ont proposé la formule suivante :

$$(13) \quad \frac{\mu}{\mu_{\text{sec}}} = 1 - \left(C_{\text{mac}} \frac{p_1}{p} + C_{\text{mic}} \frac{p_2}{p} \right)$$

avec μ : coefficient de frottement mesuré à une vitesse quelconque ;

μ_{sec} : coefficient de frottement mesuré à une vitesse très faible (< 5 km/h) sur une surface sèche ;

p_1 : pression exercée par la masse d'eau, appelée pression dynamique ;

p_2 : pression exercée par le film mince d'eau, appelée pression visqueuse ;

p : pression de gonflage ;

C_{mac} : coefficient de drainage lié à la macrotexture, compris entre 0 et 1 (0 : mauvais ; 1 : bon) ;

C_{mic} : coefficient de drainage lié à la microtexture, compris entre 0 et 1.

Malgré leur différence apparente, les deux modèles ci-dessus peuvent s'écrire sous une forme plus générale :

$$(14) \quad \mu = \mu_{\text{faible vitesse}} \times (1 - \text{terme hydrodynamique})$$

Cette forme peut être expliquée en considérant les mécanismes présentés dans le paragraphe 3.1.2 selon lesquels :

- les forces de frottement sont générées essentiellement par l'interaction entre la microtexture et le pneumatique (je désigne le coefficient de frottement résultant d'une manière abusive par $\mu_{\text{microtexture}}$) ;
- ces forces sont réduites par l'intrusion d'eau dans l'aire de contact.

Mise en équation, cette description s'écrit :

$$(15) \quad \mu = \mu_{\text{microtexture}} \cdot \left(\frac{A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \right) = \mu_{\text{microtexture}} \cdot \left(1 - \frac{A_1 + A_2}{A_1 + A_2 + A_3} \right)$$

Avec A_i ($i = 1, 2, 3$) : taille de la zone « i ».

On retrouve bien la forme de la relation (14). Le terme hydrodynamique $(A_1 + A_2)/(A_1 + A_2 + A_3)$ est la fraction de surface de contact occupée par l'eau ; on en déduit facilement qu'il doit dépendre de la macrotexture. Le terme $\mu_{\text{microtexture}}$ est assimilé par certains auteurs à un coefficient de frottement obtenu sur une surface sèche.

Pour la formule (12), le terme hydrodynamique est égal à $(1 - e^{-c_1 V})$. Ce terme augmente avec la vitesse, ce qui est logique car la fraction de surface de contact occupée par l'eau croît lorsque la vitesse croît.

On remarquera que le terme hydrodynamique ne dépend que de la macrotexture dans le modèle du Penn State, alors qu'il dépend aussi de la microtexture dans le modèle de Horne et Buhlmann.

3.3.2 Que manquait-il aux modèles texture/adhérence ?

Chaque modèle présenté dans le paragraphe précédent comporte un terme lié à un coefficient de frottement mesuré à faible vitesse. Ce terme caractérise, si l'on se réfère à la relation (4), la contribution de la microtexture à l'adhérence. La microtexture, comme on a vu dans le paragraphe 3.1.2, est responsable de deux mécanismes importants :

- l'évacuation du film d'eau mince subsistant à l'interface pneumatique/chaussée et empêchant le rétablissement d'une adhérence proche de celle d'un revêtement de chaussée sec ;
- la déformation des pavés de gomme de la bande de roulement du pneumatique générant, grâce à la viscoélasticité de la gomme, des forces de frottement dites d'« hystérésis ».

Pour une modélisation plus complète de la relation entre les échelles de texture et l'adhérence, il était donc nécessaire de mieux comprendre le lien entre le coefficient de frottement $\mu_{\text{microtexture}}$ (voir (15)) et la microtexture. L'objet du paragraphe suivant est de présenter mes travaux sur la microtexture des surfaces de chaussée, dont l'essentiel a été réalisé dans le cadre d'un projet pluriannuel que j'ai piloté de 1995 à 1999 (projet intitulé « thème CH12 », voir tableau 1). L'ensemble des travaux de ce projet a été rapporté dans la référence 2 du paragraphe 10.7.

3.4 Microtexture

La littérature routière traite de la microtexture généralement sous l'angle d'un coefficient de frottement ou des granulats. Ces approches permettent de se rendre compte du rôle de la microtexture, ce que l'on savait déjà qualitativement, ou du lien entre la nature pétrographique des roches et leur résistance au polissage [13]. Pour écrire un modèle de prédiction, il fallait des descripteurs géométriques dérivés des profils ou cartographies de surface. La plupart des articles de modélisation utilisaient des profils théoriques de microtexture (géométrie connue, profils simulés) [14][15] car l'obtention des profils incluant des irrégularités à l'échelle de la

microtexture posait des problèmes aux auteurs des travaux publiés : finesse des détails, présence de la macrotexture.

Avant même d'aborder la modélisation du terme $\mu_{\text{microtexture}}$, il me paraissait donc primordial de traiter les questions de mesure et caractérisation de la microtexture.

3.4.1 Mesure de la microtexture

3.4.1.1 *Problème d'échelles*

La microtexture a été définie sans aucune précision sur la borne inférieure des échelles horizontale et verticale (3.1.2). Pour obtenir une bonne mesure, on est donc tenté d'aller des détails les plus fins possibles afin de ne négliger aucun mécanisme. Cependant, la zone de mesure doit être assez grande : 1) pour que les données contiennent des informations sur la macrotexture portante et, 2) être représentative vis à vis du contact avec le pneumatique. Sur le plan métrologique, on doit tenir compte de la compatibilité entre la résolution et l'étendue de mesure des capteurs. En effet, la résolution permet d'atteindre des échelles de plus en plus fines, alors que l'étendue permet de relever des variations de hauteur importantes autour de la ligne moyenne. Généralement, un capteur à haute résolution possède une étendue faible, et vice versa. Une mesure fine de la microtexture demande une haute résolution et, en présence de la macrotexture portante, une étendue importante. Comme ces conditions ne sont pas remplies simultanément, un compromis est donc à rechercher : quelle résolution faut-il adopter pour ne pas négliger trop de détails et en même temps avoir une longueur de profils représentative ?

Cette question renvoie à une question plus fondamentale : à quelle échelle faut-il étudier la microtexture ? On se rend compte que l'échelle « utile » diffère selon les intérêts cherchés : un examen de la nature pétrographique des granulats demande une résolution de $100\mu\text{m}$, alors qu'une recherche sur l'adhésion entre un pneumatique et une chaussée peut demander une résolution inférieure à $1\mu\text{m}$. Si l'on se réfère aux phénomènes de lubrification dans l'aire de contact, les détails de l'échelle $1\text{-}10\mu\text{m}$ devraient avoir une importance car c'est l'ordre de grandeur du film d'eau dans la zone 3.

3.4.1.2 *Méthodes de mesure existantes*

Comme il existe un décalage important entre l'importance accordée à la microtexture dans l'obtention de l'adhérence d'une chaussée mouillée et les moyens de mesure consacrés, des méthodes indirectes ont été utilisées : la plus connue est celle utilisant une mesure de coefficient de frottement à faibles vitesses ($< 50\text{ km/h}$) dont une justification provient de l'influence prédominante de la microtexture à ces vitesses (Figure 14).

A la plus petite échelle d'observation, les images prises au microscope électronique à balayage (MEB) permettent d'examiner la microtexture à différentes échelles de détails. La société Michelin [6] définissait trois degrés de grossissement : $\times 32$, $\times 320$ et $\times 1000$ 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. Un exemple de photographies est montré à la Figure 15. L'inconvénient majeur de l'utilisation du MEB est la préparation des échantillons à observer. De plus, les prises de photos et leur interprétation demandent un certain degré d'expertise.

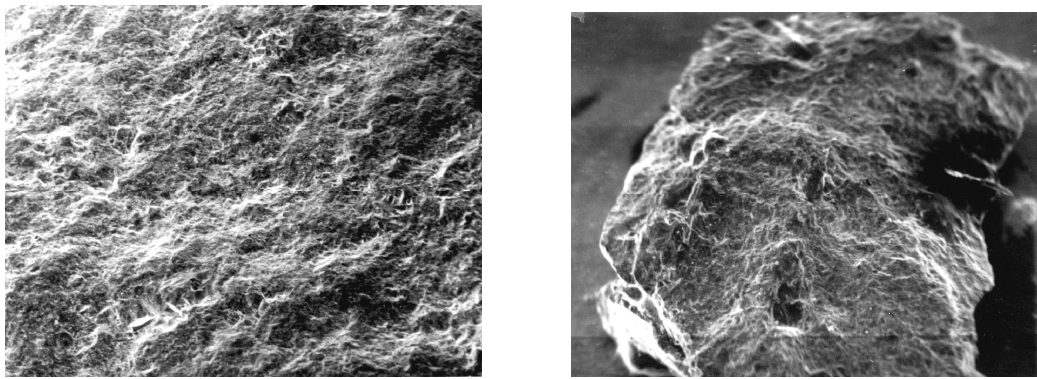


Figure 15. Exemple de photographies permettant d'évaluer l'agressivité d'une surface (photo de gauche : note 6 ; photo de droite : note 15)

L'emploi des capteurs tactiles – très répandu dans l'étude des surfaces usinées – a été mentionné dans certains travaux. L'inconvénient de ce type de capteur est le contact direct entre la pointe de diamant et la surface de mesure induisant des blocages de la pointe au passage dans des creux (espace inter-granulaire par exemple) ou sur une pente importante. Leur utilisation est donc limitée aux surfaces ne possédant pas de macrotexture, par exemple certaines faces de cassure naturelle des roches.

Dans la famille des capteurs sans contact, on retrouve deux méthodes de mesure couramment employées : projection de profils et balayage. La première méthode consiste à projeter une ligne de lumière sur la surface de mesure puis, à l'aide d'une caméra, à enregistrer ou numériser le profil. La deuxième méthode consiste à balayer la surface à mesurer avec un capteur projetant un faisceau de lumière sur la surface de mesure. De nombreux types d'appareil existent ; ils sont généralement développés pour la mesure sur des surfaces usinées. Il s'agit de surfaces sans macrotexture ou à macrotexture connue, de type marches d'escalier par exemple, sur lesquelles est « superposée » une microtexture due à l'usinage ou au moulage. Ces surfaces sont de plus diffusantes, c'est-à-dire que la lumière réfléchissante n'a pas une direction privilégiée.

3.4.1.3 Méthodes de mesure développées dans le cadre de mes travaux

L'approche que j'ai adoptée dans mes travaux est d'utiliser au maximum des solutions existantes. En effet, le développement d'un nouveau capteur demande généralement un délai relativement long (cahier des charges, étude de faisabilité, maquettage, etc.), qui n'est pas compatible avec l'objectif de résultats des projets. Une solution commerciale est rarement ajustée complètement aux besoins d'un projet mais, moyennant de quelques hypothèses de travail, je reste convaincu qu'elle y répond en grande partie. Nous verrons notamment dans l'étude du polissage (3.5.2) qu'une machine commerciale peut donner des résultats plus que satisfaisants.

Dans le cadre du thème CH12, j'ai donc utilisé un capteur commercial fonctionnant suivant le principe de focalisation dynamique. En chaque point, la lentille de l'objectif se déplace verticalement afin de placer le point de focalisation sur la surface à mesurer (Figure 16). Le diamètre du faisceau de lumière au point de focalisation est de 1 μm .

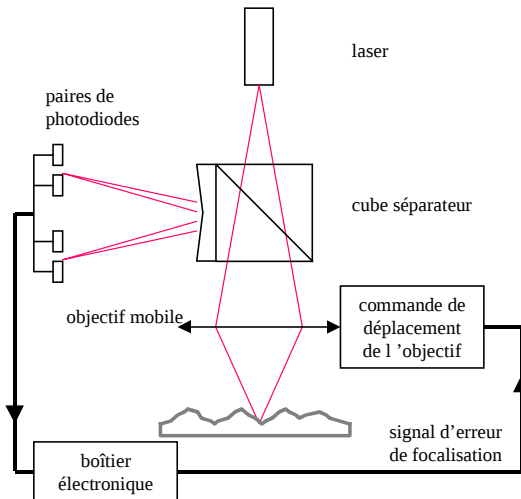


Figure 16. Principe de la focalisation dynamique

Une adaptation de ce capteur permettrait de relever des profils de chaussée dont les caractéristiques typiques sont : longueur = 5 mm, pas d'échantillonnage = 1 μ m. Les mesures sont néanmoins très délicates à cause de la distance de travail du capteur (2 mm de la surface) et de sa profondeur de champ (1 mm). Ce capteur n'est donc utilisable que pour des mesures en laboratoire sur des surfaces relativement planes (avec des gravillons mis à plat par exemple).

3.4.1.4 Vers une mesure opérationnelle de la microtexture

Nous venons de voir dans le paragraphe précédent que la mesure de la microtexture est délicate à cause des variations importantes de hauteurs sur une surface de chaussée. On peut obtenir des profils ou des cartographies de hauteurs en balayant la surface à mesurer avec un capteur à hautes résolutions. Ce mode de mesure est envisageable en laboratoire, mais, outre le problème de pertes de signal déjà mentionné, nécessite un temps de mesure conséquent. Il est donc nécessaire d'envisager des méthodes plus rapides pour une utilisation sur routes.

En collaboration avec le Pr Khoudair du Laboratoire Signal, Image et Communications (SIC) de l'Université de Poitiers, j'ai développé un système transportable pour la prise d'images de chaussée. Le montage du prototype est montré à la Figure 17.

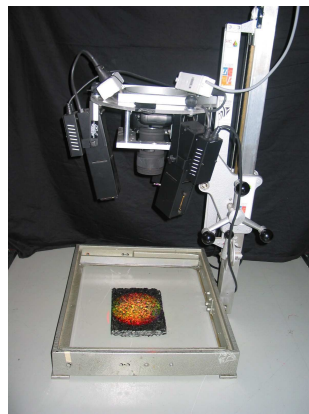


Figure 17. Système de mesure d'images de chaussée développé en collaboration avec le laboratoire Signal, Images et Communications (SIC)

Dans le montage initial, nous utilisons un appareil de photos à haute résolution (30 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, taille de l'image : 3000 $\times$ 2000 pixels) entouré de trois sources lumineuses disposées de manière à fournir des éclairages de la même surface sous trois angles différents. A la résolution maximale (30 $\mu\text{m}/\text{pixel}$), il était possible de prendre des images de 90 mm $\times$ 60 mm. Il s'agit d'une taille et d'une résolution adaptées à l'étude de la microtexture et l'influence de la macrotexture portante. Les images sont prises séquentiellement puis traitées afin de séparer l'information liée à l'aspect de surface (couleur notamment) et celle liée au relief. Les images sont ensuite transformées en cartographie de hauteurs. Un exemple de cartographies de surface a été montré dans la Figure 13.

Nous avons choisi un modèle Lambertien (surfaces parfaitement diffusantes) pour traduire le comportement photométrique des surfaces de mesure et établir le lien entre l'image, la texture de surface et la couleur. La Figure 18 schématise une configuration de prise de vue. Les différents angles de cette figure sont :

- θ_i : angle d'incidence par rapport à la surface rugueuse ;
- φ : angle d'incidence par rapport à la facette ;
- α : angle que forme la normale à la facette avec la normale à la surface.

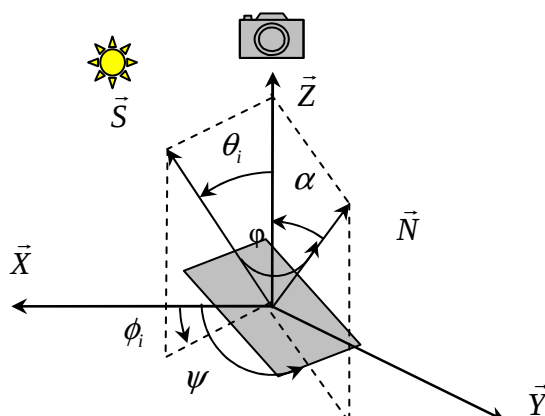


Figure 18. Configuration de la prise de vue

Dans le cas d'une surface lambertienne, l'intensité $I(x, y)$ dans l'image traduit l'énergie reçue par le capteur CCD et s'exprime par la relation ci-dessous :

$$(16) \quad I(x, y) = \frac{L(x, y)}{r^2} \cos \varphi(x, y)$$

Avec : $I(x, y)$: intensité de l'image ;

$L(x, y)$: coefficient représentatif des propriétés colorimétriques de la surface ;

$\varphi(x, y)$: angle d'incidence par rapport à la facette ;

r : distance séparant la source de lumière de la facette.

La distance r sera considérée constante du fait des faibles variations du relief local par rapport à la distance surface/source de lumière.

Le problème revient à exprimer l'angle $\varphi(x, y)$ en fonction des coordonnées cartésiennes (x, y, z) du point visé. Les vecteurs suivants ont été définis :

- $\vec{z} = [0 \ 0 \ 1]^T$, le vecteur normal au plan de la surface rugueuse ;
- $\vec{S} = [(\sin \theta_i \cdot \cos \phi_i) (\sin \theta_i \cdot \sin \phi_i) \cos \theta_i]^T$, le vecteur directeur unitaire de la source de lumière, ϕ_i est l'angle formé par l'axe des $\vec{x}$ et la projection du vecteur de source de lumière $\vec{S}$ dans le plan $(\vec{x}, \vec{y})$;
- $\vec{N} = [a \ b \ c] = [\sin \alpha \cdot \cos \psi \ \sin \alpha \cdot \sin \psi \ \cos \alpha]$, le vecteur normal à la micro facette de la paroi.

On obtient :

$$(17) \quad \cos \varphi = \vec{N} \cdot \vec{S} = \cos \alpha (\tan \alpha \cos \psi \sin \theta_i \cos \phi_i + \tan \alpha \sin \psi \sin \theta_i \sin \phi_i + \cos \theta_i)$$

Pour un point M appartenant à la surface de mesure, le relief local au voisinage de ce point peut être considéré comme étant un plan dont l'équation est la suivante :

$$P : ax + by + cz = 0 ; \text{ on en déduit : } z = -\frac{a}{c}x - \frac{b}{c}y.$$

D'où :

$$(18) \quad \begin{cases} \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{a}{c} = -\tan \alpha \cos \psi \\ \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{b}{c} = -\tan \alpha \sin \psi \end{cases}$$

Nous déduisons alors :

$$(19) \quad \cos \alpha = 1 / \sqrt{1 + (\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}$$

Finalement, à partir des équations (16), (17), (18) et (19), nous obtenons l'équation suivante :

$$(20) \quad I(x, y) = \frac{L(x, y)}{r^2} \frac{\cos \theta_i - \frac{\partial z}{\partial x} \sin \theta_i \cos \phi_i - \frac{\partial z}{\partial y} \sin \theta_i \sin \phi_i}{\sqrt{1 + (\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}}$$

Cette expression nous permettrait d'expliciter les informations contenues dans le niveau de gris de l'image. Afin d'extraire de l'image l'information liée à la texture uniquement, nous exploitons l'équation (20). Cette équation comprend trois inconnues dont deux sont liées aux variations locales du relief $(\partial z / \partial x \text{ et } \partial z / \partial y)$ et une liée aux propriétés colorimétriques de la surface $L(x, y)$. Le problème revient à résoudre un système de trois équations à trois inconnues. Pour produire les trois équations nécessaires à la détermination des trois inconnues, nous procédions à l'acquisition de trois images de la même surface éclairée sous différents angles d'incidence. Pour éviter l'apparition des phénomènes d'ombres dans les images, nous éclairions la surface avec un faible angle d'incidence.

Soient I_1 , I_2 et I_3 les images prises successivement avec les conditions d'éclairages suivantes : $(\theta_i = \theta \text{ et } \phi_i = 0)$, $(\theta_i = \theta \text{ et } \phi_i = 2\pi/3)$ et $(\theta_i = \theta \text{ et } \phi_i = -2\pi/3)$.

Le système d'équations ainsi constitué est le suivant :

$$(21) \quad \begin{cases} I_1(x, y) = L(x, y) \frac{\cos \theta - \frac{\partial z}{\partial x} \sin \theta}{\sqrt{1 + (\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}} \\ I_2(x, y) = L(x, y) \frac{\cos \theta + \frac{1}{2} \frac{\partial z}{\partial x} \sin \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\partial z}{\partial y} \sin \theta}{\sqrt{1 + (\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}} \\ I_3(x, y) = L(x, y) \frac{\cos \theta + \frac{1}{2} \frac{\partial z}{\partial x} \sin \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\partial z}{\partial y} \sin \theta}{\sqrt{1 + (\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}} \end{cases}$$

La résolution de ce système d'équations conduit à :

$$(22) \quad \begin{cases} \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{(2I_1 - I_2 - I_3)\cos \theta}{(I_1 + I_2 + I_3)\sin \theta} \\ \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{\sqrt{3}(-I_2 + I_3)\cos \theta}{(I_1 + I_2 + I_3)\sin \theta} \end{cases}$$

Le système d'équations obtenu permet ainsi d'exprimer les variations de relief en fonction des niveaux de gris des différentes images acquises.

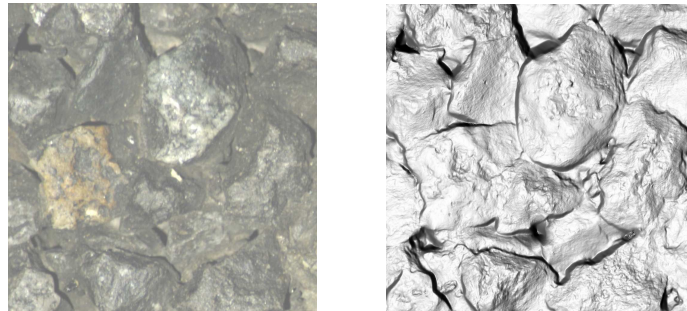


Figure 19. Image prise par l'appareil de photos (droite) et celle contenant uniquement des informations de texture (gauche) (10.1, réf. 7)

La technique stéréovision photométrique mise au point par le laboratoire SIC permettait de travailler sur des surfaces de chaussée non uniformément colorées, dues à la présence de granulats colorés par exemple. Cependant, le modèle photométrique de surface nécessite quelques améliorations pour tenir compte de la présence des points brillants, notamment sur des surfaces de chaussée neuves.

3.4.2 Caractérisation de la microtexture

3.4.2.1 Descripteurs existants

La plupart des travaux publiés employaient des paramètres normalisés comme le R_q (écart type des hauteurs) ou le PMP dont le calcul est normalisé pour des profils de macrotexture [10]. Ces approches caractérisent globalement la microtexture et ne décrivent que la taille des aspérités. Compte tenu du rôle attendu de la microtexture (expulsion du film d'eau, déformation des pains de gomme), sa description devrait être complétée par des paramètres exprimant la forme et la distribution spatiale des aspérités.

A noter que la courbe d'Abbott décrivant la distribution cumulative des hauteurs, à partir de laquelle diverses informations intéressantes comme la surface portante ou le pourcentage des creux (indiquant les « réservoirs » disponibles), n'est pas utilisée car les fonctions de portance ou de drainage ne sont pas considérées comme primordiales pour la microtexture en comparaison avec la fonction d'indentation par exemple.

Forster [16] était l'un des rares auteurs à caractériser localement la microtexture. Cet auteur définissait en premier lieu des sommets (points hauts locaux) et des vallées (points bas locaux) ; le nombre de sommets est déduit ainsi que leur densité. Puis la hauteur de chaque sommet est calculée par rapport à la vallée immédiatement à droite (Figure 20). La forme moyenne des aspérités est calculée selon le schéma illustré dans la Figure 20.

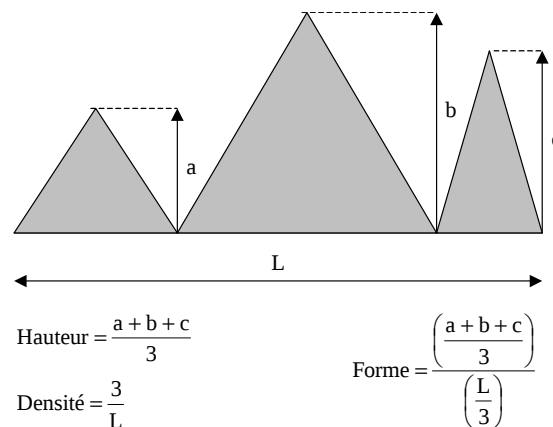


Figure 20. Caractérisation de la microtexture selon Forster [16]

En regardant la corrélation entre les trois paramètres : hauteur, forme et densité, Forster démontrait que la forme est le facteur le plus explicatif du coefficient de frottement mesuré au pendule SRT (Figure 21). Les dispersions autour de la tendance moyenne étaient néanmoins importantes. Selon Forster, elles sont dues à un problème d'échantillonnage (7 profils de 2 mm de longueur relevés sur l'équivalent d'une surface de 1 cm² environ). Cette explication n'est pas complète car l'échantillonnage influe sur l'intervalle de confiance – non représenté ici – autour d'une estimation, alors que la dispersion observée reflèterait plutôt le degré de dépendance entre des mesures SRT et les paramètres géométriques proposés.

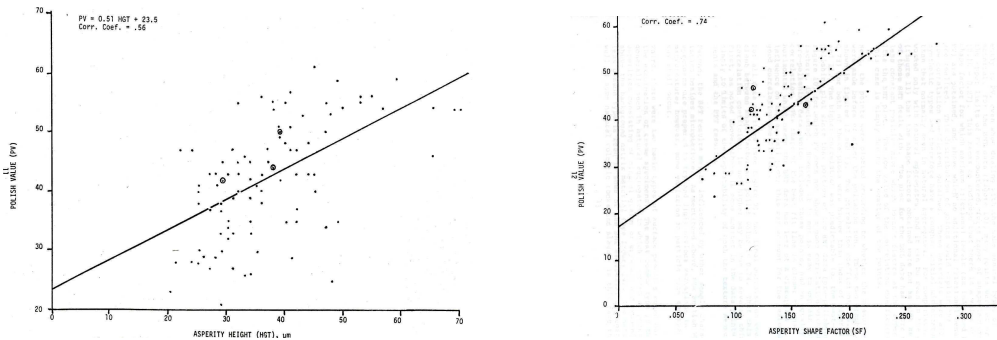


Figure 21. Corrélation entre les descripteurs (gauche : taille, droite : forme) de Forster et le coefficient de frottement mesuré au pendule SRT [16]

(les coefficients de corrélation affichés correspondent à « r », donc à lever au carré pour des comparaisons)

3.4.2.2 Méthodologie mise en œuvre

L'approche que j'ai mise en œuvre est basée sur une description de forme. Elle comportait deux phases :

- dans un premier temps, il s'agissait d'une description purement géométrique en améliorant le travail initié par Forster par l'apport d'autres méthodes de caractérisation de forme ;
- dans un deuxième temps, l'étude étant traitée davantage dans le paragraphe 3.4.3, les descripteurs géométriques ont été intégrés dans des modèles de contact pneumatique/chaussée. Cette partie mécanique permettait de voir clairement comment la microtexture contribue à la génération du frottement et donnait une signification plus physiques aux descripteurs développés.

Malgré l'existence d'une littérature traitant du sujet, la description de la microtexture est un sujet exploratoire. La méthode que je vais présenter dans les paragraphes suivants a donc été mise en œuvre d'une manière progressive à la fois dans la définition des paramètres et dans la nature des échantillons servis aux validations.

3.4.2.3 Première approche du problème avec la décomposition en motifs

Basé sur l'état des connaissances existantes, illustré brièvement dans le paragraphe précédent, j'ai orienté mes recherches vers une description locale de la microtexture. Ces travaux ont été menés en collaboration avec le Professeur Hassan Zahouani du Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) de l'ECL.

Dans la définition de la méthodologie de travail, nous avons défini dans un premier temps le choix des surfaces permettant de valider les descripteurs proposés. Cette étape est souvent rendue difficile par le fait que la texture d'une surface de chaussée comporte deux échelles, alors que seule la microtexture doit être évaluée. Pour « isoler » la microtexture, nous avons utilisé dans l'ordre chronologique trois types de surface :

- faces de cassure naturelle des blocs de roche (sans macrotexture) ;
- mosaïque de gravillons (macrotexture constante) ;
- surface de chaussée.

Cette démarche a permis de valider la pertinence des descripteurs de microtexture proposés et de voir les dispersions induites par la présence de la macrotexture. A noter que dans les travaux de Forster [16], seul le deuxième type de surface a été utilisé. L'évaluation des paramètres d'indenteurs a été basée sur leur degré de corrélation avec un coefficient de frottement mesuré au pendule SRT.

Dans un deuxième temps, nous avons choisi une méthode de caractérisation adaptée à une description locale des rugosités de surface. L'objectif était de mettre au point un mode de reconnaissance de forme et de séparation d'échelles d'irrégularités de surface. Notre choix final a été porté sur la méthode dite « décomposition en motifs » développée en France pour l'industrie automobile. La norme française NF E 05-015 [17] donne des définitions sur les motifs et leurs principales caractéristiques. Cependant, l'article le plus complet sur les motifs est celui de Fahl [18]. La finalité recherchée dans les motifs est suffisamment proche des préoccupations routières pour justifier un choix à priori de cette méthode. A noter que pour la séparation d'échelles, il existe d'autres méthodes comme celle utilisant des variogrammes employée en géostatistique pour l'identification des gisements de métaux. Une application des variogrammes à l'analyse de la macrotexture des surfaces d'enrobé a été traitée par Ech et al. [19].

Un motif est une portion de profil comprise entre deux sommets consécutifs (Figure 22). La première tâche pour définir des motifs sur un profil est la recherche de sommets et vallées. Les critères de recherche sont définis par l'utilisateur, les plus simples étant la recherche de maximum (respectivement minimum) local pour localiser un sommet (respectivement une vallée), à savoir : sur un profil de surface comportant N points, un point $n^{\circ} i$ d'altitude z_i (i variant de 2 à $(N - 1)$) est défini comme un sommet si $(z_{i-1} < z_i \text{ et } z_{i+1} < z_i)$ et comme une vallée si $(z_{i-1} > z_i \text{ et } z_{i+1} > z_i)$. A partir d'un motif, on peut calculer les caractéristiques suivantes (Figure 22) :

- la hauteur $R_{1,i}$ entre le sommet de gauche et la vallée ;
- la hauteur $R_{2,i}$ entre le sommet de droite et la vallée ;
- la « caractéristique » T_i , qui représente le minimum de $R_{1,i}$ et $R_{2,i}$;
- la hauteur moyenne R_i du motif ;
- la largeur AR_i du motif, qui représente la distance entre les sommets.

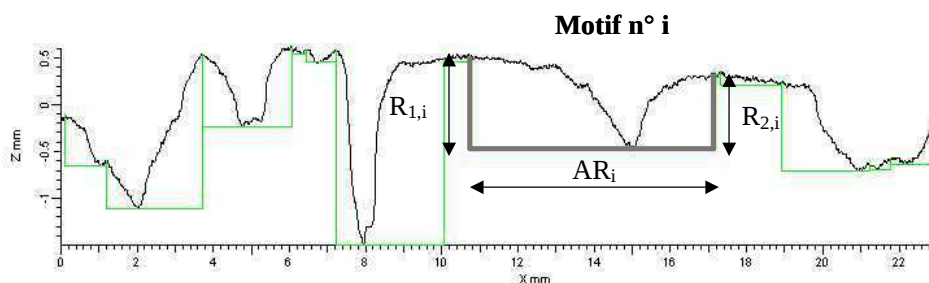


Figure 22. Définition d'un motif

(dans un souci d'illustration, les critères de détection de sommets ont été modifiés pour cet exemple de manière à avoir les motifs les plus larges possibles)

Par définition, deux motifs adjacents ont toujours un sommet commun. Pour supprimer des petits sommets (échelle 1-10 μm , comme les aspérités à la surface du motif « i » de la Figure 22 par exemple), des combinaisons de motifs peuvent être effectuées selon des conditions précises [18]. Lorsque tous les motifs sont détectés et éventuellement groupés, deux paramètres sont calculés :

- R : moyenne des R_i ;
- AR : moyenne des AR_i .

On considère ensuite la ligne enveloppe passant par tous les sommets de motif ; cette ligne est appelée « profil d'ondulation ». De nouveaux motifs appelés « motif d'ondulation » sont détectés sur ce profil suivant les mêmes règles que celles appliquées sur le profil d'origine. Deux nouveaux paramètres sont calculés :

- W : moyenne des hauteurs W_i des motifs d'ondulation ;
- AW : moyenne des largeurs AW_i des motifs d'ondulation.

L'analyse des profils par décomposition en motifs utilise donc deux échelles : l'échelle de rugosité et l'échelle d'ondulation. L'objectif étant de définir des paramètres de forme, il a été décidé d'utiliser les rapports R/AR et W/AW pour établir des corrélations avec le frottement SRT.

Les premières corrélations, effectuées sur des faces de cassure naturelle de roche, ont permis de relever les informations suivantes :

- la conservation de tous les sommets améliore la corrélation. Les règles de combinaison de motifs ne doivent donc pas être appliquées aux aspérités de chaussée ;
- de meilleures corrélations sont obtenues lorsque la largeur maximale des motifs détectés est limitée à 90 μm . Cette limite choisie d'une manière arbitraire peut être rapprochée de l'échelle de 100 μm considérée comme pertinente pour des examens pétrographiques (voir 3.4.1.1).

Les corrélations entre R/AR , W/AW et le frottement SRT pour l'ensemble Roche sont montrées à la Figure 23. Chaque point du graphique représente un échantillon de roche. Le fait que le nombre de points représente le double des types de roche est expliqué par l'utilisation d'un même échantillon à deux états : neuf et poli (polissage par projection GRAP [25]). Pour un échantillon donné, la valeur de W/AW est plus faible que celle de R/AR . Cette tendance est logique car le profil enveloppe doit être moins agressif que le profil d'origine.

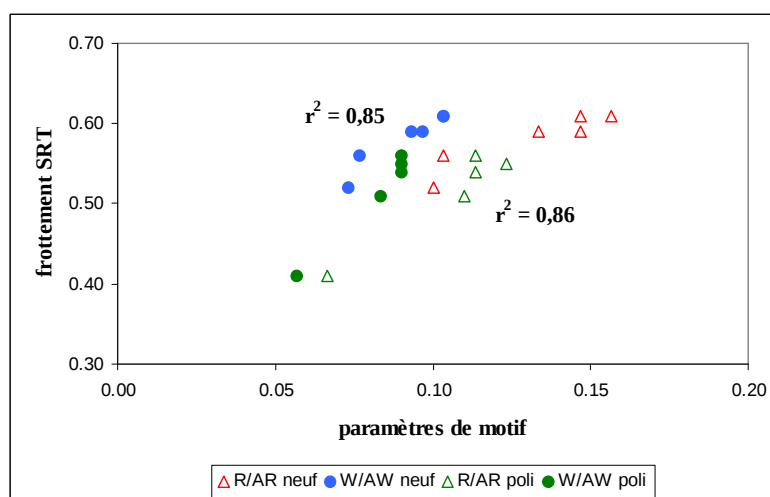


Figure 23. Corrélation entre les descripteurs de motif et le frottement SRT (faces de cassure naturelle de roches)

Les coefficients de corrélation linéaire sont indiqués pour chaque paramètre de motif (R/AR ou W/AW). Les corrélations sont plutôt satisfaisantes ($r^2 \approx 0,85$), comparativement aux résultats trouvés dans la littérature ($r^2 \approx 0,55$, Figure 21) [16]. De plus, comme les coefficients de corrélation sont semblables, on peut dire que la contribution de chaque échelle est significative.

Sur des surfaces constituées de mosaïque de gravillons (macrotexture constante), les corrélations entre les paramètres R/AR, W/AW et le frottement SRT sont montrées à la Figure 24. Les valeurs du coefficient de corrélation pourraient être améliorées si l'on supprimait les deux points « excentrés » ; elles passent alors de 0,54 pour l'échelle de rugosité (respectivement 0,55 pour l'échelle d'ondulation) à 0,78 (respectivement 0,87). Cependant, rien ne permettait de justifier la suppression de ces deux échantillons. Il a donc été décidé de rechercher une variante à la méthode des motifs permettant de mieux expliquer les résultats de la Figure 24.

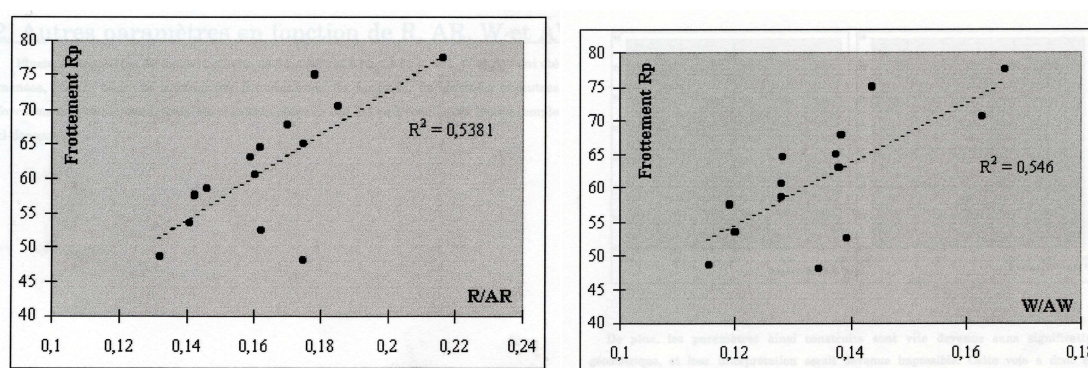


Figure 24. Corrélation entre les descripteurs de motif et le frottement SRT (mosaïque de gravillons)
(les valeurs de frottement sur l'axe des ordonnées ont été multipliées par 100)

3.4.2.4 Affinement avec la méthode des indenteurs

Les motifs sont constitués d'une vallée et des deux sommets qui l'entourent. Utilisant les mêmes définitions de sommets et vallées, nous avons défini un indenteur comme une aspérité formée par un sommet et les deux vallées qui l'entourent (triangle bleu dans la Figure 25). Un indenteur est donc constitué de deux demi-motifs. Sa forme triangulaire matérialise davantage une aspérité qu'un motif.

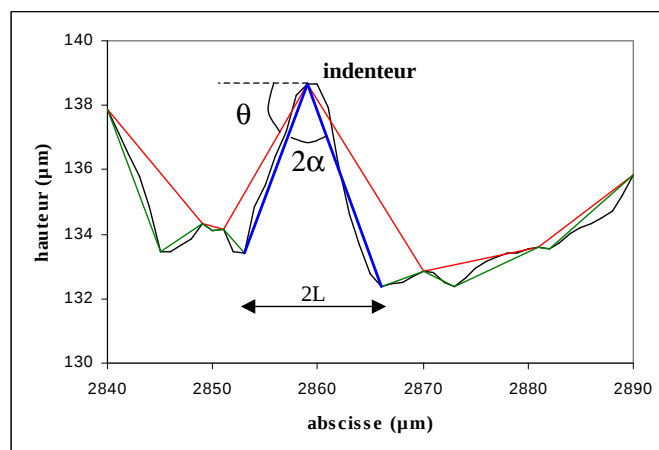


Figure 25. Définition d'un indenteur et de ses caractéristiques

Dans son esprit, la méthode des indenteurs est semblable à celle développée par Forster [16], le comptage des indenteurs et le calcul résultant de leur densité étant effectivement identique. L'originalité de notre méthode réside dans la définition des caractéristiques de taille et de forme :

- pour la taille, nous considérons en effet que c'est la différence de hauteurs entre deux sommets consécutifs qui importe plus que celle entre un sommet et une vallée voisine. Cette notion de « relief » – les sommets d'aspérités ne sont pas dans un même plan horizontal – a été abordée dans une étude sur le polissage des granulats [13]. Les auteurs de cette étude ont en effet attribué au relief créé par la différence de dureté entre les différents minéraux composant une roche le maintien de la valeur du coefficient de frottement – mesuré au pendule SRT – après des cycles de polissage. Nous pensions aussi que l'espacement entre les indenteurs doit influencer sur la déformation de la gomme. Nous nous sommes donc intéressés à l'aspect relief de surface en définissant un angle θ formé par le segment reliant les sommets de deux indenteurs consécutifs (ligne rouge sur la Figure 25) et l'horizontale :

$$(23) \quad \theta = \text{Arctg} \left| \frac{z_{k+1} - z_k}{x_{k+1} - x_k} \right|$$

Avec z_k : altitude du sommet n° k; x_k : abscisse du sommet n° k.

- pour la forme, nous considérons que c'est la pression exercée par un sommet d'indenteur qui influe sur la déformation de la gomme. Selon Sabey [20], cette pression est proportionnelle à la cotangente du demi-angle α au sommet de l'indenteur (Figure 25). Dans notre approche, la forme était donc caractérisée par le paramètre $\cotan(\alpha)$ avec α défini par la formule suivante :

$$(24) \quad \alpha = \frac{1}{2} \times \left[\operatorname{Arctg} \left| \frac{x_m - x_{m-1}}{z_m - z_{m-1}} \right| + \operatorname{Arctg} \left| \frac{x_{m+1} - x_m}{z_{m+1} - z_m} \right| \right]$$

avec z_m : altitude de l'extremum n° m ;

x_m : abscisse de l'extremum n° m.

La Figure 26 montre respectivement les relations θ - SRT et $\cotg(\alpha)$ - SRT pour les mêmes surfaces que celles de la Figure 24. Outre le fait que la corrélation est satisfaisante, on voit qu'il n'y a plus de points « anormaux ». Les deux points à priori « aberrants » des graphiques de la Figure 24 nous ont permis finalement de développer une méthode plus adaptée. Les tendances sont également logiques : en effet, on observait une augmentation du frottement pour des indenteurs plus pointus ou pour un relief plus prononcé.

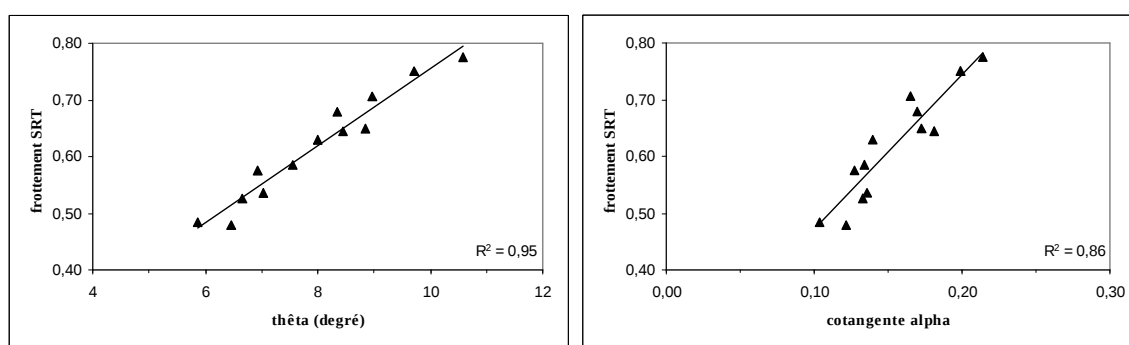


Figure 26. Corrélation entre les paramètres de taille (θ , graphe de gauche) et de forme ($\cotg(\alpha)$, graphe de droite) et le coefficient de frottement SRT

Les corrélations ont été moins bonnes sur des surfaces de chaussée ; cette dispersion était attendue compte tenu de la présence de la macrotexture. Nous avons néanmoins réussi à valider notre méthode de caractérisation qui, rappelons-le, était dédiée uniquement à la microtexture.

3.4.3 Modèles reliant la microtexture à l'adhérence à basse vitesse

3.4.3.1 *Un modèle rhéologique pour comprendre le frottement d'hystérésis*

Après avoir quitté momentanément la modélisation de l'adhérence en faisant un « détour imposé » par la mesure et la caractérisation de la microtexture, je disposais donc suffisamment d'éléments sur cette échelle submillimétrique pour entamer des travaux de modélisation du terme $\mu_{\text{microtexture}}$ (voir 3.3.1). Cette recherche a donc été conduite dans le prolongement de la collaboration avec le LTDS. La connaissance des descripteurs de microtexture et leur corrélation avec le frottement ne donnent en effet qu'une appréciation qualitative de l'apport de la microtexture à l'adhérence. Un modèle théorique permet de mieux comprendre comment ces descripteurs contribuent à l'adhérence et surtout, nous espérons, apporter quelques éléments de réponse à la question posée au début de ce paragraphe 3.4 sur l'échelle pertinente de la microtexture.

Avec Christian Stéfani, chercheur au LCPC, j'ai développé et validé un modèle rhéologique décrivant le contact entre un pavé de gomme et une surface de chaussée. On se situe donc à

une échelle complémentaire à celle décrite par le modèle de Stribeck (aire de contact). Ce modèle est appelé dans la suite « modèle de Stéfani ».

S'agissant d'un modèle dédié à l'étude de l'influence de diverses textures routières, et à priori non pas celle de l'influence de formulations de gomme, la simplification du modèle a été faite au niveau de la gomme : le pavé de gomme est représenté par un solide de Kelvin dont le comportement viscoélastique est décrit par l'association d'un ressort et d'un amortisseur.

La géométrie de base du modèle est présentée dans la Figure 27. Il s'agit d'étudier la variation des efforts horizontal et vertical exercés par un solide de Kelvin sur le profil ABCD. Ce profil représente en réalité un motif « moyen » : les valeurs des paramètres L_1 , L_2 , L_3 , θ_{12} , α_1 et α_2 sont des moyennes calculées sur un ensemble de profils de surface de chaussée.

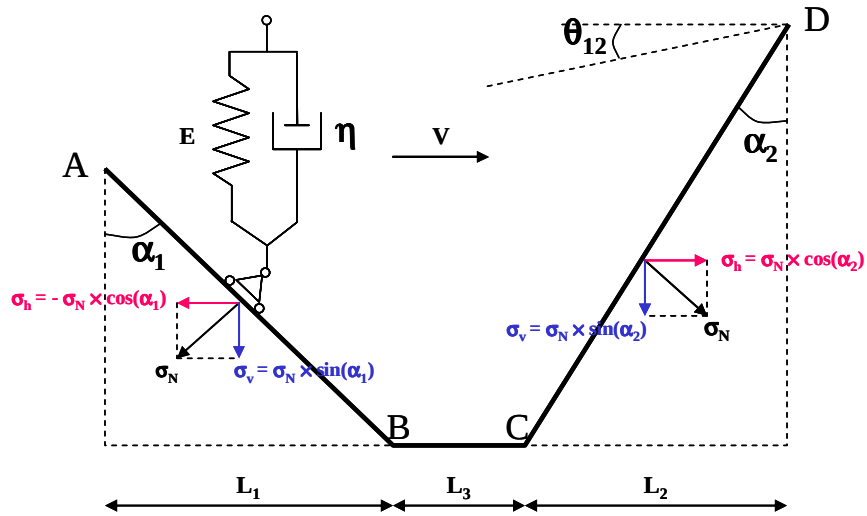


Figure 27. Géométrie de base du modèle de Stéfani

Le solide de Kelvin avançant à une vitesse V est en roulement sans frottement sur le profil. Le modèle suppose donc que le frottement généré lors de ce passage provient uniquement de la déformation du solide de Kelvin. Cette hypothèse revient à supposer que le frottement pneumatique/chaussée provient uniquement de la déformation de la gomme du pneumatique. Il s'agit d'une hypothèse réaliste car en présence d'eau sur une surface de chaussée, les liaisons moléculaires entre la gomme et la chaussée étant peu nombreuses voire inexistantes, la composante d'adhésion du frottement devient négligeable.

S'agissant d'un solide de Kelvin, la relation entre la contrainte et la déformation s'écrit :

$$(25) \quad \sigma = E\varepsilon + \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$$

Sur le segment AB, la déformation s'écrit (Figure 28) :

$$(26) \quad \varepsilon = h_0 + h(t) = h_0 + \frac{L_1 - Vt}{\tan(\alpha_1)}$$

L'équation (26) exprime le fait que la déformation à un instant t , $t = 0$ en A, est égale à la hauteur à laquelle se trouve le solide de Kelvin sur la pente AB, ajoutée d'une déformation initiale h_0 . On obtient alors :

$$(27) \quad \sigma = \frac{E}{\tan(\alpha_1)} [h_0 \tan(\alpha_1) + L_1 - V(t + \tau)]$$

De même, sur le segment CD, la déformation s'écrit (Figure 28) :

$$(28) \quad \varepsilon = h_0 + h(t) = h_0 + \frac{Vt - L_1 - L_3}{\tan(\alpha_2)} ; \text{ soit :}$$

$$(29) \quad \sigma = \frac{E}{\tan(\alpha_2)} [h_0 \tan(\alpha_2) + V(t + \tau) - L_1 - L_3]$$

Le modèle définissait ensuite des conditions de contact entre le solide de Kelvin et les tronçons AB, BC et CD en fonction de la vitesse V ; l'une des configurations possibles est illustrée dans la Figure 28, où le solide décolle du profil entre A et B, survole le tronçon BC avant de reprendre le contact avec le profil sur le tronçon CD. Les durées de contact entre le solide et le profil ont été calculées (t_1 et t_2 dans la Figure 28).

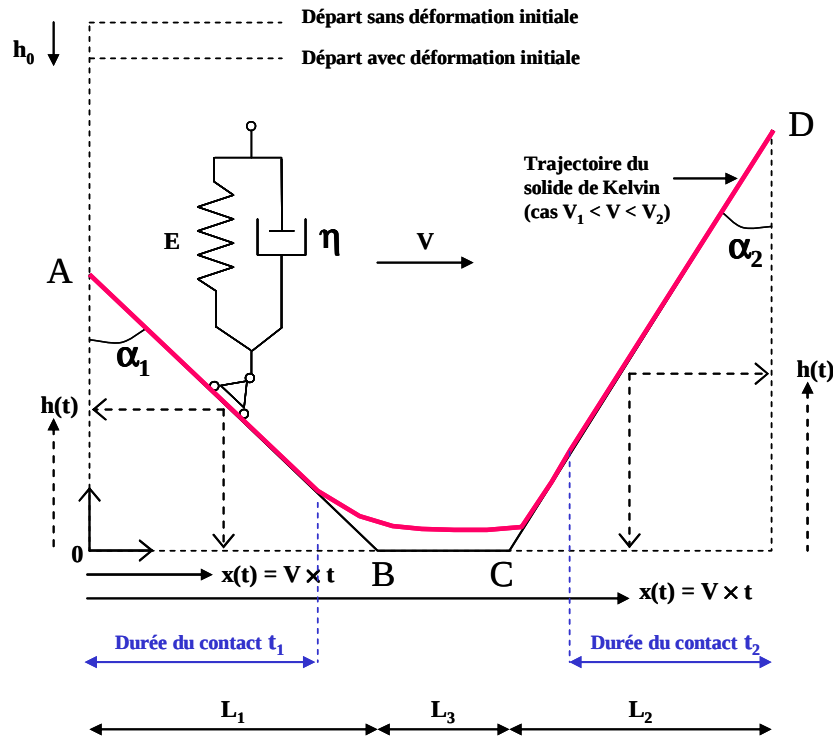


Figure 28. Cinématique du contact solide de Kelvin – « motif »

Désignant f_v et f_h respectivement l'effort vertical et l'effort horizontal résultant du passage du solide de Kelvin sur le profil, le frottement résultant de la déformation du solide est donné par la relation suivante :

$$(30) \quad \mu = \frac{f_h}{f_v}$$

Le calcul de f_v s'effectue en intégrant sur les durées de contact t_1 et t_2 la contrainte verticale σ_v . Le calcul de f_h s'effectue également par intégration sur t_1 et t_2 de la contrainte horizontale σ_h . La contrainte verticale n'est autre que celle donnée respectivement par les expressions (27) et (29) sur AB et CD. Compte tenu des conditions de contact, roulement sans frottement, il existe une relation reliant les contraintes σ_v et σ_h (Figure 27) :

$$(31) \quad \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{1}{\tan(\alpha_i)}$$

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

Le calcul de l'effort vertical moyen f_v est donné par l'expression suivante :

$$(32) \quad f_v = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{t_1} \frac{E}{\tan(\alpha_1)} [h_0 \tan(\alpha_1) + L_1 - V(t + \tau)] dt + \int_{T-t_2}^T \frac{E}{\tan(\alpha_2)} [h_0 \tan(\alpha_2) + V(t + \tau) - L_1 - L_3] dt \right\}$$

avec $T = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{V}$: durée globale du passage du solide de Kelvin sur le profil ABCD.

Soit, après changement de variable :

$$(33) \quad f_v = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{t_1} \frac{E}{\tan(\alpha_1)} [h_0 \tan(\alpha_1) + L_1 - V(t + \tau)] dt + \int_0^{t_2} \frac{E}{\tan(\alpha_2)} [h_0 \tan(\alpha_2) + L_2 - V(t - \tau)] dt \right\}$$

Le calcul de l'effort horizontal moyen f_h est donné par l'expression suivante :

$$(34) \quad f_h = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{t_1} \frac{E}{[\tan(\alpha_1)]^2} [h_0 \tan(\alpha_1) + L_1 - V(t + \tau)] dt + \int_{T-t_2}^T \frac{E}{[\tan(\alpha_2)]^2} [h_0 \tan(\alpha_2) + V(t + \tau) - L_1 - L_3] dt \right\}$$

Soit, après changement de variable :

$$f_h = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{t_1} \frac{E}{[\tan(\alpha_1)]^2} [h_0 \tan(\alpha_1) + L_1 - V(t + \tau)] dt + \int_0^{t_2} \frac{E}{[\tan(\alpha_2)]^2} [h_0 \tan(\alpha_2) + L_2 - V(t - \tau)] dt \right\}$$

Le modèle de Stéfani a été écrit initialement dans le but d'exprimer les efforts de contact en fonction de la géométrie d'un profil de surface. J'ai cherché donc à coupler ce modèle avec la méthode d'analyse d'indenteurs en prenant $L_3 = 0$ dans les calculs. On retrouve en effet deux moitiés d'indenteurs consécutifs, avec la relation suivante entre l'angle θ_{12} (Figure 27) et les angles α_1 et α_2 :

$$(35) \quad \tan(\theta_{12}) = \frac{L_2 \cot g(\alpha_2) - L_1 \cot g(\alpha_1)}{L_1 + L_2}$$

J'ai supposé en outre que $L_1 = L_2$, ce qui permet de calculer la $\cot g(\alpha_2)$ à l'aide de la relation (35). En prenant comme hypothèses simplificatrices : $L_3 = 0$, $L_1 = L_2 = L$, et $h_0 = 0$, on obtient finalement les expressions suivantes pour f_v et f_h :

$$(36) \quad f_v = \frac{VE}{2L} \left[\frac{Lt_1}{\tan(\alpha_1)} + \frac{Lt_2}{\tan(\alpha_2)} - \frac{V}{2} \left(\frac{t_1^2}{\tan(\alpha_1)} + \frac{t_2^2}{\tan(\alpha_2)} \right) - V\tau \left(\frac{t_1}{\tan(\alpha_1)} - \frac{t_2}{\tan(\alpha_2)} \right) \right]$$

et

$$f_h = \frac{VE}{2L} \left[\frac{Lt_2}{[\tan(\alpha_2)]^2} - \frac{Lt_1}{[\tan(\alpha_1)]^2} - \frac{V}{2} \left(\frac{t_2^2}{[\tan(\alpha_2)]^2} - \frac{t_1^2}{[\tan(\alpha_1)]^2} \right) + V\tau \left(\frac{t_2}{[\tan(\alpha_2)]^2} + \frac{t_1}{[\tan(\alpha_1)]^2} \right) \right]$$

Un exemple de comparaison entre le calcul du modèle de Stéfani et la mesure est montré dans la Figure 29. On peut noter une relation étroite entre le calcul et la mesure (points « noirs »). Cependant, les prévisions sont inférieures aux mesures ; l'écart est plus important sur des surfaces à frottement élevé.

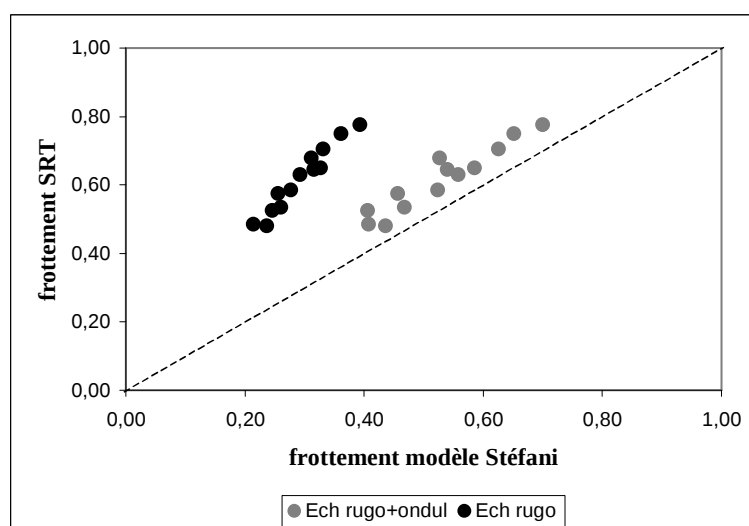


Figure 29. Validation du modèle de Stéfani sur des surfaces constituées de mosaïque de gravillons (10.7, réf. 2)

Lorsqu'un pavé de gomme parcourt un profil, il est déformé localement par chaque indenteur du profil et globalement par la répartition des indenteurs sur le profil. On peut donc supposer que le frottement global, celui qui est mesuré, tient compte de cette déformation à deux échelles. En m'inspirant de la méthode de décomposition en motifs, j'ai défini deux échelles de profil (Figure 30):

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

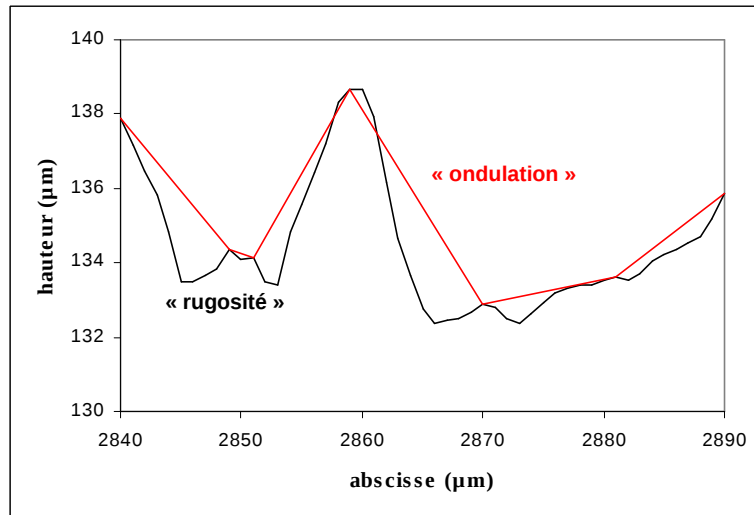


Figure 30. Echelles de texture définies par la méthode des motifs

Le calcul du frottement pouvait alors être effectué sur deux motifs moyens : celui déterminé à partir de l'analyse du profil d'origine, appelé frottement de l'échelle « rugosité », et celui déterminé à partir de l'analyse du profil d'enveloppe, appelé frottement de l'échelle « ondulation ». Les termes « rugosité » et « ondulation », bien que peu adaptés à l'étude de la texture des surfaces de chaussée, ont été conservés ici. Le frottement global a été supposé égal à la somme des deux frottements issus de ces deux échelles. En appliquant cette hypothèse, j'ai obtenu un nouvel ensemble des points (« gris ») parallèle et proche de la bissectrice du graphique (Figure 29), vérifiant l'hypothèse d'une contribution multi échelles de la texture au frottement. L'interaction entre échelles a été prise en compte d'une manière implicite dans le calcul d'un motif moyen : à l'échelle d'un profil par exemple, l'angle α représente la géométrie des indenteurs et l'angle θ représente la pente locale du profil d'enveloppe.

J'ai pu noter que sans la prise en compte du relief ($\theta = 0$ dans les calculs), le coefficient de frottement calculé par le modèle était quasi constant pour toutes les surfaces et de l'ordre de 0,01. Ce calcul justifiait donc l'importance du relief dans la génération du frottement d'hystérésis.

Il restait à savoir, utilisant le modèle de Stéfani, quelles sont les dimensions d'échelles de microtexture intervenant dans la génération du frottement ? Cette information a été obtenue en regardant l'ordre de grandeur de la largeur des indenteurs détectés aux échelles de rugosité et d'ondulation : sur l'ensemble des échantillons étudiés, la valeur moyenne des largeurs d'indenteurs était respectivement de quelques dizaines et quelques centaines de microns. J'ai considéré que ces ordres de grandeur, même s'ils confirmaient ceux présentés dans le paragraphe 3.4.1.1, n'étaient pas suffisants. J'ai donc développé une autre approche de modélisation, en espérant qu'elle apportera des réponses plus robustes à la question d'échelles.

3.4.3.2 Un modèle mécanique pour comprendre la contribution multi-échelles

J'ai développé un modèle mécanique en collaboration avec la société Michelin afin de mettre en évidence la contribution multi-échelles de la microtexture. Ce modèle sera intitulé par la suite « modèle d'indentation ».

Un corps M soumis à un effort vertical F_z et un effort horizontal F_x sur une surface glissante inclinée d'un angle α (Figure 31) est en équilibre si (on néglige le poids propre de M) :

$$(37) \quad \vec{F}_x + \vec{F}_z = \vec{R}$$

Avec $\vec{R}$: réaction normale du sol.

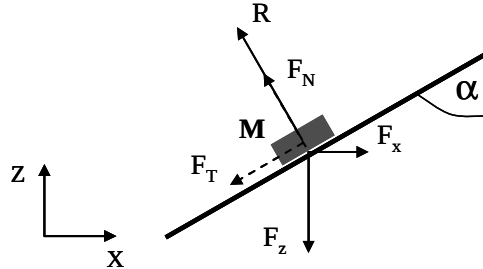


Figure 31. Frottement sur une surface inclinée glissante

La décomposition de l'équation (37) sur le plan incliné donne (le vecteur $\vec{R}$ est normal au plan incliné) : $-F_z \cos \alpha + F_x \sin \alpha = 0$; soit :

$$(38) \quad \frac{F_x}{F_z} = \cot g \alpha$$

La $\cot g \alpha$ correspond donc à un coefficient de frottement sur une surface glissante inclinée d'un angle α . Lorsque la surface inclinée présente une rugosité générant un coefficient de frottement μ_0 , aux forces $\vec{F}_x$ et $\vec{F}_z$ s'ajoutent deux forces $\vec{F}_T$ et $\vec{F}_N$ (Figure 31) telles que :

$$(39) \quad \frac{F_T}{F_N} = \mu_0$$

Le bilan d'équilibre des forces donne (par projection sur respectivement les axes X et Z) :

$$(40) \quad \mu = \frac{F_x}{F_z} = \frac{\cos \alpha + \mu_0 \sin \alpha}{\sin \alpha - \mu_0 \cos \alpha}$$

Le problème précédent est transposé au cas d'un pavé de gomme glissant sur un indenteur d'angle 2α (Figure 32). Sur la pente ascendante (appelée aussi « pente d'entrée »), le problème est identique au cas précédent, c'est à dire :

$$(41) \quad F_{xe} = \frac{F_{ze} (\cos \alpha + \mu_0 \sin \alpha)}{\sin \alpha - \mu_0 \cos \alpha}$$

avec F_{xe} : effort suivant X sur la pente d'entrée ;

F_{ze} : effort suivant Z sur la pente d'entrée.

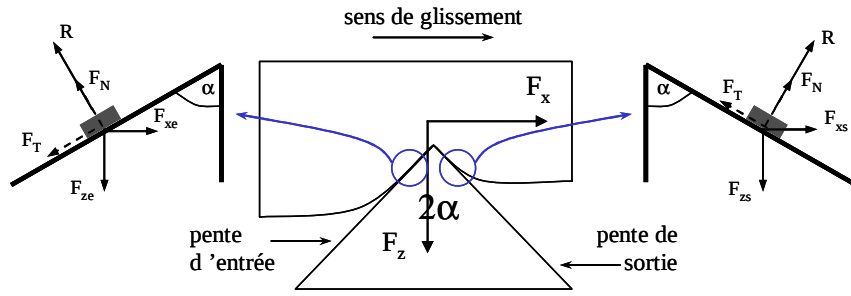


Figure 32. Pavé de gomme glissant sur une aspérité

Sur la pente descendante (appelée aussi « pente de sortie »), l'équilibre des forces donne :

$$(42) \quad F_{xs} = \frac{F_{zs}(\mu_0 \sin \alpha - \cos \alpha)}{\sin \alpha + \mu_0 \cos \alpha}$$

avec F_{xs} : effort suivant X sur la pente de sortie ;

F_{zs} : effort suivant Z sur la pente de sortie.

On a aussi : $F_x = F_{xe} + F_{xs}$ et $F_z = F_{ze} + F_{zs}$; soit :

$$(43) \quad \mu = \frac{F_x}{F_z} = \frac{F_{xe} + F_{xs}}{F_z} = h \frac{\cos \alpha + \mu_0 \sin \alpha}{\sin \alpha - \mu_0 \cos \alpha} - (1-h) \frac{\mu_0 \sin \alpha - \cos \alpha}{\sin \alpha + \mu_0 \cos \alpha}$$

avec : $h = \frac{F_{ze}}{F_z}$.

Le facteur h est défini comme un coefficient de partage de la charge appliquée à l'indenteur. Sur un matériau élastique, h doit prendre la valeur de 0,5, exprimant une déformation symétrique du pain de gomme. Sur un matériau viscoélastique, le déphasage entre contrainte et déformation induit une déformation dissymétrique du pain de gomme avec une surcharge sur la pente d'entrée. Le facteur h peut donc être relié aux caractéristiques viscoélastiques de la gomme. Prenant un solide de Kelvin pour modéliser la gomme, on obtient la relation suivante [21] :

$$(44) \quad h = 0,5 + \frac{2\delta}{\pi}$$

Avec δ : angle de déphasage entre la contrainte et la déformation sur un matériau viscoélastique.

Les valeurs de $\tan \delta$ varient usuellement entre 0,1 et 1 ; elles sont fonction de la vitesse de glissement, de la température et de la déformation. S'agissant d'un modèle visant à différencier différentes microtextures, une valeur arbitraire de $\tan \delta$ pouvait suffire ; elle a été

prise égale à la moyenne de la plage usuelle, soit 0,6. La relation (44) devenait alors :

$$h = 0,5 + \frac{2\delta}{\pi} \approx 0,5 + \frac{2}{\pi} \frac{\pi}{6} \approx 0,83$$

Le frottement de surface μ_0 représente en réalité le frottement généré par des indenteurs situés à une échelle plus fine. Désignant (i) l'échelle représentée par un profil de chaussée et (i-1) l'échelle des indenteurs plus fins, on peut écrire :

$$(45) \quad \mu_i = h \frac{\cos \alpha_i + \mu_{0,i-1} \sin \alpha_i}{\sin \alpha_i - \mu_{0,i-1} \cos \alpha_i} - (1-h) \frac{\mu_{0,i-1} \sin \alpha_i - \cos \alpha_i}{\sin \alpha_i + \mu_{0,i-1} \cos \alpha_i}$$

Cette relation suppose que le facteur h ne dépend pas de l'échelle de texture. Le frottement $\mu_{0,i-1}$ peut de nouveau s'écrire comme une fonction de l'angle α_{i-1} caractérisant l'indenteur moyen de l'échelle (i-1). Le modèle d'indentation permettrait ainsi de prendre en compte la contribution de différentes échelles de texture au frottement.

Une méthode d'analyse de profils a été développée également – en collaboration avec la société Michelin – pour fournir des données d'entrée au modèle. Cette méthode est semblable dans son esprit à celle conduite dans la collaboration avec le LTDS. Il s'agissait en effet d'identifier des indenteurs sur un profil de chaussée et d'en déterminer l'angle au sommet. Cependant, il existe des différences notables entre les deux approches sur les aspects de détection des indenteurs et de définition des échelles.

Quatre échelles ont été définies en fonction de la largeur de base (2L) des indenteurs : 10 μm – 100 μm – 1 mm – 10 mm. Un indenteur détecté à une échelle i (i = 1 à 4) doit donc avoir une largeur de base au moins égale à $2L_i$, avec $2L_i = 10 \mu\text{m}$, 100 μm , 1 mm, 10 mm pour i = 1, 2, 3 et 4 respectivement.

Un point de profil ne peut être considéré comme sommet (respectivement vallée) d'indenteur à l'échelle $2L_i$ que s'il constituait un maximum (respectivement minimum) local centré sur une portion de profil de largeur au moins égale à $2L_i$. Par exemple, sur un profil échantillonné à 1 μm , un sommet d'indenteur à l'échelle $2L_1 = 10 \mu\text{m}$ doit avoir une hauteur supérieure à celles d'au moins 5 points à gauche et à celles d'au moins 5 points à droite (Figure 33). Cette méthode de détection est plus sélective que celle du paragraphe 3.4.2.4. En effet, les échelles étant définies à l'avance, les indenteurs fortement dissymétriques ne sont pas pris en compte dans le contact. La notion de relief n'est pas non plus prise en compte.

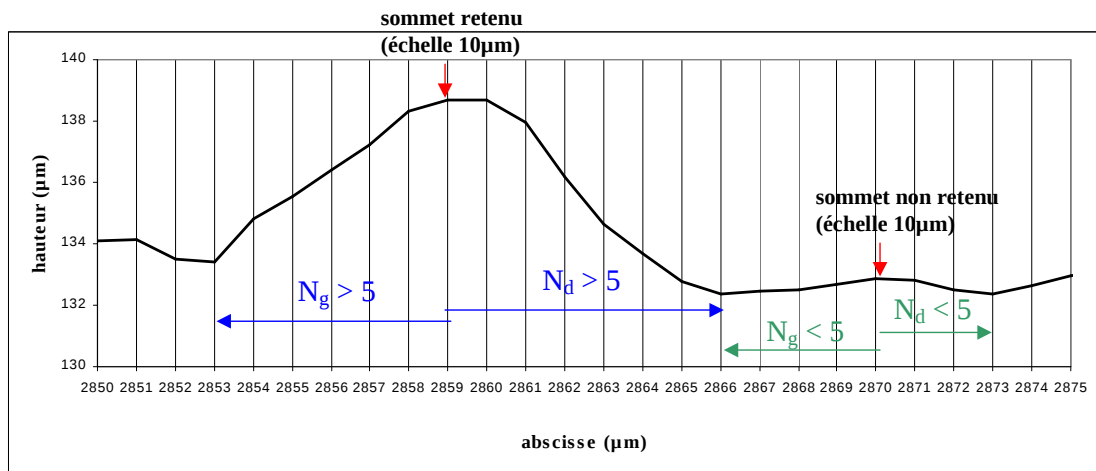


Figure 33. Illustration du critère de sélection des sommets de profil (exemple d'une sélection à l'échelle 10 μ m)

Légendes

- ✓ N_g : nombre de points compris entre le sommet détecté et la vallée de gauche
- ✓ N_d : nombre de points compris entre le sommet détecté et la vallée de droite

Le modèle d'indentation a été appliqué aux profils de chaussée en considérant quatre échelles : 10 μ m (échelle 1), 100 μ m (échelle 2), 1 mm (échelle 3) et 10 mm (échelle 4). Le frottement mesuré est supposé être résultant de la contribution de ces quatre échelles. Les résultats sont illustrés à la Figure 34 pour des surfaces constituées de mosaïques de gravillons.

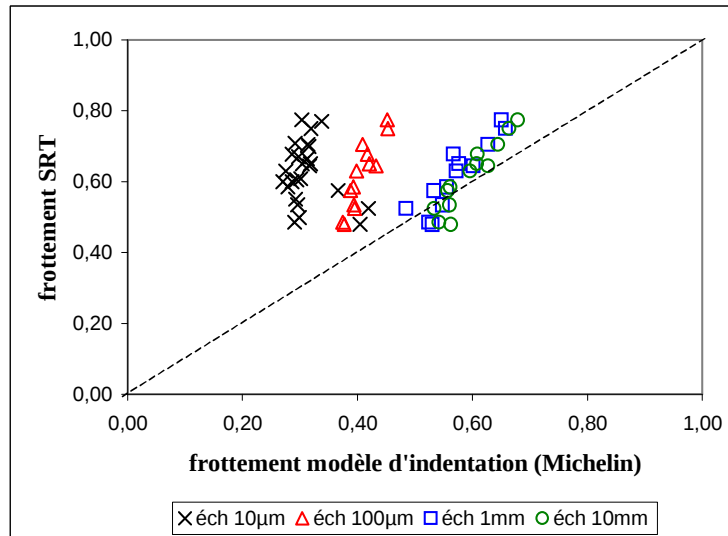


Figure 34. Validation du modèle d'indentation sur des surfaces constituées de mosaïques de gravillons

On voit que, excepté trois échantillons, la valeur du frottement calculé à l'échelle de 10 μ m est constante et égale à environ 0,3. Ce premier renseignement semble montrer que l'échelle 10 μ m contribue au frottement mais ne différencie pas encore la microtexture des surfaces. Il y a ensuite une bonne corrélation linéaire entre le frottement calculé aux échelles 2, 3 et 4 et le frottement mesuré, signifiant que le frottement généré à ces échelles permet d'expliquer les variations du frottement mesuré. Les nuages de points pour les échelles 3 et 4 sont même très proches de la bissectrice signifiant une bonne concordance entre le calcul et la mesure. Ce résultat confirme la pertinence du modèle. On voit aussi que l'apport de l'échelle de 10 mm n'est pas significatif.

3.4.3.3 Quel modèle retenir ?

Une comparaison entre le modèle de Stéfani et le modèle d'indentation est montrée dans la Figure 35. Sur cet ensemble d'échantillons, on voit que les valeurs de frottement calculées par les deux modèles sont significatives vis à vis de la mesure ($r^2 \approx 0,9$). Cependant, les équations de régression, notamment la pente des droites de régression, montrent que les prévisions du modèle de Stéfani sont plus proches de la mesure que celles du modèle d'indentation.

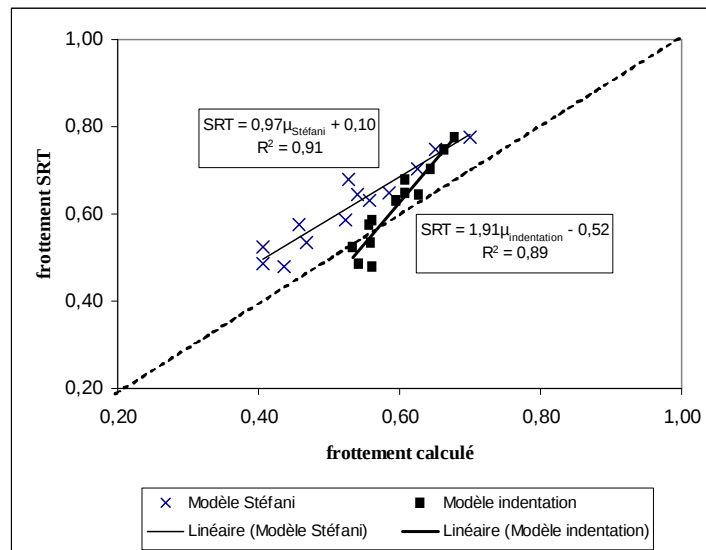


Figure 35. Comparaison modèle d'indentation – modèle de Stéfani

Dans les travaux ultérieurs, j'avais donc employé davantage le modèle de Stéfani pour évaluer l'apport de la microtexture à l'adhérence. Les résultats ne sont pas toujours aussi concluants que ceux illustrés tout au long de ce paragraphe, notamment lorsque les calculs sont effectués sur des profils de surface de chaussée.

3.4.4 Echelles influentes

3.4.4.1 *Apport d'une approche fractale*

Le modèle d'indentation permettait donc de quantifier la contribution de différentes gammes d'échelles constituant la microtexture. Néanmoins, nous ne savons toujours pas jusqu'à quelle finesse faut-il étudier la microtexture ? De plus, la résolution des techniques basées sur l'imagerie (3.4.1.4) étant encore limitée à 50 μm , comment aller chercher l'information manquante des échelles inférieures ?

Pour répondre à ces questions, j'avais donc cherché une approche pour « créer » des échelles manquantes sur un profil de surface lorsque la mesure ne permet pas de les obtenir. L'approche fractale me paraissait séduisante à ce titre car, d'après la littérature de vulgarisation que j'ai pu faire, elle déploie un ensemble de règles à respecter dans la construction des échelles. De 2001 à 2004, en collaboration avec le professeur Jacques Levy Vehel de l'IRCCyN, j'ai donc encadré la thèse de Pierrick Legrand dédiée à l'application des théories fractales à l'analyse des profils de surface de chaussée.

3.4.4.2 *Création d'échelles par interpolation*

La problématique traitée dans la thèse de Pierrick Legrand était posée simplement de la manière suivante : serait-il possible de générer des échelles réalistes mais non-accessibles par la mesure ? Concrètement, disposant d'un profil $z(x)$ échantillonné avec un pas de $\Delta x = 10 \mu\text{m}$, serait-il possible d'obtenir le même profil mais échantillonné avec un pas plus fin, par exemple $\Delta x = 1 \mu\text{m}$?

En réalité, il a fallu développer un « arsenal » d'outils mathématiques pour aboutir à cette finalité. La démarche adoptée consistait en trois étapes :

- démontrer que les profils ont une structure fractale ;
- développer une technique permettant d'ajouter des échelles tout en conservant la même structure fractale ;
- valider les nouveaux profils.

Pour démontrer l'existence d'une structure fractale, nous avons appliqué une transformation en ondelettes dites « dyadiques » aux profils puis, à chaque échelle, calculé l'énergie des profils. Rappelons que l'énergie E_z d'un signal $z(x)$ est définie par :

$$(46) \quad E_z = \int |z(x)|^2 dx$$

Appelant E_{zj} l'énergie au niveau j d'un profil $z(x)$, nous avons observé que E_{zj} est proportionnelle à $C \cdot j^\alpha$, avec C, α : constantes (Figure 36). Cette observation permettait de conclure que les profils de surface étudiés ont une structure fractale.

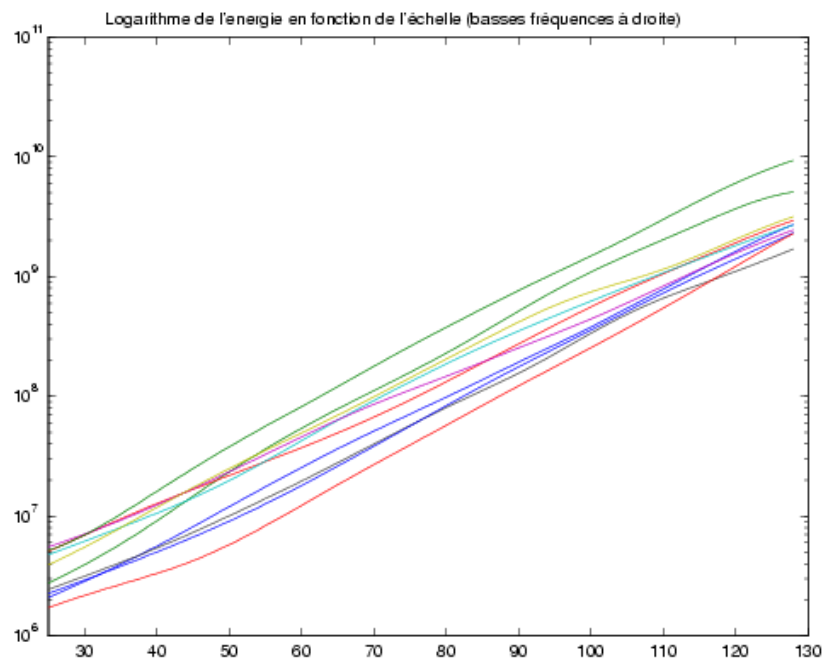


Figure 36. Démonstration de l'existence d'une structure fractale dans les profils de microtexture
(la fonction de puissance devient linéaire sur une échelle logarithmique)

Pour quantifier l'irrégularité en chaque point d'un profil, nous avons utilisé la notion d'« exposant de Hölder ». En théorie fractale, une fonction $z(x)$ est dite « hölderienne d'exposant α en x_0 » s'il existe une constante C_α telle que pour tout x :

$$(47) \quad |z(x_0) - z(x)| \leq C_\alpha |x_0 - x|^\alpha$$

L'inégalité (47) implique qu'au voisinage du point $(z(x_0), x_0)$, le profil $z(x)$ se trouve inscrit dans deux courbes d'équations :

$$(48) \quad z(x) = \pm C_\alpha |x_0 - x|^\alpha$$

Un exemple de courbes d'enveloppe est montrée dans la Figure 37.

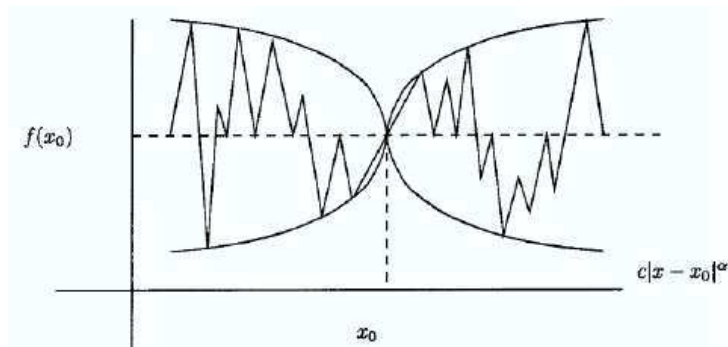


Figure 37. Exemple d'une fonction

L'ajout d'une nouvelle échelle – par exemple pour obtenir un point tous les 5 μm – consistait à déterminer des coefficients d'ondelettes pour cette échelle en conservant la même valeur de l'exposant de Hölder à toutes les échelles. Un exemple de profil généré utilisant cette règle est montré dans la Figure 38.

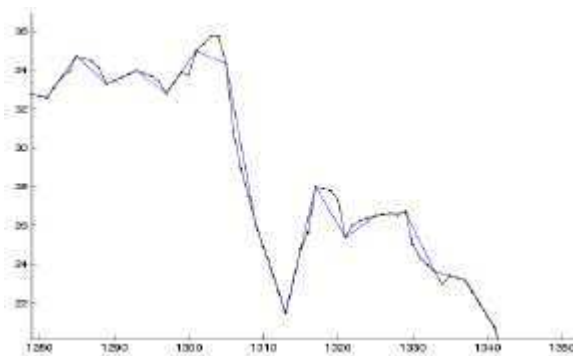


Figure 38. Exemple de profil généré (noir, échantillonné à 2,5 μm) à partir d'un profil mesuré (bleu, échantillonné à 10 μm)

Il ne nous a pas été possible de comparer le profil « virtuel » généré avec un pas d'échantillonnage de 2,5 μm à un profil « vrai » mesuré avec le même pas d'échantillonnage. En effet, le capteur permettant de mesurer des profils avec un pas de 2,5 μm n'a qu'une faible dynamique verticale (0,35 mm), qui limite en conséquence la longueur de mesure des profils (quelques millimètres). Cette longueur n'était pas compatible avec celle des profils générés (75 mm).

La validation de notre méthode de génération d'échelles passait donc par une comparaison de la corrélation entre le frottement mesuré – au pendule SRT – et le frottement calculé, utilisant le modèle de Stéfani (3.4.3.1), d'une part sur des profils mesurés avec un pas d'échantillonnage de 10 μm , et d'autre part sur des profils générés avec un pas d'échantillonnage de 2,5 μm . Cette comparaison est montrée dans la Figure 39.

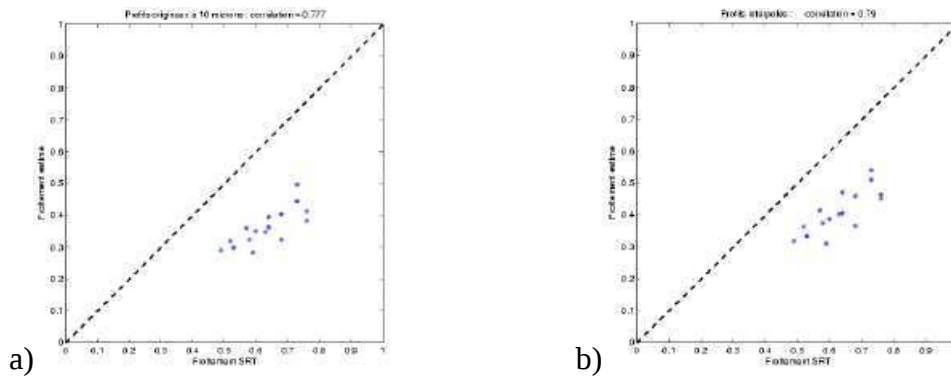


Figure 39. Comparaison frottements mesuré/calculé a) à partir de profils échantillonnés à 10 µm ; b) à partir de profils échantillonnés à 2,5 µm par interpolation

Les coefficients de corrélation ne sont pas très différents : 0,77 pour des profils mesurés et 0,79 pour des profils générés. En réalité, nous n'avons rien démontré : des valeurs semblables du coefficient de corrélation ne signifient obligatoirement pas que les profils générés sont « faux » ; elles pourraient signifier simplement que l'échelle de 10 µm était suffisamment explicative du frottement SRT, ou que l'apport de l'échelle de 2,5 µm n'était pas significative.

3.4.5 Faut-il aller plus loin dans l'étude de la microtexture ?

Les résultats montrés dans les paragraphes précédents montrent que nous avons progressé dans les domaines :

- de la caractérisation de la microtexture, avec comme produit la méthode des indenteurs développée avec le LTDS ;
- de la modélisation de la relation entre l'adhérence et la microtexture, avec comme produits deux modèles développés respectivement au LCPC et avec la société Michelin ;
- de la mesure de la microtexture, avec notamment comme produit le système basé sur l'analyse d'images développé avec le SIC.

Ces produits n'étaient pas exploités comme il se doit afin d'être mieux adaptés à l'usage attendu. Je butais ici sur la question déjà posée à la fin de ma thèse : quelle était la finalité de cette étude ? Même si les objectifs scientifiques étaient clairement posés, les utilisateurs finaux n'étaient pas identifiés au démarrage. La recherche sur la microtexture était par ailleurs menée presque indépendamment des autres projets en cours sur l'adhérence. Le contenu des produits n'était donc pas ajusté dès le départ afin que ces produits soient utilisables dès la fin du projet. Les différentes collaborations avec des partenaires extérieurs (LTDS, Michelin, IRCCyN) m'ont permis d'aller assez dans la partie théorique, mais il manquait un volet de recherche dédié aux matériaux routiers – granulats en particulier – et aux matériels de mesure ; le compromis théorie/expérimentation n'était donc pas trouvé.

Le sujet est vaste et les premiers acquis nécessitaient d'être mieux approfondis. Cependant, je suis arrivé au constat que sans une évolution significative des technologies de mesure, nous ne pourrions pas aller plus loin dans l'exploration de cette échelle. L'utilisation des fractales pour compléter les capteurs de mesure pourrait être une voie de recherche prometteuse mais, faute de moyens de validation adéquats, je ne pouvais pas poursuivre dans cette voie.

Il me paraissait donc plus raisonnable de mettre provisoirement en veille la microtexture et de m'investir dans d'autres aspects de l'adhérence encore aussi peu explorés. Il s'agit de l'évolution de l'adhérence dans le temps : quels sont les mécanismes sous-jacents ? Comment la prédire ?

3.5 Evolution de l'adhérence

Nous venons d'avoir un aperçu de la complexité des recherches sur la relation entre la texture des revêtements de chaussée et l'adhérence. A cette complexité s'ajoute le fait que l'adhérence des chaussées évolue dans le temps sous l'action du trafic et du climat. Connaître à l'avance cette évolution est primordial :

- pour un gestionnaire d'infrastructure routière afin de planifier l'entretien de son réseau ;
- pour une entreprise routière afin de garantir les performances de son produit tout en optimisant l'utilisation des matériaux.

A partir de l'année 2000, j'ai donc commencé à m'intéresser au problème d'évolution de l'adhérence. Démarrée d'une manière discontinue, avec des stages de fin d'études de Simon Vidal et Cyril Boissinot (6.1) et le projet européen TROWS (7.1.4), cette activité a été mieux structurée à partir de l'année 2002 avec le lancement d'une coopération bilatérale franco-allemande sur le sujet et la thèse de Zhen-Zhong Tang entre 2004 et 2007.

3.5.1 Généralités

3.5.1.1 Mécanismes conditionnant l'évolution de l'adhérence

L'évolution de l'adhérence d'un revêtement de chaussée bitumineuse est due à au moins quatre mécanismes :

- l'usure mécanique due au frottement entre le pneumatique et le revêtement. Le polissage est une conséquence de cette usure ;
- le décapage du bitume sous l'action de l'usure mécanique mais également du climat. La durée de la période de décapage est d'environ six mois à deux ans [22] ;
- les variations saisonnières, qui peuvent être constatées à partir d'une série de mesures de frottement réalisées sur un même revêtement à différentes époques. On constate que l'adhérence atteint généralement sa valeur la plus faible à la fin de l'été et la plus élevée pendant l'hiver [23] ;
- le vieillissement du matériau dû aux conditions climatiques (variations de température, action de l'oxygène de l'air, pluies acides, etc.), qui peut parfois améliorer l'adhérence au jeune âge. Des augmentations du niveau d'adhérence sont observées sur des routes à faible trafic en France, mais les résultats ne sont pas publiés.

A ces mécanismes on peut ajouter aussi le phénomène d'enfoncement des gravillons – ou inversement de ressuage du liant – modifiant la macrotexture de la surface.

3.5.1.2 Besoins de recherche

Malgré la nécessité reconnue de pouvoir prédire l'évolution de l'adhérence, peu d'outils existent pour assister les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre dans leur mission. Nous

allons voir dans le paragraphe qui suit que l'on ne dispose que des essais pour évaluer la résistance au polissage pour les granulats, qui ne représentent qu'une composante d'un béton bitumineux. Ces essais permettent de sélectionner des granulats assurant une bonne tenue de l'adhérence dans le temps. Cependant, ils limitent le choix des granulats, privilégiant ceux avec un PSV élevé (voir 3.5.2.1), et ne permettent pas de tester à moindre coût des solutions innovantes combinant judicieusement la formulation d'un enrobé au choix des granulats, ce qui a nécessité, en l'absence d'un essai adapté, la construction de planches expérimentales et des années d'observation.

Mes recherches dans le domaine de l'évolution de l'adhérence avaient donc pour objectif de traiter les aspects suivants :

- mettre au point un essai de laboratoire, reproduisant fidèlement l'action du trafic, pour évaluer la résistance au polissage des bétons bitumineux ;
- développer des modèles permettant de mieux comprendre les mécanismes contrôlant l'évolution de l'adhérence et leurs interactions ;
- proposer une méthode de prévision simple à utiliser.

Les produits issus sont clairement destinés aux deux types d'utilisateurs déjà mentionnés dans l'introduction (gestionnaires d'infrastructures, entreprises routières), mais aussi aux producteurs de granulats et aux laboratoires de mesure et recherche.

3.5.2 Un essai de laboratoire pour évaluer la résistance au polissage des bétons bitumineux

3.5.2.1 *Essais existants*

Dans le domaine des essais standards destinés à l'évaluation de l'évolution de l'adhérence d'une chaussée, on ne dispose que des essais pour les granulats comme l'essai de PSV. Cet essai a été développé dans les années cinquante par le Transport Research Laboratory (TRL) en Angleterre. L'essai est normalisé en Europe [24] et communément appelé « essai PSV », provenant du nom anglais « Polished Stone Value ». Une photo de la machine d'essais est montrée dans la Figure 40.

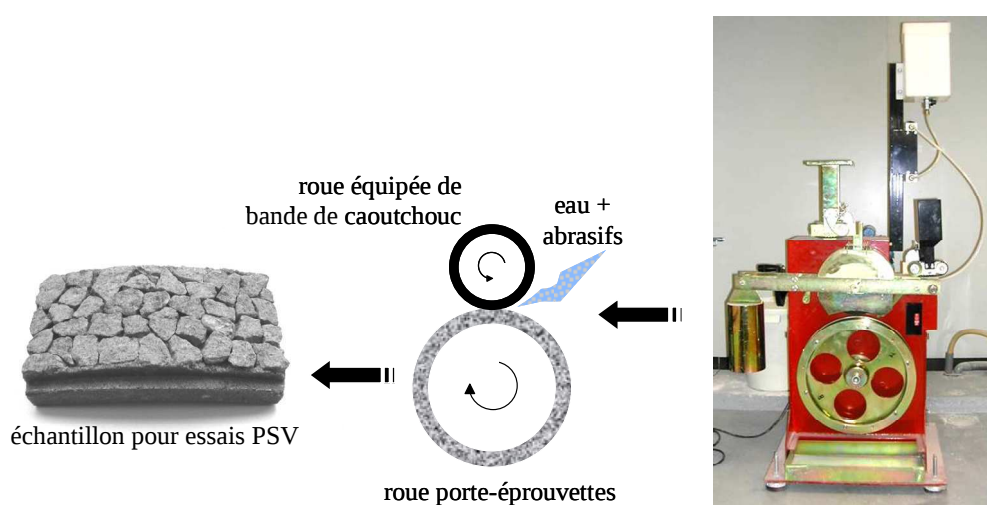


Figure 40. Machine d'essais PSV

Le polissage est réalisé par le frottement entre une roue équipée d'une bande de caoutchouc et une roue métallique sur la périphérie de laquelle des échantillons en forme incurvée sont installés (Figure 40). Pour accélérer le polissage tout en évitant l'échauffement de la bande de caoutchouc, un mélange d'eau et d'abrasifs est injecté entre les deux roues pendant l'essai. A la fin de l'essai, un coefficient de frottement est mesuré sur les éprouvettes à l'aide du pendule SRT ; le résultat est noté comme la résistance au polissage des granulats.

Malgré sa popularité, l'essai PSV ne peut pas être adapté aux bétons bitumineux à cause de la forme incurvée des éprouvettes. En France, une autre machine d'essais, appelée GRAP [25], a été développée comme une alternative à la machine PSV. L'essai de polissage GRAP est réalisé sur des échantillons rectangulaires ayant une surface plane ; une adaptation aux bétons bitumineux serait donc possible. Cependant, le principe de polissage utilise la projection d'un mélange d'eau et d'abrasifs sur la surface à polir. On est donc loin du contact pneumatique/chaussée qui est supposé être responsable de l'évolution de l'adhérence.

A l'étranger, d'autres machines ont été développées pour tester des surfaces de bétons bitumineux. Leurs principes sont basés sur le frottement entre soit un pavé de gomme (frottement en glissement) soit une roue équipée de pneus (frottement en roulement) et la surface de chaussée. Un mélange d'eau et d'abrasifs est projeté sur la surface de l'éprouvette pour minimiser l'échauffement de la gomme et accélérer l'action de polissage.

Un exemple de machine utilisant le principe de frottement en glissement est la machine « Penn State Reciprocating Polishing Machine » [26]. Le pavé de gomme est animé d'un mouvement alternatif (Figure 41). Le suivi de l'évolution de l'adhérence est effectué par des mesures de frottement au pendule SRT. L'inconvénient principal de cette machine réside dans le fait que la surface de l'éprouvette doit être sciée puis meulée avant les essais. La texture de la surface est par conséquent peu représentative de celle des routes réelles. Des résultats intéressants ont été trouvés à partir d'études de laboratoire. Cependant, aucune poursuite de ces travaux n'a été publiée, notamment sur le lien entre le laboratoire et la route. Il est donc difficile d'évaluer l'influence du sciage des surfaces sur la pertinence des simulations.

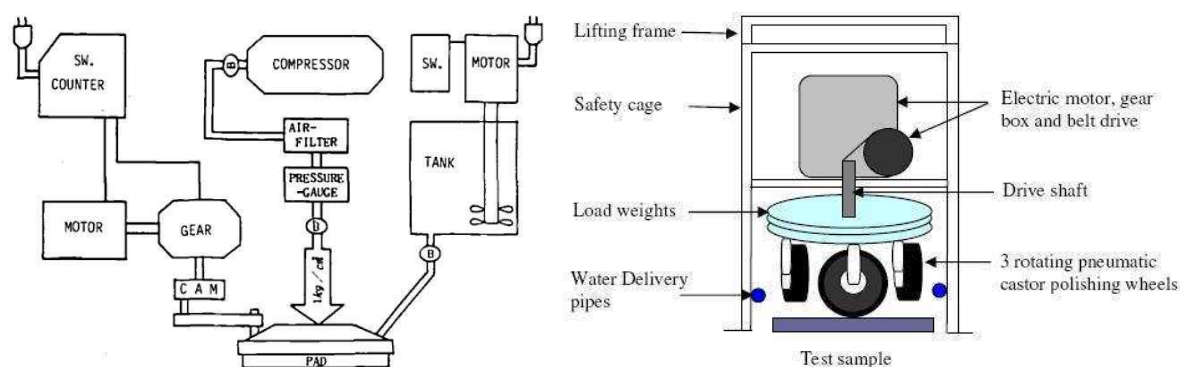


Figure 41. Machines d'essais du Penn State (gauche) et de l'Université d'Auckland (droite)

Une des machines récemment développées suivant le principe de frottement en roulement est celle de l'Université d'Auckland (UoA) [27]. Trois petites roues équipées de pneus sont utilisées pour le polissage (Figure 41). Les éprouvettes sont des plaques rectangulaires. Le suivi de l'évolution de l'adhérence est effectué par des mesures de frottement avec une machine appelée « Dynamic Friction Tester » (DFT), qui utilise un disque rotatif équipé de trois patins de gomme [28]. La machine UoA 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 publiés ne portaient que sur des essais en laboratoire.

L'inconvénient majeur des machines construites par un laboratoire, comme celles du Penn State ou de l'UoA, est leur existence en exemplaire unique. Il n'est donc pas facile de s'en procurer et de compléter les travaux déjà menés. Je me suis donc intéressé aux machines d'essais disponibles dans le commerce. Le gain de temps de développement propre et la possibilité de constituer un réseau d'utilisateurs de la même machine – favorisant l'échange des connaissances et même l'établissement d'une éventuelle norme d'essais – compensent, à mon point de vue, largement la non-correspondance entre certaines caractéristiques d'une telle machine et mes besoins de recherche.

3.5.2.2 Développement d'une procédure d'essais avec la machine de Wehner et Schulze

De 2002 à 2004, dans le cadre d'une coopération bilatérale franco-allemande, j'ai animé un sujet de recherche dédié aux méthodes d'essais en laboratoire reproduisant le processus de polissage des revêtements de chaussée. Avec mon correspondant allemand, le professeur Siegfried Huschek de l'Université de Berlin, nous avons évalué les capacités d'une machine d'essais allemande dite de « Wehner et Schulze » (WS). Le principal élément m'ayant attiré vers cette machine, commercialisée par une entreprise allemande, est l'état de surface des échantillons qu'elle a polis : les surfaces étaient recouvertes d'une fine couche de couleur noire (mélange de gomme et d'autres matières ?) que j'ai observée auparavant sur des routes fortement circulées. La comparaison visuelle entre surface testée et surface réelle constitue un élément purement subjectif mais essentiel dans le choix d'une méthode expérimentale, comme le recommande un guide destiné aux essais d'usure **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

J'ai donc décidé d'exploiter le potentiel qu'offre la machine WS dont un exemplaire a été acquis par le LCPC en 2004. S'agissant d'une machine d'essais destinée ensuite à un large public : gestionnaires, entreprises, chercheurs, etc., j'ai cherché surtout à répondre aux questions généralement posées :

- les essais sont-ils représentatifs des conditions réelles ?
- quelle est la correspondance avec des essais usuellement réalisés ?
- disposant d'un essai de polissage, quelle est l'équivalence entre la durée de polissage et le trafic réellement supporté ?
- serait-on capable de prédire l'évolution de l'adhérence avec cette machine ?

La première question est primordiale et souvent non traitée dans des travaux antérieurs. Elle sera donc étudiée dans ce paragraphe, de même que la deuxième question. Les autres questions concernent l'exploitation de la machine WS comme un outil de prévision et seront traitées dans le paragraphe suivant.

La machine de Wehner et Schulze (Figure 42) permet de polir des échantillons circulaires de 22,5 cm de diamètre et de mesurer un coefficient de frottement. Le couplage de ces deux fonctions est particulièrement utile lorsque l'on souhaite suivre l'évolution de l'adhérence avec le polissage.



Figure 42. Machine d'essais de Wehner et Schulze

Les échantillons peuvent être issus d'une chaussée réelle ou d'une plaque fabriquée en laboratoire (Figure 43, gauche). Ils peuvent également être fabriqués pour tester des granulats ; le vocable « granulats » comprend les gravillons et le sable. Il s'agit dans ce cas des disques de résine dont la surface est composée d'une mosaïque de granulats ; un exemple est montré dans la Figure 43 (droite) pour des gravillons 7,2/10 mm.



Figure 43. Echantillons pour essais Wehner Schulze : (gauche) chaussée ; (droite) granulats

Le polissage est effectué à l'aide de trois cônes métalliques enveloppés de bandes de caoutchouc et montés sur un disque rotatif (Figure 42) ; chaque rotation du disque simule alors trois passages de pneus sur la chaussée. La fréquence de rotation est de 500 tours par minute donnant une vitesse linéaire de 17 km/h. Un mélange d'eau avec des abrasifs est projeté sur la surface de l'échantillon pendant le polissage. Compte tenu de la géométrie des échantillons et de la disposition des cônes, la partie polie est une bande circulaire d'environ 6 cm de largeur (Figure 43, droite).

La machine peut être programmée pour s'arrêter automatiquement après un nombre donné de rotations. La surface de l'échantillon est lavée par la projection d'un jet d'eau – sans abrasifs – et par la rotation des cônes pendant deux minutes.

A la fin du lavage, l'échantillon est déplacé manuellement sur une glissière jusqu'à la partie de mesure de frottement. Celle-ci est constituée d'un disque rotatif muni de trois patins de caoutchouc (d'une surface de 4 cm² chacun) et disposés à 120° (Figure 42). Pour la mesure, le disque est lancé jusqu'à atteindre une vitesse de 90 km/h ; l'eau est projetée à ce moment sur la surface de l'échantillon. Lorsque la vitesse du disque atteint 100 km/h, le moteur est coupé et le disque est descendu jusqu'au contact entre les patins et l'échantillon. Une courbe de

freinage (coefficient de frottement – vitesse) est enregistrée. La valeur du coefficient de frottement enregistré à 60 km/h est utilisée pour des analyses. Ce choix conventionnel est lié à la vitesse de mesure du SCRIM ; d'autres valeurs de vitesse peuvent évidemment être utilisées.

Dans la méthodologie développée par l'Université de Berlin [29] et encore utilisée en Allemagne, l'échantillon est poli pendant 90000 passages, grenailé par un jet de sable à haute pression, puis poli pendant encore 90000 passages supplémentaires. Cette procédure vise à déterminer un niveau d'adhérence minimal. La connaissance de ce seuil est nécessaire lorsque l'on doit garantir un niveau d'adhérence après quelques années de service comme le spécifient des marchés de travaux allemands [31].

Dans la procédure que j'ai développée, appelée « procédure LCPC », la durée d'un essai est la même – 180000 passages – mais la phase de sablage est supprimée. De plus, des arrêts plus fréquents ont été ajoutés : tous les 1000 passages jusqu'à 15000, puis à 20000 ; 50000 ; 90000 et 180000 passages. Il m'était donc possible de construire une courbe d'évolution apportant des informations plus riches qu'un niveau d'adhérence final. La fréquence des arrêts est élevée au début de l'essai pour pouvoir détecter le moment où le coefficient de frottement atteint un maximum avant de décroître avec le nombre de passages. La limite des 15000 passages a été fixée d'une manière empirique, les premiers essais ayant montré que le maximum est atteint avant cette limite.

En complément du suivi de l'évolution du coefficient de frottement, j'ai ajouté des mesures de profils pour évaluer l'évolution des échelles de texture, notamment celle de la microtexture. Cette donnée n'est pas nécessaire dans le cadre d'une étude de prévision, mais utile pour la compréhension des phénomènes. Un exemple d'évolution de la microtexture suite au polissage est montré dans la Figure 44.

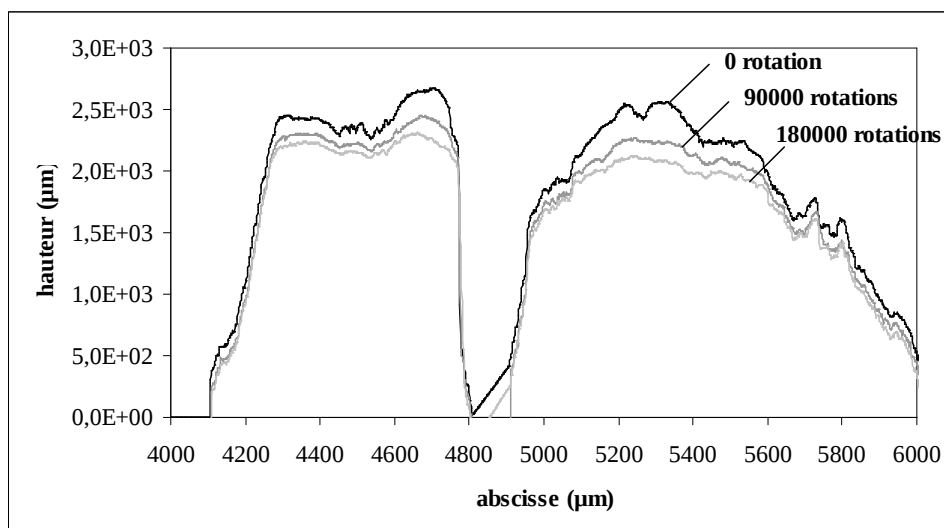


Figure 44. Exemples de suivi des profils de surface à l'échelle de la microtexture

L'un des soucis pour un utilisateur face à une nouvelle machine d'essais est le lien entre cette machine et une « référence ». Dans le domaine du polissage, il m'a paru important d'étudier le lien entre l'essai de Wehner et Schulze et l'essai PSV. Une série d'essais a donc été réalisée sur dix granulats couvrant une gamme de PSV de 40 à 70. Pour chaque granulat, la valeur de

μ_{WS} relevée à 90000 passages, noté μ_{WS90} , a été utilisée comme indicateur d'un état de polissage. Cette valeur a donc été comparée au PSV des granulats ; les résultats sont montrés dans la Figure 45. Même si la corrélation n'est pas excellente, ces premiers résultats indiquent une certaine concordance entre les deux indicateurs. La relation suivante a été établie à partir des données disponibles :

$$(49) \quad \mu_{WS90} = 1,06 \text{ PSV} - 0,20$$

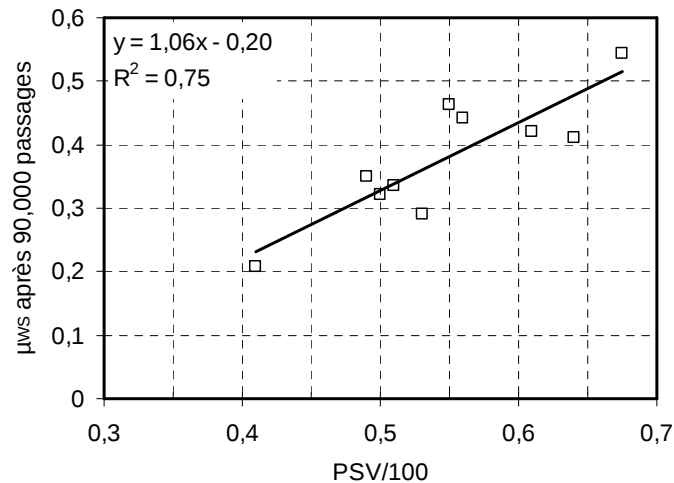


Figure 45. Lien entre essais WS et PSV [10.3, réf. 1]

3.5.2.3 Représentativité de l'essai de Wehner Schulze vis-à-vis de l'évolution de l'adhérence

Parallèlement au développement d'une procédure de polissage, j'ai cherché, en collaboration avec le LR Angers, des sites expérimentaux pour fournir des données nécessaires à l'évaluation de deux aspects :

- la comparabilité entre l'évolution de l'adhérence simulée par la machine WS et celle des routes circulées ;
- la relation entre la durée de polissage et le trafic réel.

Pour le premier aspect, nous avons trouvé trois routes nouvellement construites sur lesquelles il est possible d'effectuer des comparaisons. Pour le second aspect, nous avons choisi des sections routières faisant l'objet des innovations dans le domaine routier pour lesquelles des données de suivi d'adhérence existent depuis plus de dix ans. Ces données sont particulièrement intéressantes pour tester la faisabilité de prédire les évolutions CFL/CFT – trafic à partir d'essais de laboratoire. Au total, je disposais de 13 revêtements pour mon étude. Ce nombre peut paraître insuffisant au regard des aspects traités : comparaison laboratoire/route, relation durée de polissage – trafic, modèle de prévision. Il reflète en réalité une difficulté majeure dans l'étude de l'évolution de l'adhérence : le suivi dans le temps requiert des durées d'expérimentation relativement longues et des prélèvements périodiques d'échantillons. Il est souvent difficile d'obtenir l'accord d'un gestionnaire pour prélever un grand nombre d'échantillons dans la chaussée car il peut affecter son intégrité structurelle. Treize revêtements peuvent donc être considérés comme un bon échantillonnage.

Sur les routes nouvellement construites (3), des carottes de 22,5 cm de diamètre ont été prélevées en rive avant la mise en circulation. Ils sont destinés aux essais de polissage ou à l'évaluation de l'effet du climat sur le vieillissement naturel des enrobés. Ensuite, tous les six

mois, d'autres prélèvements ont été effectués dans la bande de roulement droite pour le suivi de l'évolution réelle de l'adhérence. Sur les routes déjà circulées (10), les carottes ont été prélevées une seule fois dans la bande de roulement droite et en rive. Elles sont destinées à l'établissement de la relation entre la durée de polissage et le trafic.

Je disposais donc des données expérimentales suivantes :

- à partir des essais de polissage (échantillons prélevés en rive et disques de granulats) : valeurs du coefficient de frottement « μ_{ws} » et le nombre correspondant de passages « N » ;
- à partir d'échantillons prélevés dans les bandes de roulement : μ_{ws} et le trafic correspondant au moment où l'échantillon est prélevé, exprimé en trafic cumulé de poids lourds « TCPL » ;
- sur les routes déjà circulées, des valeurs de CFL et CFT et le trafic correspondant, ces éléments étant issus des campagnes de suivi d'adhérence.

Pour que la comparaison entre l'évolution simulée par le polissage Wehner/Schulze et l'évolution réelle de l'adhérence soit complète, il était nécessaire d'établir une relation entre la durée du polissage, caractérisée par le nombre de passages « N », et le trafic. La littérature sur cette relation est étonnamment inexistante. Dans le cadre de la thèse de Zhen-Zhong Tang, nous avons donc proposé une relation linéaire du type :

$$(50) \quad N = k.TCPL$$

Le facteur de conversion « k » a été déterminé par ajustement entre les courbes μ_{ws} -N et μ_{ws} -TCPL. L'hypothèse forte que nous avons adoptée consistait à considérer une seule valeur de « k » pour l'ensemble des sites. Cette hypothèse d'unicité sera évidemment à vérifier dans l'avenir. En effet, de nombreux facteurs (tracé, revêtement, trafic, climat, etc.) font penser que chaque site est unique et doit avoir son propre facteur de conversion. La contre partie de l'utilisation d'un facteur spécifique aux sites est la lourdeur liée à sa détermination. Un compromis pourrait être l'utilisation d'un « k » unique à l'amont d'un projet routier et un « k » spécifique à un stade plus finalisé du projet.

Dans le cadre de notre étude, sur un ensemble de 13 sites, la valeur de « k » obtenue est de 0,024, soit :

$$(51) \quad N = 0,024 \text{ TCPL}$$

Il est important de noter que sur les treize revêtements composant notre échantillonnage, dix sont constitués de BBTM. A noter qu'il s'agit d'un échantillonnage « imposé » par la disponibilité des sites. La valeur de « k » ainsi obtenue serait donc plus adaptée à cette famille de revêtements.

Notons enfin que la relation (50) est purement empirique. En l'absence de la littérature sur le sujet, elle a été développée comme une première tentative de relier la durée d'un polissage en laboratoire au trafic réel. Dans le cadre de la thèse de Dan Zhao, lancée depuis 2008, nous cherchons à mieux préciser cette relation en modélisant les conditions de contact d'une part entre les cônes de caoutchouc de la machine de Wehner et Schulze et la surface d'une éprouvette de chaussée, et d'autre part entre des roues de véhicules légers et de poids lourds et la surface d'un revêtement de chaussée. Ce modèle de contact est ensuite couplé avec un modèle donnant l'évolution d'un profil de surface en contact avec un pavé déformable. Ce couplage permettra de justifier – ou non – de la relation (50), et de voir l'influence du trafic de

véhicules légers sur le polissage. Ce n'est évidemment qu'une première étape vers une compréhension plus complète de la relation entre la durée de polissage et le trafic, car l'influence d'autres facteurs comme le type de revêtement ou le climat doit être étudiée également.

Sur la Figure 46, on voit que la simulation en laboratoire suit fidèlement l'évolution sur route. Nous avons démontré quantitativement, dans la limite du cadre de nos expérimentations, la capacité de la machine de Wehner et Schulze de reproduire l'évolution de l'adhérence d'une route réelle.

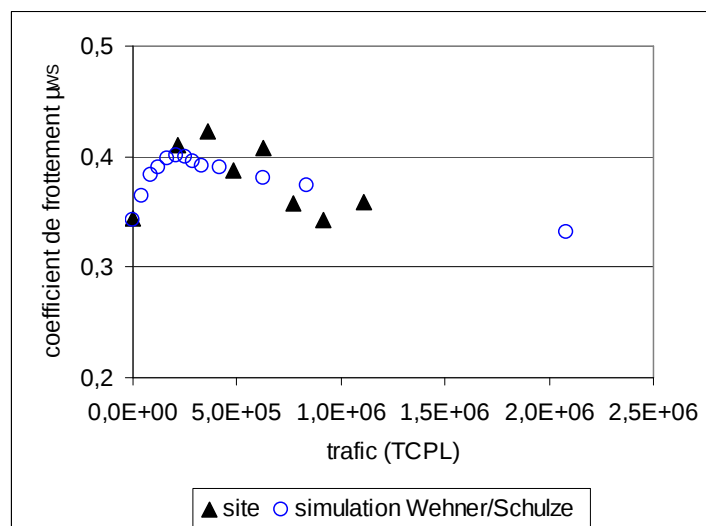


Figure 46. Comparaison entre l'évolution d'adhérence simulée par la machine WS et l'évolution réelle après calage entre durée de polissage et trafic [10.1, réf. 8]

3.5.2.4 Peut-on faire de la prévision avec la machine de Wehner et Schulze ?

Pour un ingénieur routier, il est utile d'utiliser la courbe μ_{ws} -N, obtenue à partir d'un essai de polissage Wehner et Schulze, pour prédire l'évolution CFL-TCPL ou CFT-TCPL. Cette prévision, si elle était suffisamment précise, permettrait de réduire les coûts de construction et d'entretien des routes. Elle permettrait aussi de tester à moindre coût des solutions innovantes. Deux conversions sont nécessaires pour passer de μ_{ws} -N à CFL-TCPL ou CFT-TCPL :

- conversion de μ_{ws} à CFL ou CFT ;
- conversion de N à TCPL.

La deuxième conversion ayant fait l'objet de la relation (51), nous allons traiter de la relation entre le coefficient de frottement mesuré par la machine de Wehner et Schulze sur des échantillons de chaussée (μ_{ws}) et ceux mesurés par des appareils d'auscultation de la route. Dans le cadre de des travaux rapportés dans ce mémoire, je vais limiter les discussions à la relation entre μ_{ws} et le CFL mesuré par l'ADHERA [32]. Comme les données expérimentales n'existent pas, j'ai utilisé une relation développée par l'Université de Berlin [29] :

$$(52) \quad \text{CFL (80 km/h)} = 1,04 \mu_{ws} - 0,01$$

Il est important de préciser que l'appareil ayant servi à établir la formule (52) est le « Stuttgart Friction Tester », qui réalise des mesures à roue bloquée utilisant un pneu sculpté. Même si l'ADHERA utilise un pneu lisse, la formule (52) est quand même utilisée à titre d'illustration.

Dans la Figure 47, la courbe μ_{WS-N} a été convertie en CFL80-TCPL équivalente et superposée aux mesures d'ADHERA réalisées sur le même site. Une interpolation a été faite entre des mesures d'ADHERA à 60 km/h et 90 km/h pour obtenir une valeur à 80 km/h.

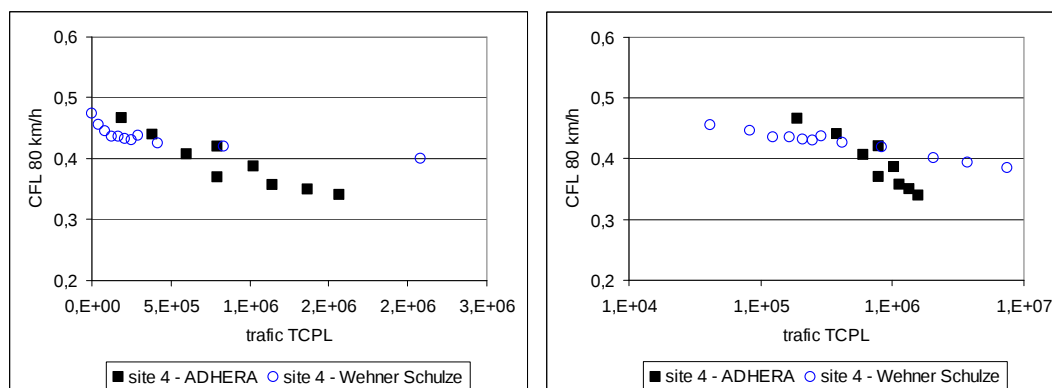


Figure 47. Prédiction de l'évolution de l'adhérence à l'aide des essais de polissage Wehner/Schulze

(le graphique de droite représente les mêmes données que celui de gauche sur une échelle logarithmique du trafic)

Le manque de données d'ADHERA avant les 100000 passages de poids lourds ne permet pas de conclure sur la qualité des prévisions. De plus, les points bleus ont été obtenus sur une éprouvette prélevée après plus de 6 ans de service, alors que les points noirs ont été relevés à des périodes différentes. Le vieillissement du bitume n'est donc pas pris en compte dans cette comparaison. La seule observation significative est l'écart entre la prévision et la mesure à partir de 10^6 passages de poids lourds : au-delà de cette limite, la prévision est plus optimiste que la mesure.

L'approche entamée mérite donc d'être approfondie, au moins sur les aspects suivants :

- idéalement, la relation (52) devait être développée spécifiquement pour l'appareil ADHERA. Provisoirement, une correction peut être apportée à la formule de l'Université de Berlin pour tenir compte du fait qu'elle a été développée pour un pneumatique sculpté.
- des corrections doivent être apportées pour tenir compte du vieillissement du liant.

3.5.3 Modélisation

La modélisation traitée dans ce paragraphe n'était pas destinée à la prévision de l'évolution de l'adhérence, mais plutôt à une meilleure compréhension de l'interaction entre divers mécanismes influents. Néanmoins, à plus long terme, ce type de modèle physique pourrait éventuellement devenir un outil de prévision.

3.5.3.1 Modèles existants

La littérature sur le sujet montre que la plupart des modèles existants ne décrivent pas une évolution de l'adhérence depuis la construction, mais donnent plutôt une valeur minimale de l'adhérence désignée par $\mu_{\min}$.

Diringer [33] par exemple a proposé la formule suivante :

$$(53) \quad \mu_{\min} = C_0 \left(1 - e^{C_1 PV} \right) + C_2 PV$$

Avec PV: valeur minimale de frottement obtenue sur des granulats en appliquant l'essai PSV sur une longue durée (au moins 10 heures) ;

C_0, C_1, C_2 : coefficients à déterminer par ajustement.

Roe [34] a proposé une autre loi intégrant une variable représentant le trafic :

$$(54) \quad \mu_{\min} = A \cdot PSV - B \cdot \ln(CVD) + C$$

avec PSV: PSV du granulat ;

CVD: nombre de véhicules légers par voie et par jour ;

A, B, C: coefficients à déterminer par ajustement.

L'un des rares modèles décrivant l'évolution complète du frottement a été proposé par Huschek [29] à partir du suivi d'une vingtaine de revêtements sur plus de dix ans. La variation de l'adhérence est décrite simplement par une fonction de puissance du temps :

$$(43) \quad \mu = a(t+1)^b$$

avec μ : coefficient de frottement mesuré par des appareils d'auscultation ;

t: temps (depuis la construction de la route) exprimée en année ;

a, b: coefficients à déterminer par ajustement.

L'inconvénient des modèles comme celui de Huschek est la difficulté de discerner les influences mutuelles des différents phénomènes, sans parler du fait qu'ils ne simulent pas la phase ascendante de l'adhérence dans les premiers mois de l'évolution.

3.5.3.2 Un modèle simple pour mieux comprendre les phénomènes

Afin de tenir compte des phénomènes physiques, j'ai développé dans le cadre de la thèse de Zhen-Zhong Tang un modèle basé essentiellement sur des observations expérimentales. Le point de départ est l'aspect visuel des surfaces soumises à un essai de polissage ; la Figure 48 montre trois états de surface. La photo de gauche illustre un état « non circulé », que l'on observe sur une chaussée neuve ou sur des parties non circulées d'une chaussée en service, lorsque les granulats sont recouverts de bitume (Figure 48a). La photo de droite illustre un état « décapé » lorsque les granulats sont complètement mis à nu (Figure 48c). La photo du centre montre un état intermédiaire.

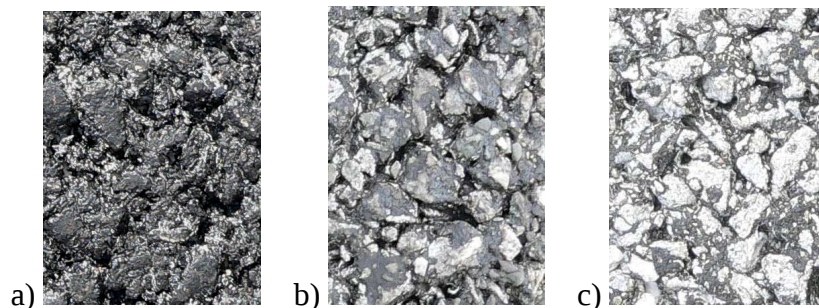


Figure 48. Photos d'états de surface d'un revêtement de chaussée soumis à un essai de polissage

Notre modèle suppose que le coefficient de frottement mesuré sur un revêtement de chaussée passe progressivement de l'état non circulé à l'état décapé, à savoir :

$$(55) \quad \mu = (1 - d) \cdot \mu_B + d \cdot \mu_G$$

Avec μ : coefficient de frottement ;

μ_B : coefficient de frottement mesuré à l'état non circulé ;

μ_G : coefficient de frottement mesuré à l'état décapé ;

d : facteur de pondération ($0 \leq d \leq 1$).

Le coefficient de frottement μ représente l'adhérence à un état « intermédiaire » lorsqu'une partie du bitume est enlevée par l'action du trafic et du temps. Cet état est illustré par la photo du centre de la Figure 48. Le facteur de pondération « d » représente la fraction de surface occupée par des granulats mis à nu : pour $d = 0$, tous les granulats sont recouverts de bitume et $\mu = \mu_B$; pour $d = 1$, tous les granulats sont mis à nu et $\mu = \mu_G$.

Un suivi de routine d'un nouveau revêtement construit sur la piste de référence à Nantes m'avait interpellé sur un autre aspect : l'adhérence – mesurée au pendule SRT dans le cadre de ce suivi – augmente avec le temps dans les premiers mois qui suivaient la construction. Le terme μ_B n'est donc pas constant, comme on pouvait le supposer, et dépendrait du temps.

Le terme μ_G était usuellement modélisé dans les travaux antérieurs et dépendait de la durée de polissage. En effet, les courbes d'évolution de l'adhérence trouvées dans la littérature démarrent toujours d'une valeur maximale avant de décroître avec les cycles de polissage. Cette observation pour le moins contradictoire, comparée aux graphiques de la Figure 46, serait due à au moins deux raisons :

- les suivis ne démarraient pas juste après la mise en place du revêtement de chaussée ;
- les chaussées sont en béton (publications nord-américaines) et donc la phase de décapage n'existe pas.

Le taux d'enlèvement du bitume ne devrait dépendre que de l'action du trafic ; « d » dépendrait donc de la durée de polissage. Néanmoins, l'expérience des experts faisant partie du comité de suivi de la thèse de Zhen-Zhong Tang montrait que le vieillissement naturel du bitume et l'adhésivité bitume/granulats influent sur la vitesse de décapage, parfois indépendamment de l'action du trafic. Le facteur de pondération devrait donc dépendre aussi du temps ; cependant, je ne disposais pas de données pour traiter cette question.

Le phénomène des variations saisonnières n'a pas été pris en compte. Il s'agit de fluctuations souvent modélisées dans le passé par des fonctions périodiques [35]. Cependant, l'observation des données expérimentales montre que la périodicité varie en fonction des facteurs – les conditions de météorologie entre autres – dont l'influence n'est pas encore bien comprise. Les variations saisonnières ne sont donc pas intégrées dans le modèle actuel.

La Figure 49 montre l'évolution des mesures de coefficient de frottement avec la machine WS sur des échantillons exposés simplement à l'action du climat.

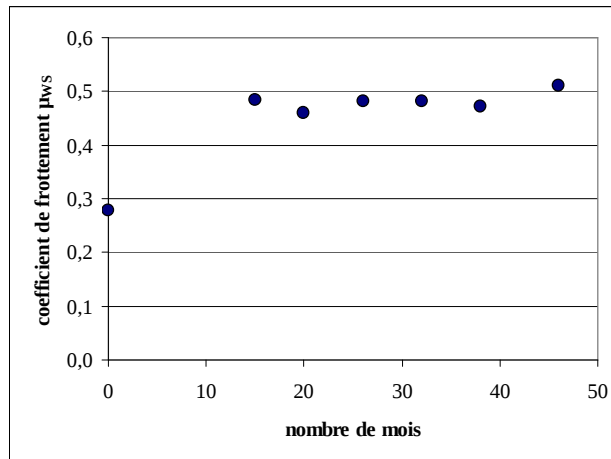


Figure 49. Evolution de l'adhérence au jeune âge

On peut dire que μ_B est composé de deux termes : μ_0 , représentant l'adhérence mesurée juste après la construction, et μ_v représentant le gain d'adhérence en l'absence du trafic. J'ai donc utilisé le modèle suivant pour ajuster les données :

$$(56) \quad \mu_B = \mu_0 + \mu_v(t) = \mu_0 + \mu_1 \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)} \right]$$

Avec t : temps, exprimé en nombre de mois ;

μ_1 : coefficient de frottement représentant le gain d'adhérence maximal dû au climat ;

t_0 : paramètre à ajuster, exprimé en nombre de mois.

La Figure 50 montre la courbe d'évolution pour un enrobé et celle de μ_G . La forme décroissante de la courbe $\mu_G(N)$ est expliquée par le fait que la microtexture des granulats diminue avec la durée de polissage. Le modèle suivant a été utilisé pour l'ajustement de μ_G :

$$(57) \quad \mu_G = a \cdot (N + b)^c$$

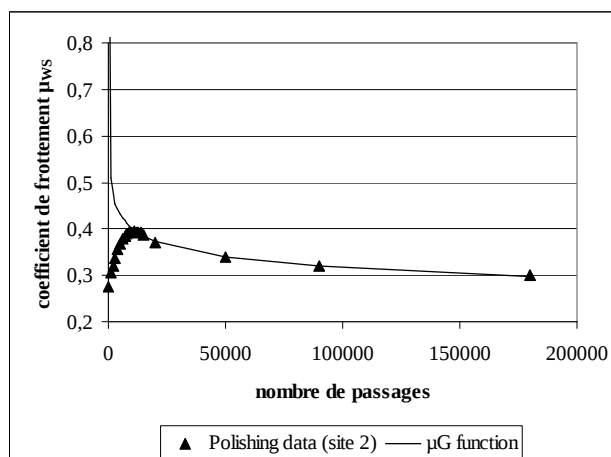


Figure 50. Evolution de la composante « granulats » comparée à celle d'un béton bitumineux

Le facteur « d » peut être déduit de la formule (55) :

$$(58) \quad d = \frac{\mu - \mu_B}{\mu_G - \mu_B}$$

Comme les sites expérimentaux ne sont suivis que depuis 4 ans, je ne disposais pas assez de données pour utiliser la courbe μ -trafic provenant des prélèvements d'échantillons. J'avais donc utilisé les courbes d'évolution simulées par la machine WS qui devraient refléter ce qui se passe sur la route ; on se rend compte ici l'importance de vérifier la représentativité de l'essai. Avec cette hypothèse, le terme μ_B devient μ_0 car un essai de laboratoire dure moins d'une journée. Un tracé de la variation de « d » avec le nombre de passages « N » sur la machine WS est montré dans la Figure 51. Le modèle suivant a été utilisé pour ajuster les données expérimentales :

$$(59) \quad d = 1 - e^{\left(-\frac{N}{N_0}\right)}$$

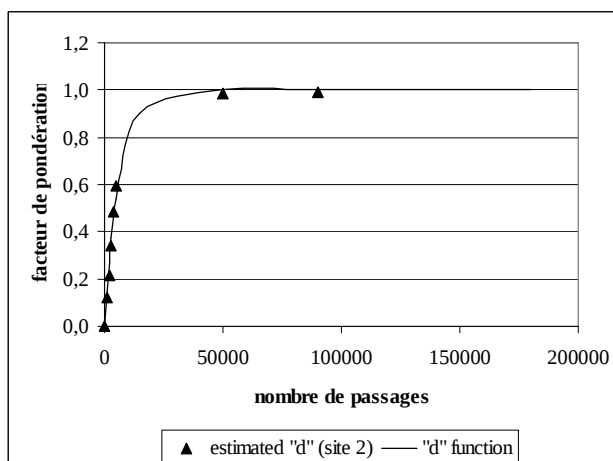


Figure 51. Variation du facteur de pondération avec la durée de polissage

Notre modèle physique s'écrit maintenant :

$$(60) \quad \mu = e^{\left(-\frac{N}{N_0}\right)} \cdot \left[\mu_0 + \mu_1 \cdot \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{t_0}\right)} \right) \right] + \left(1 - e^{\left(-\frac{N}{N_0}\right)} \right) \cdot a(N + b)^c$$

Malgré une formulation en apparence complexe, ce modèle à 7 paramètres s'ajuste simplement à partir d'un essai de polissage sur des échantillons de chaussée. En effet, dans les limites de notre plan d'expérience, les paramètres μ_1 et t_0 pouvaient être considérés comme constants et prennent respectivement les valeurs de 0,2 et 6 mois. Les cinq autres paramètres se déduisent de la courbe μ -N de la manière suivante :

- μ_0 est la valeur initiale ;
- a, b et c sont déduits de l'ajustement de la formule (57) sur $\mu-N$;
- N_0 est déduit de « d » et de la formule (58).

Une comparaison entre le modèle et la mesure est montrée dans la Figure 52. On voit que la concordance est bonne.

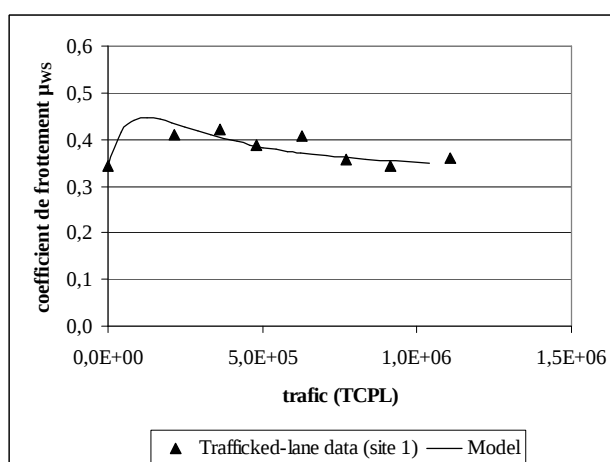


Figure 52. Comparaison entre le calcul du modèle physique et la mesure

L'avantage qu'offre un modèle, lorsqu'il est dûment validé, est son exploitation pour mieux comprendre des phénomènes que l'on ne peut observer que globalement. En effet, l'observation des points expérimentaux de la Figure 52 ne permet pas de voir des différences notables entre les sites 1 et 2. Le modèle montrait pourtant que le maximum a été atteint très tôt sur le site 1, alors que l'adhérence continue à croître sur le site 2. Cette tendance confirme l'observation visuelle des surfaces d'échantillons : ceux du site 1 montraient des zones de décapage importantes, alors que ceux du site 2 semblaient conserver leur aspect d'origine.

Un autre exemple d'exploitation est montré dans la Figure 53 où je regardais comment évoluaient séparément la fraction « bitume » (terme $(1-d)\mu_B$) et la fraction « granulats » (terme $d\mu_G$).

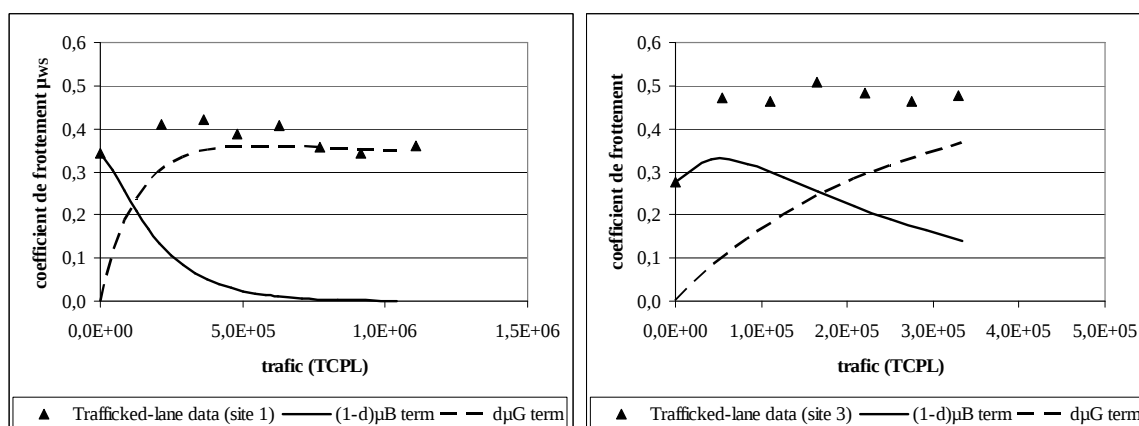


Figure 53. Evolution des composantes « bitume » et « granulats » du modèle physique

On voit que globalement ces termes varient comme l'on pouvait deviner intuitivement : la composante « bitume » diminue pendant que la composante « granulats » augmente. Cependant, des différences notables peuvent être notées entre les deux graphiques de la Figure 53 correspondant à deux types de revêtements différents :

- sur un BBSG (graphique de gauche), on voit que la composante « bitume » décroît très vite et la partie finale de la courbe d'évolution de l'enrobé est contrôlée par la composante « granulats ». De plus, le moment où l'adhérence de l'enrobé passe par un maximum (Figure 52) ne correspond pas au maximum de la composante « granulats » comme le supposait généralement la littérature.
- Sur un BBTM (graphique de droite), les évolutions sont moins rapides et l'on voit qu'elles ne sont pas terminées. De plus, la composante « bitume » passe par un maximum avant de décroître. La différence comparée au BBSG réside dans la teneur en bitume plus élevée dans un BBTM. Le bitume met donc plus de temps à s'enlever et de plus, l'évolution au jeune âge est plus marquante.

3.5.4 Evolution de la microtexture

En complément de la modélisation, j'ai essayé de voir comment la microtexture des surfaces est affectée par le polissage. L'objectif était de voir comment l'évolution du coefficient de frottement peut être expliquée par celle des paramètres de microtexture.

L'étude a été menée sur deux granulats, désignés par « A » et « B », présentant respectivement des résistances au polissage élevée (PSV = 56) et faible (PSV = 41). Les profils de surface ont été mesurés dans la même zone de la partie polie (Figure 43) à trois états : initial, après 90000 et 180000 passages. La zone de mesure est rectangulaire et composée de 15 profils parallèles de 76 mm de long, espacés de 0,5 mm et échantillonnés tous les 0,01 mm. Afin de superposer les évolutions du coefficient de frottement et des paramètres de microtexture sur le même graphique, toutes les évolutions ont été normalisées par rapport à l'état initial.

L'évolution du paramètre R_q (écart-type des hauteurs) est montrée dans la Figure 54. On voit que la diminution de la taille des aspérités – caractérisée par R_q – explique entièrement l'évolution du coefficient de frottement mesuré sur le granulat « A ». Pour le granulat « B », le R_q évolue comme le frottement mais de façon moins importante. J'ai donc regardé la forme des aspérités en utilisant les paramètres de relief (angle θ) et d'acuité ($\cotg \alpha$) développés dans mes recherches sur la caractérisation de la microtexture (3.4.2.4).

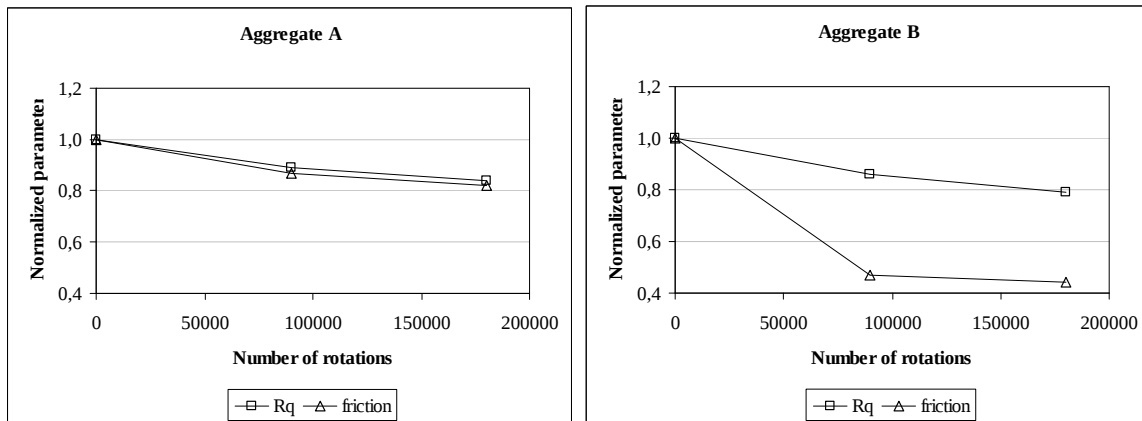


Figure 54. Variation du paramètre R_q : gauche) granulat « A » ; droite) granulat « B »

L'évolution de ces paramètres angulaires est montrée dans la Figure 55 pour le granulat B. L'observation a été faite aux échelles de rugosité et d'ondulation (3.4.2.4). On peut voir que la variation du coefficient de frottement peut être expliquée par une perte de relief – diminution de l'angle θ – et par un émoussement des sommets d'aspérité – diminution de la $\cotg \alpha$ – à l'échelle d'ondulation.

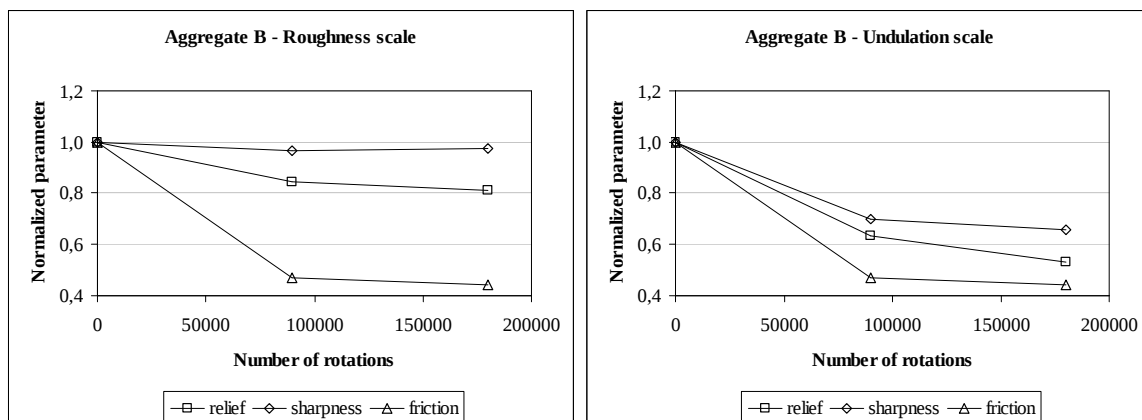


Figure 55. Variation des paramètres de forme pour la granulat « B » : gauche) échelle « rugosité » ; droite) échelle « ondulation »

Le suivi des paramètres de microtexture a permis de voir que le polissage affecte différemment la microtexture des deux granulats étudiés. Combiné à une observation de l'évolution de l'état de surface des granulats, ce suivi peut donner lieu à une meilleure compréhension de l'influence du polissage sur la microtexture.

3.5.5 Leçons tirées de ce bilan positif

Au terme de cinq années de travail, l'étude l'évolution de l'adhérence, utilisant la machine de Wehner/Schulze, constitue un bilan très positif :

- en termes de productions scientifiques, 10 papiers ont été écrits dont 5 articles dans des revues internationales, ainsi qu'une thèse soutenue ;

- en termes de retombées, les résultats de cette recherche ont incité des entreprises routières françaises à s'équiper de la même machine. Je suis sollicité par d'autres industriels pour réaliser des expertises sur d'autres types de matériaux (marquages routiers, bétons) ;
- au niveau international, un groupe de travail s'est constitué pour rédiger une norme d'essais européenne. Des collaborations ont été envisagées avec des laboratoires à l'étranger (TRL, Université d'Auckland).

Au-delà d'une satisfaction personnelle liée à toutes ces actions de valorisation, j'ai surtout retenu les facteurs qui ont contribué à cette réussite. Nous revenons aux deux questions posées à la fin de ma thèse sur l'identification des besoins et des utilisateurs. Ces questions n'étaient pas traitées dans l'étude de la microtexture. Elles ont été posées dès le début des recherches sur l'évolution de l'adhérence. Nous voyons que :

- d'une part, le compromis théorie/expérimentation a été trouvé car les utilisateurs finaux ont été identifiés ;
- et d'autre part, les résultats sont valorisés au fur et à mesure de leur publication, car ces résultats répondaient à une attente.

La comparaison entre les simulations par la machine Wehner/Schulze et les résultats obtenus sur des routes circulées, ainsi que la méthode de prévision basée sur des essais de Wehner/Schulze m'ont montré enfin comment les résultats de laboratoire pouvaient être utilisés pour évaluer un ouvrage réel. Il s'agit encore d'une autre réponse aux questions soulevées au début de ma carrière de chercheur.

Une certaine méthodologie de conduire des recherches se met donc en place. De nombreux ajustements sont certes encore nécessaires. Mais la réussite de l'étude du polissage me conforte dans l'idée que le cheminement que j'ai suivi était nécessaire et utile.

3.5.6 Questions restées en suspens

L'évolution de l'adhérence est étudiée depuis plus de cinquante ans. En cinq ans, malgré un bilan provisoire très positif, il ne serait pas raisonnable de prétendre d'avoir résolu complètement le problème. De nombreuses questions restent donc ouvertes :

- sur la compréhension des mécanismes :
 - o l'origine des variations saisonnières n'est pas maîtrisée ;
 - o l'influence du climat sur le vieillissement du liant et sur les variations saisonnières n'est pas bien comprise ;
 - o l'influence des véhicules légers (VL) sur le polissage par rapport aux poids lourds (PL) n'est pas quantifiée ;
 - o la relation entre les conditions de roulement (vitesse, glissement de roue) et le polissage n'est pas connue.
- sur la méthode d'essais :
 - o les conditions de polissage avec la machine Wehner et Schulze étant fixées, comment peut-on simuler toutes les conditions de circulation en termes de manœuvres (roulement, accélération, freinage), types de véhicules (VL, PL), climat (sec/mouillé, température), etc. ?

- o la machine de Wehner et Schulze ne simulant que l'action de polissage, quels sont les autres types d'essais que l'on doit mettre en œuvre pour caractériser d'une façon exhaustive les sollicitations subies par un revêtement de chaussée ?
- sur le développement des outils de prévision :
 - o la relation entre la durée de polissage et le trafic réel doit être enrichie pour tenir de l'influence de divers paramètres : type de revêtement, type de trafic, climat, etc. ;
 - o la correspondance entre le coefficient de frottement mesuré par la machine de Wehner et Schulze et celui mesuré par des appareils d'auscultation doit être établie.

La liste précédente n'est certainement pas exhaustive. Elle permet néanmoins de nous rendre compte de la complexité de l'étude.

3.6 Harmonisation des mesures d'adhérence

3.6.1 Problématique

Il existe de nombreux appareils de mesure d'adhérence à travers l'Europe. Les caractéristiques de ces appareils – tant au niveau du principe de mesure qu'au niveau des paramètres de mesure – sont différentes. De ce fait, la transposition des résultats d'un appareil à l'autre est délicate et peut induire des interprétations erronées. Cette limite pose des difficultés en premier lieu au niveau national pour l'établissement de spécifications (pour la réception des routes neuves, pour le suivi d'un réseau routier, etc.) basées sur des valeurs de coefficients de frottement car ces valeurs dépendent de l'appareil de mesure. Au niveau international, il n'est pas toujours possible d'échanger des bases de données recueillies par différents appareils, ou de comprendre les spécifications établies par un pays.

L'harmonisation des moyens de mesure d'adhérence est donc une priorité pour les laboratoires européens du FEHRL dont fait partie le LCPC. Dans le cadre du projet HERMES, une échelle commune, appelée EFI (European Friction Index), a été proposée comme étant un coefficient de frottement dit « de référence » mesuré à une vitesse de 30 km/h. La référence est la moyenne des coefficients de frottement mesurés par l'ensemble des appareils – au nombre de 15 – participant au projet. Deux principales difficultés se posaient avec cette définition :

- comme les appareils n'opèrent pas toujours à 30 km/h, il faut convertir les mesures obtenues à une vitesse opérationnelle à celle théoriquement obtenue à 30 km/h avant d'effectuer le calcul de la moyenne ;
- la moyenne des appareils est une référence flottante donc sujette aux incertitudes de mesure des appareils et à la population d'appareils considérée.

J'ai donc participé au projet HERMES pour résoudre la première difficulté. L'objectif était de proposer un modèle exprimant la variation de l'adhérence avec la vitesse valide pour les 15 appareils participants. Le critère de pertinence en comparant les modèles était basé sur la répétabilité (r) et la reproductibilité (R) de l'EFI selon la définition de la norme ISO 5725 [36].

3.6.2 Analyse des modèles adhérence/vitesse existants

Le premier modèle utilisé dans HERMES est celui du Penn State (formule (12)). Or l'observation des résultats de mesure provenant des appareils participant au projet indiquait des tendances qui ne sont pas toujours exponentielles (appareils F5 et F8 de la Figure 56).

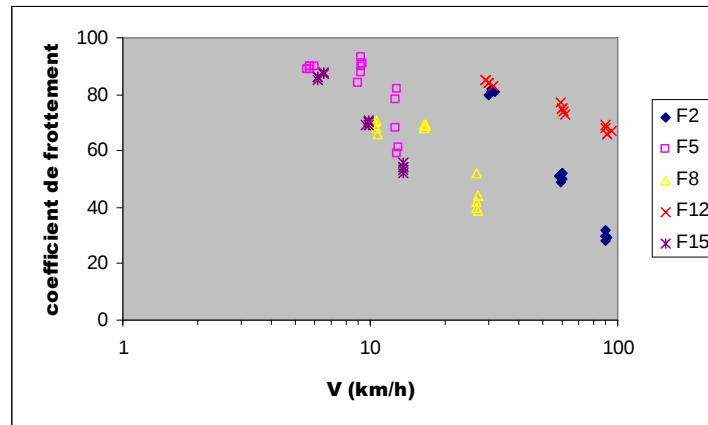


Figure 56. Résultats des appareils de mesure participant au projet HERMES [10.8, réf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**]

Des résultats de mesure provenant d'un autre projet de recherche ont par ailleurs montré une variation en forme de « S inversé » comme le montre la Figure 57 ; cette forme semble être plus adaptée aux appareils F5 et F8 d'HERMES.

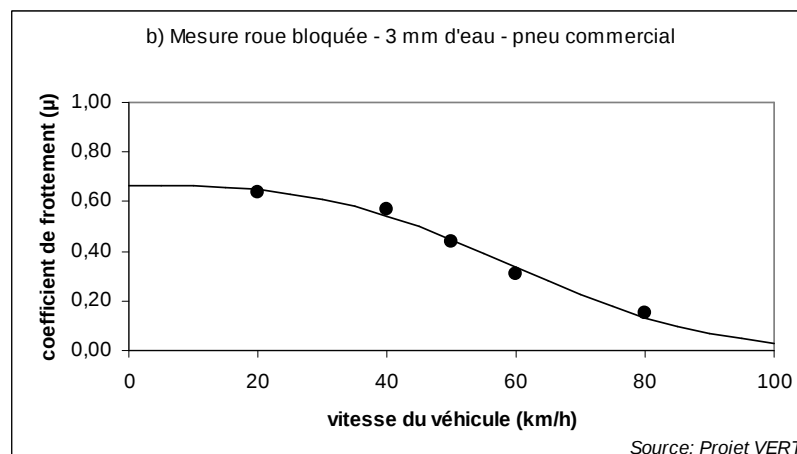


Figure 57. Variation en forme de « S inversé » de l'adhérence avec la vitesse (10.3, réf. 16)

Mancosu et al. [12] ont proposé la formule suivante pour ajuster cette nouvelle forme :

$$(61) \quad \mu(V, WD, TTD) = \mu(60 \text{ km/h}, 1 \text{ mm}, 4 \text{ mm}) \times \left(b_0 + \frac{b_1}{1 + b_2 e^{(b_3 + b_4 V)}} \right)$$

avec V : vitesse ;

WD : hauteur d'eau (water depth en anglais) ;

TTD : profondeur de sculpture du pneumatique (tyre tread depth en anglais) ;

$\mu(V, WD, TTD)$: frottement à calculer pour une combinaison donnée de V, WD et TTD ;

$\mu(60\text{km/h}, 1\text{mm}, 4\text{mm})$: frottement de « référence », mesuré à 60km/h pour un film d'eau de 1mm et pour une profondeur de sculpture de 4mm ;

b_i ($i = 0$ à 4) : paramètres du modèle obtenus par ajustement.

Les paramètres b_i ($i = 0$ à 4) ont été exprimés en fonction de l'épaisseur du film d'eau, de la profondeur de sculpture, de la largeur du pneumatique et de la macrotexture.

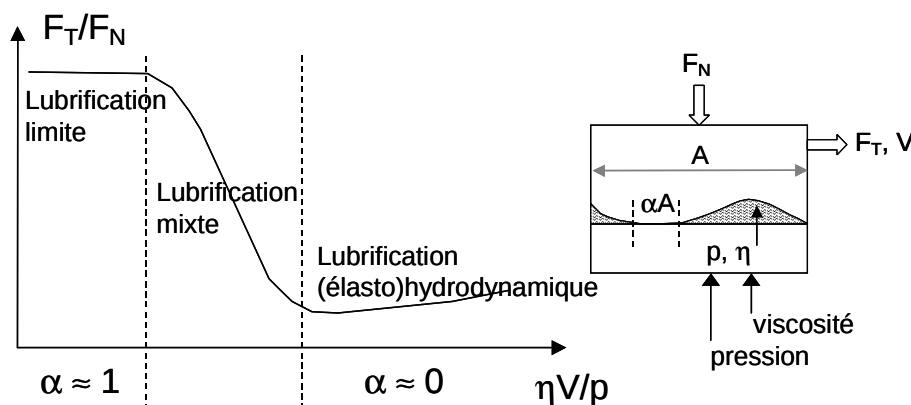
Il existait donc des modèles adaptés à différentes formes de variation de l'adhérence avec la vitesse. Or dans le cadre d'une harmonisation, il n'est pas envisageable d'utiliser différents modèles pour le même parc d'appareils de mesure. De plus, pour un utilisateur, il n'est pas facile de choisir le bon modèle ou de savoir quel modèle utiliser. Il était donc nécessaire de trouver une formulation « universelle » permettant de représenter – au moins – les formes exponentielle et S-inversé de la courbe adhérence/vitesse.

3.6.3 Courbe de Stribeck

La courbe de Stribeck, nommée en l'honneur de Richard Stribeck qui l'a introduite pour la première fois en 1902, est utilisée en tribologie pour expliquer l'évolution de certains phénomènes de lubrification, via les variations du coefficient de frottement, en fonction de divers paramètres de contact. Dans l'exemple de la Figure 58, la courbe de Stribeck représente la variation du coefficient de frottement en fonction d'un coefficient appelé « coefficient de similitude » Z et défini par la formule suivante :

$$(62) \quad Z = \frac{\eta V}{p}$$

Avec η : viscosité du lubrifiant ; V : vitesse de glissement ; p : pression.



Cette représentation permet d'identifier trois régimes de lubrification : lubrification limite, lubrification mixte et lubrification (élasto)hydrodynamique. Dans le premier régime, les surfaces ne sont pas sèches mais, du fait de l'épaisseur très faible du lubrifiant, il y a quand même un contact direct entre les deux solides. Dans le dernier régime, le lubrifiant sépare complètement les deux corps. Dans le deuxième régime, on retrouve un régime aux frontières très floues que l'on appelle lubrification mixte.

La courbe de Stribeck est semblable à celle de la Figure 57. De plus, dans sa partie centrale, régime de lubrification mixte, on retrouve aussi l'allure des courbes présentées dans la Figure 14. On peut donc dire que la courbe de Stribeck est une représentation plus générale de la variation de l'adhérence sur chaussée mouillée avec la vitesse.

Dans le domaine de la route, Jacobs et al. [37] ont été les premiers à suggérer l'utilisation de la courbe de Stribeck pour représenter la variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse. Selon ces auteurs, le coefficient de similitude peut être exprimé sous la forme suivante :

$$(63) \quad \frac{\eta^a V^b}{p(h_{\text{eau}}, V)^c h_t^d}$$

Avec η : viscosité de l'eau ;

V : vitesse de glissement ;

$p(h_{\text{eau}}, V)$: pression de contact, qui dépend de l'épaisseur h_{eau} du film d'eau et de la vitesse V du véhicule ;

h_t : profondeur de texture ;

a, b, c, d : constantes.

3.6.4 Un modèle simple basé sur la courbe de Stribeck

Dans le cadre du projet HERMES et, plus particulièrement, durant le stage de Denis Mathelin (6.1), j'ai proposé et validé la formule suivante pour relier le coefficient de frottement à la vitesse de glissement :

$$(64) \quad \mu = \mu_0 \exp \left[- \left(\frac{V}{V_s} \right)^\alpha \right] + \beta V$$

Avec μ : coefficient de frottement mesuré à un glissement de roue (κ) donné ;

V : vitesse de glissement, qui est le produit de la vitesse du véhicule par le glissement de roue κ ;

$\mu_0, V_s, \alpha, \beta$: constantes obtenues par ajustement.

La fonction exponentielle est une forme élaborée d'une fonction classiquement utilisée pour décrire des formes en S-inversé. Le terme linéaire en V permet de tenir compte d'une (légère) augmentation du coefficient de frottement pour des valeurs élevées de la vitesse. Cette tendance inhabituelle – on s'attend le plus souvent à un coefficient de frottement nul – est due, dans certaines conditions de contact, à un cisaillement de la lame d'eau.

Le nouveau modèle s'ajustait bien aux données expérimentales. De plus, des combinaisons de valeurs de (α) et (β) permettent de représenter les formes exponentielle ($\alpha = 1$, $\beta = 0$) et S-inversé ($\alpha = 3$, $\beta = 0$). Le nouveau modèle est donc suffisamment général et simple à utiliser. Pour qu'il puisse être utilisé à des fins prédictives, j'ai relié les paramètres (μ_0 , V_s , α , β) aux paramètres caractérisant la chaussée, le pneumatique et leur condition de contact. Ces analyses ont été détaillées dans la référence 21 du paragraphe 10.3 ; les principaux résultats sont rappelés ici. Il a été démontré que :

- μ_0 est lié au coefficient de frottement mesuré au pendule SRT ;
- V_s est liée au paramètre normalisé profondeur moyenne de profil (PMP) caractérisant la macrotexture de la surface de chaussée et au glissement de roue κ (Figure 59) ;
- α est lié à la quantité d'eau sur la chaussée (Figure 60) ;
- β est négligeable pour les données disponibles.

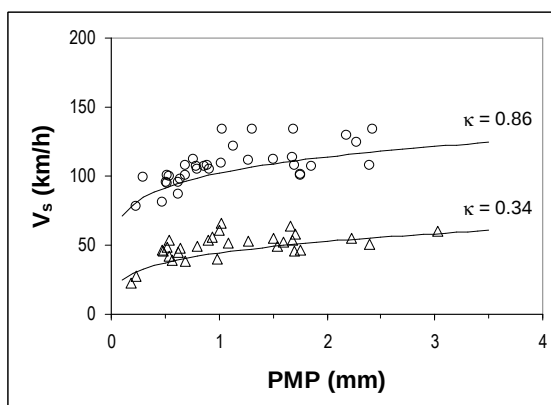


Figure 59. Variation de la vitesse de Stribeck avec la macrotexture de la chaussée et le glissement du pneumatique (10.3, réf. 16)

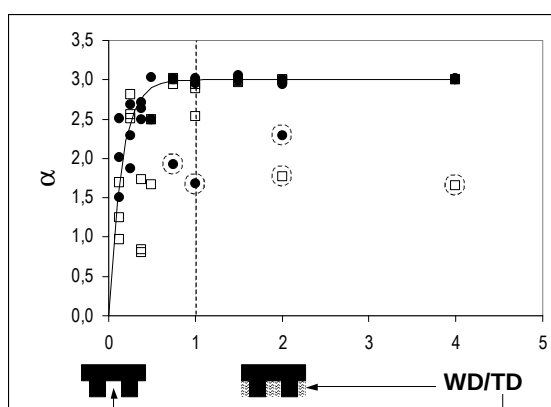


Figure 60. Variation du paramètre de forme (α) avec la quantité d'eau et l'usure du pneumatique (10.3, réf. 16)

Utilisant des données provenant de 15 appareils de mesure opérant à des glissements de roue différents, j'ai établi une relation empirique reliant V_s à PMP et à κ (lignes solides sur la Figure 59) :

$$(65) \quad V_s = 117.PMP^a.k^{0,9}$$

Avec a : exposant dépendant de l'appareil de mesure.

Sur la Figure 60, les termes « WD » et « TD » désignent respectivement la hauteur d'eau dépassant la tête des aspérités de chaussée et la profondeur de sculpture des pneumatiques. Les deux ensembles de points expérimentaux – cercles noirs et carrés blancs – correspondent à deux surfaces de chaussée. On voit que (α) varie entre les valeurs 1 et 3.

Le principal intérêt du modèle – appelé abusivement « modèle de Stribeck » – présenté au paragraphe 3.6.4 est, malgré sa formulation simple, sa capacité à prendre en compte de nombreux paramètres, et leurs interactions, intervenant dans le contact lubrifié entre le pneumatique et la surface de chaussée. Ainsi, on voit que la variation de l'adhérence avec la vitesse est contrôlée non seulement par la macrotexture du revêtement de chaussée mais aussi par le glissement de roue. L'influence de la hauteur d'eau dépend – logiquement – de l'usure du pneumatique.

3.6.5 Un bilan mitigé lié à une économie inutile de théories

Pour simplifier son utilisation, j'avais proposé les hypothèses suivantes : $\alpha = 3$, $\beta = 0$. On voit sur la Figure 61 que cette hypothèse, même si le modèle s'ajustait bien aux données la plupart du temps (graphique de gauche), n'est pas adaptée à tous les appareils de mesure (graphique de droite). Les analyses statistiques ont montré ultérieurement que ces écarts modèle/mesure induisent finalement des valeurs de (r) et (R) proches de celles obtenues avec le modèle Penn State (0,11 et 0,27 respectivement). Il était donc conclu que modèle de Stribeck ne permettait pas de réduire l'incertitude sur l'estimation de l'EFI.

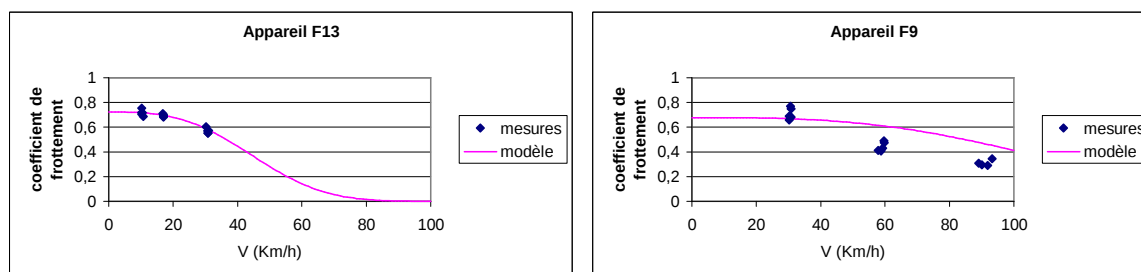


Figure 61. Ajustement du modèle Stribeck aux données HERMES

La définition d'une échelle commune pour harmoniser l'utilisation des mesures d'adhérence en Europe n'a pas abouti aux résultats attendus dans HERMES. La voie utilisant des modèles adhérence – vitesse a été en particulier considérée comme infructueuse. Néanmoins, avec du recul, j'ai identifié des lacunes dans l'application de ce modèle et également des axes d'amélioration possibles :

- concernant l'application du modèle, il aurait fallu adapter l'exposant α à l'appareil de mesure car, compte tenu de la variation de ce paramètre avec le rapport hauteur d'eau/usure pneumatique (Figure 60), il n'était pas réaliste d'avoir une valeur constante alors que les conditions de contact entre la roue de mesure et la surface de chaussée variaient d'un appareil à l'autre. L'économie en termes de complexité du modèle (exposant α spécifique aux appareils) n'était pas justifiée ;

- concernant les conditions expérimentales, seulement trois niveaux de vitesse ont été testés. Le calage des modèles n'était donc pas assez robuste. Un plan d'expérience avec 5 à 6 niveaux de vitesse aurait permis de mieux évaluer la pertinence des modèles.
- la combinaison de la vitesse et du taux de glissement, donnant une vitesse de glissement, n'était pas judicieuse. En effet, les combinaisons ($V = 30 \text{ km/h}$; $\kappa = 1$) et ($V = 100 \text{ km/h}$; $\kappa = 0,3$) ne sollicitent pas de la même façon le couple pneumatique/chaussée en présence d'eau, alors qu'elles donnent la même valeur de vitesse de glissement ($V.\kappa = 30 \text{ km/h}$) ;
- il faudrait tester d'autres formes du coefficient de similitude comme celle proposée par Jacobs [37].

3.7 Information aux conducteurs de l'état d'adhérence des surfaces de chaussée

3.7.1 Problématique

Il est reconnu que la pluie présente un sur-risque d'accidents. Une étude statistique a montré que le nombre d'accidents est surtout important après une pluie [38]. Ce constat peut être expliqué par le fait que le revêtement de chaussée, du fait qu'il reste mouillé après la pluie, ne retrouve pas immédiatement son niveau d'adhérence par temps sec. Ce risque n'est pourtant pas perceptible par tous les conducteurs, comparé au gêne induit par le manque de visibilité par exemple, et la glissance résulte d'une manœuvre mal adaptée nécessitant plus d'adhérence que ce qui est disponible.

Il fallait donc assister les conducteurs en les informant de l'état de glissance de la route et leur incitant à adopter une conduite plus appropriée.

De 2004 à 2008, j'ai piloté un projet de recherche PREDIT intitulé « Informer des Risques en Conditions Atmosphériques Dégradées » (IRCAD) visant à développer un système de bord de route destiné à informer les usagers des risques de glissance par temps pluie (7.3.2). L'information doit être dynamique et envoyée en temps réel. L'aspect temps réel est lié aux conditions météorologiques, qui influent sur le mouillage de la chaussée et donc sur son adhérence. Une information dynamique est nécessaire pour éviter d'habituer les conducteurs à un message permanent – comme celui sur des vitesses réglementaires – qui finit par être ignoré.

3.7.2 Calcul d'une vitesse de passage en fonction de l'adhérence disponible

L'approche adoptée dans le projet IRCAD visait notamment à déterminer une vitesse de passage – permettant d'aborder un tronçon routier – en fonction de l'état d'adhérence du revêtement de chaussée de ce tronçon. La démarche de calcul est indiquée dans la Figure 62.

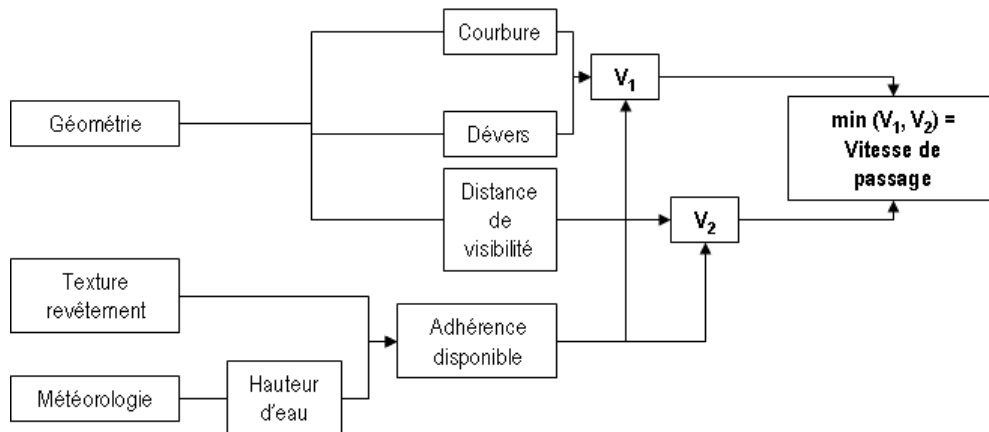


Figure 62. Démarche de calcul de la vitesse de passage adoptée dans le projet IRCAD

La vitesse de passage est définie comme étant le minimum de deux vitesses (Figure 62) :

- une vitesse V_1 déduite de l'équilibre d'un véhicule abordant une section courbe présentant un dévers ;
- une vitesse V_2 déduite de la distance de freinage d'un véhicule rencontrant un obstacle. Par « obstacle », on entend aussi un danger perçu par le conducteur.

La méthode prend donc en entrée des données de géométrie, d'adhérence et de météorologie. Les deux premiers types de données sont obtenus généralement à l'aide d'appareils d'auscultation, l'adhérence étant mesurée dans des conditions particulières. Un premier modèle est utilisé pour estimer une hauteur d'eau sur la chaussée à partir de données météorologiques. Un deuxième modèle permet ensuite de moduler l'adhérence en fonction de la hauteur d'eau. La vitesse de passage est rendue ainsi dépendante des conditions météorologiques. Le principal avantage de la méthode proposée est l'utilisation des données déjà disponibles, rendant ainsi la méthode rapidement opérationnelle.

Pour un virage, la prise en compte de l'adhérence s'exprime à travers la formule :

$$(66) \quad V_1 = \sqrt{(\tau + dv) \cdot g \cdot R}$$

Avec V_1 : vitesse maximale à laquelle on peut aborder le virage ;

τ : coefficient de frottement transversal ;

dv : dévers du virage ;

g : accélération de la pesanteur ;

R : rayon du virage.

La formule (66) est obtenue en considérant l'équilibre d'un véhicule dans le virage (Figure 63).

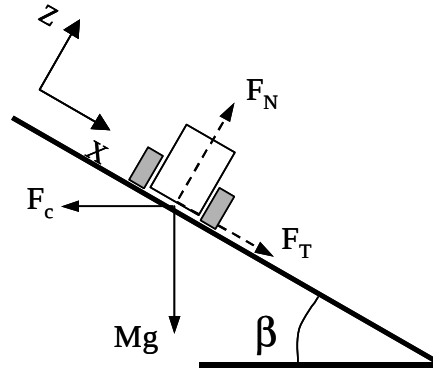


Figure 63. Schéma d'un véhicule abordant un virage avec dévers

Le bilan d'équilibre des forces donne (par projection sur respectivement les axes X et Z) :

$$(67) \quad \begin{aligned} F_T - F_c \cos \beta + M \cdot g \cdot \sin \beta &= 0 \\ F_N - F_c \sin \beta - M \cdot g \cdot \cos \beta &= 0 \end{aligned}$$

avec F_c : force centrifuge exercée sur le véhicule ;

F_T : force frottement transversal ;

F_N : force normale ;

M : masse du véhicule ;

β : angle induisant un dévers ;

g : accélération de la pesanteur.

En écrivant $F_T = \tau \cdot F_N$ et remplaçant F_T et F_N par leur expression déduite de (67), on obtient :

$$(68) \quad F_c \cdot (1 - \tau \cdot \tan \beta) = P \cdot (\tau + \tan \beta)$$

Pour un virage, $F_c = \frac{M \cdot V^2}{R}$

D'où

$$(69) \quad V^2 = R \cdot g \cdot \frac{\tau + \tan \beta}{1 - \tau \cdot \tan \beta}$$

En écrivant $\tau = \tan \alpha$, on obtient :

$$(70) \quad V^2 = R \cdot g \cdot \tan(\alpha + \beta)$$

La formule (66) est une approximation de la formule (70) en supposant que les angles α et β sont petits. Dans notre étude, le coefficient de frottement transversal « τ » est supposé égal au coefficient de frottement CFT – mesuré par l'appareil SCRIM [32] – modifié par la hauteur d'eau sur la chaussée et divisé par un facteur de sécurité égal à 3, soit :

$$(71) \quad \tau = \frac{\text{CFT}(h)}{3}$$

avec CFT(h) : CFT du SCRIM modifié par la hauteur d'eau « h » sur la chaussée.

Nous rappelons ici que le CFT du SCRIM est, dans le cadre d'un diagnostic effectué avec l'appareil VANI [32], une conversion du coefficient de frottement GN mesuré par l'appareil GRIPTESTER [32]. L'introduction de la notion de CFT(h) vient du fait que l'appareil SCRIM, comme tous les appareils d'auscultation, mesure un coefficient de frottement généré par le contact entre la roue de mesure et le revêtement de chaussée en présence d'une quantité d'eau fixée conventionnellement ; une hauteur d'eau différente induite par la pluie risque donc de modifier la valeur de frottement obtenue en auscultation. Le coefficient « 3 » est un facteur de sécurité ; cette valeur est utilisée dans de nombreuses études [39].

La relation donnant CFT(h) en fonction du CFT du SCRIM est la suivante :

$$(72) \quad \text{CFT}(h) = -0,081 \cdot \ln(h) + (\text{CFT} - 0,05)$$

avec h : hauteur d'eau sur la chaussée, exprimée en mm.

La relation (72), obtenue à partir des résultats expérimentaux non publiés du Laboratoire Régional de Lyon, corrobore les observations faites dans la littérature [40]. La valeur de la pente (0,081) pour la vitesse de 60 km/h du SCRIM concorde également avec celles fournies dans la référence [40] en fonction de la vitesse du véhicule de mesure : 0,01 pour 32 km/h ; 0,05 pour 48 km/h ; 0,20 pour 96 km/h.

La hauteur a été mesurée à l'aide d'un capteur sans contact (Figure 64). Elle peut également être estimée à partir des données de météorologie.

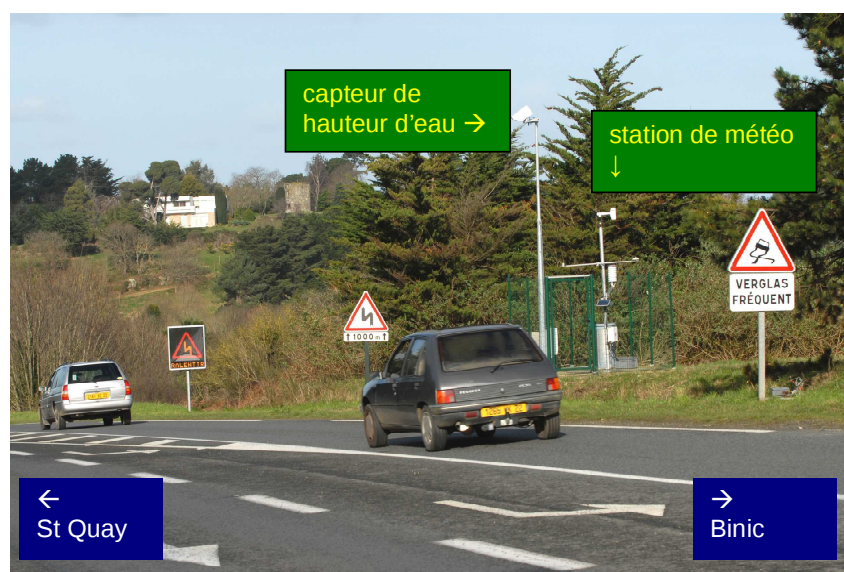


Figure 64. Site d'expérimentation sur la RD 786 (commune d'Etables sur Mer)

Une autre contrainte imposant une deuxième vitesse limite est celle liée à la distance d'arrêt, qui doit être inférieure à la distance de visibilité. Pour un véhicule de masse « M » freinant à une vitesse « V », la relation reliant l'énergie dissipée sur une distance de freinage « d » à la perte d'énergie cinétique du véhicule est la suivante :

$$(73) \quad \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2 = M \cdot \ddot{x} \cdot d$$

avec $\ddot{x}$: décélération.

Or

$$(74) \quad \ddot{x} = \frac{X}{M} = \frac{\mu \cdot Z}{M} = \frac{\mu \cdot M \cdot g}{M} = \mu \cdot g$$

avec X : force de frottement longitudinal ;

Z : charge appliquée par le véhicule sur le sol.

d'où

$$(75) \quad V^2 = 2 \cdot \mu \cdot g \cdot d$$

La valeur limite V_2 de la vitesse « V » de la formule (75) est obtenue en remplaçant « d » par la distance de visibilité. La valeur de l'adhérence « μ » est prise égale au CFT modifié (formule (71)).

Un exemple de profils de vitesses de passage est montré dans Figure 65. Les trois courbes sont différenciées par le degré de mouillage de la chaussée : le terme « CFT mesuré » signifie que le revêtement est mouillé par l'appareil SCRIM, le terme « 2,5 mm/h » signifie que le revêtement est mouillé par une pluie d'intensité de 2,5 mm/h, et de même pour « 7,5 mm/h ».

A noter que l'usage d'une intensité pluviométrique pour exprimer le mouillage d'une chaussée n'est pas tout à fait rigoureux car la hauteur d'eau sur la chaussée dépend également d'autres facteurs comme le dévers transversal, la macrotexture de surface, la longueur d'écoulement, etc. Des travaux de modélisation sont en cours au LCPC – résultats non encore publiés – pour estimer la hauteur d'eau durant la période de séchage après une pluie en tenant compte de l'influence du vent, de la température de surface et de l'air, etc.

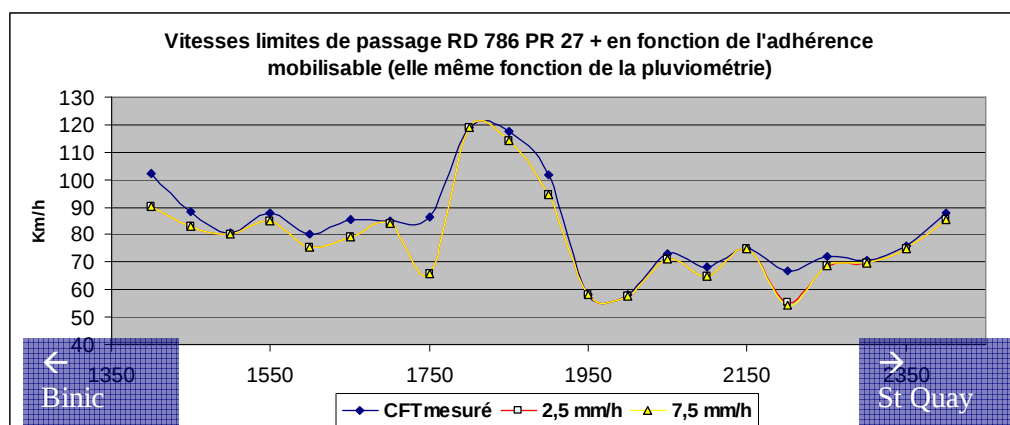


Figure 65. Profil de vitesses de passage

Les points bas des profils de vitesses de la Figure 65 sont dus pour le premier (PR 1750) à la présence d'ornières, augmentant très sensiblement les hauteurs d'eau, et pour le second (PR 2200) à une section présentant une visibilité réduite.

Le PR 1750 a été choisi comme « zone de rupture » nécessitant une information aux conducteurs arrivant de la ville de Binic. Des panneaux à messages variables (PMV) (Figure

64) ont donc été installés en amont de cette zone et des expérimentations de longue durée (24 mois au total) pour évaluer l'efficacité de divers messages d'alerte en termes de réduction des vitesses d'approche.

3.7.3 Bénéfices d'un projet appliqué

IRCAD, tout comme l'étude du polissage des chaussées, fait partie des projets dans lesquels j'ai pu appliquer mes connaissances en adhérence au service de la société. Outre la richesse apportée par la coordination du travail des partenaires provenant d'horizons très divers, exigeant une vision plus globale que celle développée dans mes premiers projets, le côté d'application du projet exige également une meilleure maîtrise des connaissances sur l'adhérence pour optimiser leur utilisation dans le développement des outils de diagnostic et d'information. Je retrouve à cette occasion le passage du laboratoire – dans le sens large du terme intégrant des pistes d'essais – à l'ouvrage réel, qui était constitué des sections de la RD 786 dans le département des Côtes d'Armor.

IRCAD étant lancé après l'étude polissage, j'ai eu donc le temps de mettre en œuvre une démarche qui a donné ses fruits : identifier les besoins pour démarrer le projet et les utilisateurs pour le terminer. La simplicité des modèles de calcul de la vitesse de passage, incluant au passage le modèle adhérence/mouillage, a été voulue en raison du caractère opérationnel du produit attendu (le système d'information). Il est important de noter que ces modèles simples ont été quand même validés par des outils plus complexes (modèles de dynamique des véhicules, modèles météorologie/vent/mouillage, véhicules instrumentés), qui permettaient d'évaluer les limites due à la simplicité. Cet aspect souligne une démarche que je m'efforcerai de mettre en œuvre autant que possible dans chaque projet : nous devons développer continuellement des recherches cognitives afin de disposer suffisamment de connaissances utiles aux applications. Je perçois sous le vocable « recherche appliquée » cette combinaison cognitif/appliqué. Cette vision n'est pas toujours partagée par mes prédécesseurs ou plus généralement par d'autres acteurs de la route. Une démarche empirique est certes nécessaire, mais elle peut être guidée par des connaissances théoriques afin d'économiser les délais et les investissements.

L'autre aspect innovant du projet IRCAD était son accent sur des expérimentations sur routes réelles (18 mois au total) avec leurs usagers. Il impliquait donc :

- au niveau de l'organisation des expérimentations, une coordination de diverses interventions pour l'installation et l'entretien des équipements de mesure, et pour la récupération des données ;
- au niveau du déroulement des expérimentations, un travail en amont pour valider l'outil de diagnostic et un travail de suivi pour évaluer le comportement des conducteurs face à divers scénarii d'alerte.

J'ai surtout retenu de ce projet la partie liée à sa gestion qui représentait les $\frac{3}{4}$ du temps consacré au projet. Cette gestion comportait en premier lieu la partie administrative avec :

- l'élaboration des documents administratifs (convention, accord de consortium) ;
- la répartition et le suivi de l'exécution des budgets, les relevés de dépenses et la facturation ;
- la production des livrables, qui comportait notamment une gestion du respect des délais.

J'avais donc mis à profit des leçons apprises lors d'un stage sur la gestion des projets. Appliquées à neuf partenaires sur une durée de 4 ans, ces leçons ont été enrichies et une certaine méthodologie de travail s'est progressivement mise en place. Faut-il passer autant de temps sur ces tâches ? La question m'est venue à l'esprit et m'a été posée également par des jeunes chercheurs arrivant dans mon équipe. A l'issue d'IRCAD, je répondrais « oui » car ces tâches font partir intégrante d'un projet de recherche de grande ampleur. Le juste équilibre à trouver est la limite entre ce que nous devons faire et ce que nous devons déléguer, non seulement aux partenaires mais aussi aux services administratifs de la maison.

En déléguant, je me suis efforcé de gérer uniquement le lien entre partenaires et celui liant les partenaires aux services administratifs du LCPC et de la DRI (ex-DRAST). Cet exercice délicat faisait émerger un autre aspect important que j'avais noté dans le cours de management et que j'avais mis en œuvre dans IRCAD : il s'agit de la communication et plus généralement des relations humaines. En effet, l'un des éléments de réussite de ce projet a été le lien entre les différents partenaires que j'ai su instaurer au sein du consortium. Un système d'information, parallèle à celui d'IRCAD, a été mis en place dès le début du projet afin que tous les partenaires aient accès aux mêmes informations. Possédant une information cohérente et trouvant sa place dans l'équipe projet, chaque partenaire avait donc rempli sa mission.

Un dernier aspect que je tiens à souligner est l'aspect d'intégration, qui permettait de recomposer toutes les briques apportées par les partenaires et de livrer le produit final. Cet aspect est non seulement important en termes de produit mais aussi en termes de fil conducteur, qui guidait tous les acteurs du projet vers la même finalité.

4 BILAN ET PERSPECTIVES

4.1 Bilan des connaissances

4.1.1 La logique des travaux menés

Partant d'un besoin récurrent – meilleure maîtrise de la relation entre le coefficient de frottement généré à l'interface pneumatique/chaussée et la texture de la surface de chaussée (3.3), j'ai progressivement mis en place une logique structurant mes travaux de recherche :

- pour prendre en compte l'influence de la microtexture (3.4) ;
- pour intégrer les autres paramètres liés au contact pneumatique/chaussée comme le pneumatique, le mouillage, la vitesse, etc. et ceux liés à l'évolution dans le temps comme le trafic, le climat, etc (3.5).

Ces travaux constituaient une base théorique, qui a été ensuite adaptée au contexte particulier des projets d'application (3.6, 3.7) qui, à leur tour, permettaient d'identifier d'autres besoins de recherche.

4.1.2 Constat sur la relation texture/adhérence

L'usage de la courbe de Stribeck (3.6.3) est prometteur car elle représente toutes les formes de variation du coefficient de frottement avec la vitesse que l'on rencontre dans la littérature. Ce caractère « universel » permet de corriger le problème posé par la profusion de modèles que l'on voit dans la littérature. Par ailleurs, les travaux initiés dans le projet HERMES (7.2.3) ont

montré qu'une formulation simple (3.6.4) de cette courbe pouvait prendre en compte l'influence de divers paramètres.

Quel que soit le type de modèle, on retrouve toujours un terme lié à l'influence de la microtexture. Dans la plupart des cas, ce terme est exprimé sous la forme d'un coefficient de frottement mesuré à une vitesse dite « faible » (< 50 km/h). Cette représentation ne peut pas être intrinsèque à la microtexture car elle intègre forcément l'influence du pneumatique, des conditions de mesure, etc. De plus, une vitesse de 50 km/h peut être considérée comme « faible » pour certains appareils de mesure comme l'ADHERA [32], mais « élevée » pour d'autres comme le GRIPTESTER [32]. La définition d'une vitesse caractérisant la microtexture n'est donc pas universelle. Une description géométrique de la microtexture est donc préférable.

4.1.3 Constat sur la microtexture

La mesure de la microtexture bute sur les limites technologiques des capteurs actuellement disponibles. Les variations importantes d'altitudes d'un profil de surface de chaussée et la finesse requise pour explorer la microtexture ne sont pas compatibles avec le compromis étendue/résolution de mesure existant sur tous les capteurs. L'usage des techniques de mesure et d'analyse d'images constitue une ouverture intéressante vers des mesures rapides, condition préliminaire à une utilisation opérationnelle. Mes travaux avec l'Université de Poitiers ont montré la faisabilité de ces techniques d'images et méritent d'être poursuivis.

J'ai progressé dans la caractérisation de la microtexture en proposant deux paramètres décrivant l'angularité des irrégularités de surface (3.4.2). Ces paramètres ont été ensuite intégrés dans un modèle calculant un coefficient de frottement généré par la déformation viscoélastique de la gomme du pneumatique.

Malgré ces avancées, la question sur l'échelle utile de microtexture n'est pas complètement résolue. Certains résultats théoriques ont permis de voir que plusieurs échelles contribuent à la génération du frottement, les ordres de grandeurs étant situées dans les gammes de la dizaine à la centaine de microns (3.4.3). Cependant, l'absence des échelles plus fines dans les mesures n'a pas permis de quantifier le poids de celles-ci. Une approche de description multi-échelles utilisant des outils fractals (3.4.4), malgré la complexité des outils théoriques mis en œuvre, n'a pas donné de résultats convaincants.

4.1.4 Constat sur la prise en compte d'autres paramètres influents

En dehors de la texture des surfaces de chaussée, la vitesse de la roue effectuant la mesure de frottement est le paramètre le plus utilisé dans des modèles trouvés dans la littérature. La vitesse est par ailleurs associée à un paramètre caractérisant la macrotexture de la surface de chaussée. A travers l'utilisation de la courbe de Stribeck (3.6.4), j'ai identifié un autre couplage intervenant également dans la variation de l'adhérence sur chaussée mouillée avec la vitesse : il s'agit de la hauteur d'eau sur la chaussée et de la profondeur de sculpture du pneumatique.

Malgré des résultats encourageants, les deux projets d'application HERMES (3.6) et IRCAD (3.7) ont soulevé une lacune importante dans la prise en compte du mouillage de la chaussée

dans l'évaluation de l'adhérence. La thématique mouillage/adhérence nécessite probablement dans les années à venir des développements importants.

4.1.5 Constat sur la prise en compte de l'évolution de l'adhérence dans le temps

Démarrée en pointillé il y a presque 10 ans, avec une meilleure structuration depuis l'acquisition de la machine de Wehner et Schulze (WS) en 2004, cette thématique de recherche a produit un bilan satisfaisant. Avec une méthode d'essais de laboratoire réaliste et des travaux de modélisation permettant de mieux comprendre les phénomènes, j'ai acquis des progrès notables dans le développement d'outils de prévision de l'évolution de l'adhérence. Des approfondissements et améliorations sont encore à faire, notamment dans la prise en compte des phénomènes comme le vieillissement ou les variations saisonnières et la mise en relation entre le polissage en laboratoire et le trafic réel, mais les premiers résultats montrent qu'une telle prévision est possible.

4.2 Une méthodologie de conduite des recherches qui se met en place

Depuis les premières questions posées à la fin de ma thèse jusqu'au bilan dressé dans le paragraphe précédent, j'ai progressivement mis en place et ajusté une certaine méthode de travail qui, sans avoir besoin d'être identique à chaque projet, constitue un guide avec quelques invariants pour conduire des recherches.

Quitte à répéter une nième fois, je pense qu'il est nécessaire d'identifier dès le départ les besoins auxquels la recherche doit répondre. Un sujet comme l'adhérence est tellement vaste que l'exploration d'une partie du sujet peut prendre rapidement quelques années. Les premiers contacts que j'ai eus avec des équipes de recherche universitaires – lors de la préparation de l'étude sur la microtexture – n'étaient pas cadrés par cette identification des besoins et entraînaient donc des propositions de travail très pointues – certes très intéressantes – et très éloignées d'une mise en application à court terme (3 à 4 ans).

L'identification des besoins implique aussi celle des utilisateurs des résultats de la recherche. Cette étape contribue au guidage des travaux et surtout nous oblige à adapter les produits au type d'utilisation. Le complément théorie/application dont je parlais au début de ce mémoire n'est qu'une illustration de cette adaptation.

L'exercice peut devenir rapidement délicat si nous ne possédons pas assez de matière pour développer adéquatement un produit. L'exemple type est le modèle adhérence/mouillage utilisé dans le projet IRCAD (formule (72)), qui n'est pas assez robuste mais qui est le seul disponible. Le bilan du projet HERMES montrait aussi qu'une économie insignifiante d'investigation théorique (3.6.5) peut induire à l'arrivée l'abandon d'une approche prometteuse. J'arrive donc au troisième invariant qu'est le complément cognitif/appliqué. Je suis arrivé au LCPC à une époque – début des années 90 – où l'aspect cognitif était négligé au dépend de l'appliqué. Ce contexte a été justifié par le fait qu'il y avait un besoin dans les années 70 et 80 de développer des appareils de mesure pour répondre à une nécessité de surveillance du réseau routier. Cet engouement a entraîné l'apparition de nombreux appareils en France et en Europe, qui induisait un besoin de les harmoniser. Je pense qu'il faut poursuivre ces travaux d'harmonisation mais aussi redynamiser des recherches théoriques.

De nombreux travaux théoriques ont été menés dans le domaine de l'adhérence, ou plus généralement du frottement pneumatique/chaussée, dans les années 60 et 70. Il s'agissait principalement des travaux menés au TRL en Angleterre sur le contact lubrifié mono-

indenteur/support élastomère de Sabey, Greenwood et Tabor [20][42][43], avec des modélisations de la physique des phénomènes pour expliquer l'importance de la déformation d'hystérésis de la gomme. Venaient ensuite des travaux de Moore [44][45] sur le viscoplanage en considérant des conditions de lubrification élastohydrodynamique. En France, certaines recherches avaient été menées au LCPC par Barquins [46] sur des forces d'adhésion mais n'ont pas été poursuivies. J'ai essayé, à mon arrivée au LCPC de réintroduire ces travaux théoriques en exploitant des connaissances disponibles dans le domaine de la tribologie. Ce vaste ensemble de disciplines liées au contact – lubrifié ou non – entre deux solides mérite d'être mieux exploiter car certaines théories existantes (contact entre surfaces rugueuses, régimes de lubrification, usure, etc.) sont adaptables au domaine du contact pneumatique/chaussée, moyennant une prise en compte de quelques spécificités : viscoélasticité de la gomme, superposition d'échelles de texture des revêtements de chaussée, etc. Les articles récents (10.1, réf. 6 et 4) que j'ai publiés avec Malal Kane, chercheur arrivant de l'INSA de Lyon et spécialiste des contacts lubrifiés, montrent que cette adaptation est possible.

L'écriture de ce mémoire constitue donc une occasion pour identifier des thématiques pour lesquelles des recherches théoriques supplémentaires peuvent permettre de progresser. L'objet du paragraphe suivant est de lister ces recherches.

4.3 Des idées pour continuer

En quinze ans passées dans le domaine de l'adhérence, j'ai eu l'opportunité d'aborder ce domaine de recherches très riche sous différents angles allant de la compréhension des mécanismes de contact à l'interface pneumatique/chaussée jusqu'à l'information aux conducteurs de l'état d'adhérence de la chaussée (paragraphe 3.3 à 3.7). Quinze ans pour embrasser un spectre aussi large c'est également très court pour approfondir certains aspects, comme le font de nombreux spécialistes. Cependant, cette expérience m'a permis de construire un schéma global du problème de contact pneumatique/chaussée (Figure 66), de faire un bilan des connaissances et d'identifier les aspects nécessitant des efforts de recherche dans les années à venir.

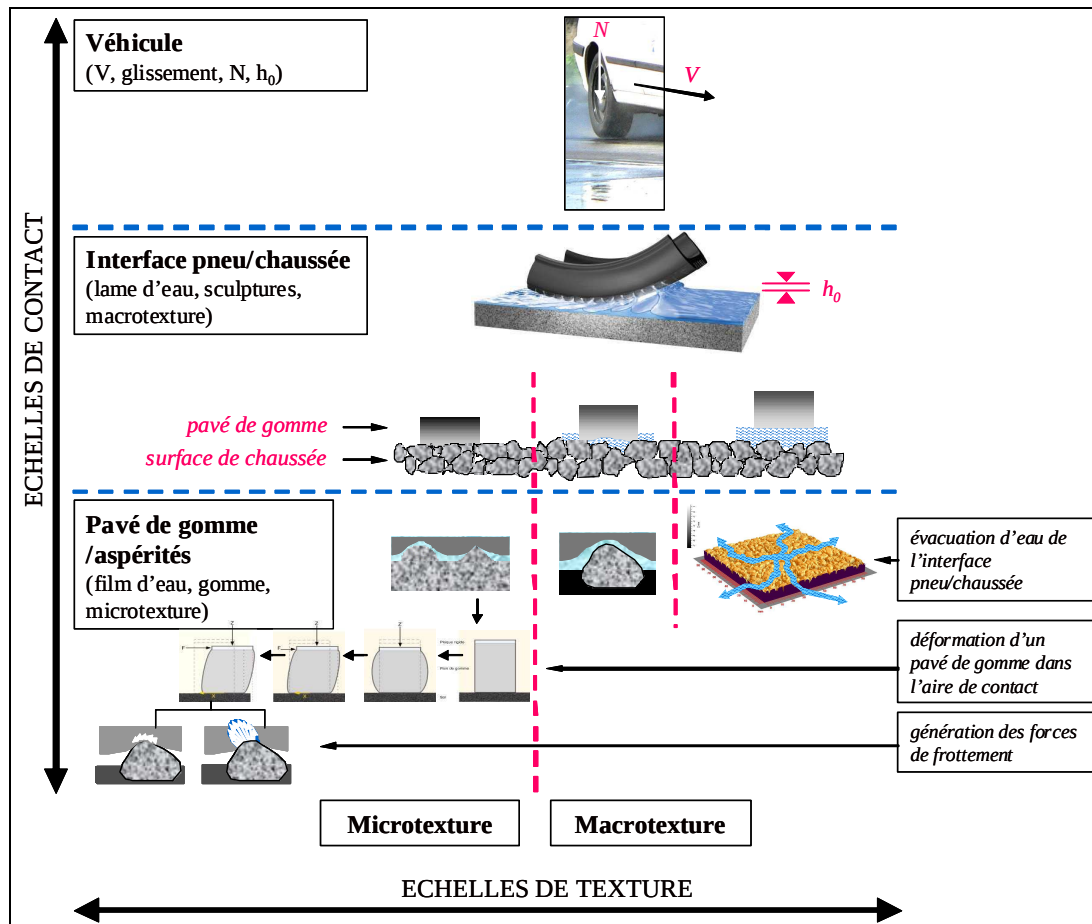


Figure 66. Adhérence des chaussées – Echelles et facteurs influents

Un schéma global permet aussi d'harmoniser l'ensemble des travaux notamment au niveau de la complexité accordée au développement des outils théoriques. Sans prétendre de résoudre complètement le problème d'adhérence, voici les sujets de recherche que j'ai identifiés pour les années à venir :

1. Régimes de lubrification à l'interface pneumatique/chaussée : La répartition de l'eau dans l'aire de contact dépend (comme on a vu dans 3) de l'interaction entre la macrotexture et les sculptures du pneumatique d'une part, et entre la microtexture et les pains de gomme de la bande de roulement d'autre part. Si la première interaction fait déjà l'objet de nombreuses recherches, peu de résultats existent pour la seconde. Il est donc nécessaire de voir comment le film d'eau résiduel ($\cong 0,1$ mm) est réparti en fonction du mode de déformation des pains de gomme (compression, cisaillement, glissement) et de la microtexture de la chaussée. Cette connaissance permet de déterminer les différents régimes de lubrification mis en jeu, et de localiser des zones de contact réel où la génération des forces de frottement est possible. Une approche combinant l'observation – par visualisation du contact – et la modélisation peut apporter de très riches renseignements. L'illustration est faite dans la Figure 67 où l'on peut observer le glissement d'un patin de gomme frottant sur une surface de chaussée en présence d'eau. L'utilisation des surfaces dont la géométrie est connue (demi-sphères, pyramides, etc.) (Figure 68) peut être utile dans un premier temps pour

estimer l'ordre de grandeur des descripteurs liés au film d'eau comme l'épaisseur, la pression, ou encore de la déformation des pains de gomme.

2. Relation entre l'adhérence et le mouillage de la chaussée. Une mesure de hauteurs d'eau (h_0) sur la chaussée est trop macroscopique pour être un indicateur fiable de l'adhérence disponible (μ). Les (très peu) modèles μ - h_0 existants traitent souvent de l'influence des lames d'eau ($h_0 > 1$ mm) sur l'apparition de l'aquaplanage. Aucun ne traite le cas de films d'eau minces ($h_0 < 1$ mm). De plus, s'agissant généralement de modèles d'ajustement, ils ne sont pas utilisables en dehors des conditions expérimentales pour lesquelles ils sont construits. Or ces derniers sont à l'origine de nombreux accidents par temps de pluie, notamment après la pluie. Cette tendance surprenante est due au fait qu'une chaussée faiblement mouillée après une pluie ne présente pas de danger apparent pour un conducteur peu averti (chaussée paraissant « sèche », peu de gênes de visibilité). Or le schéma de l'aire de contact présenté dans le paragraphe 3 (Figure 12) montre que l'adhérence d'une chaussée faiblement mouillée peut encore être insuffisante. Il est donc nécessaire de disposer de modèles μ - h_0 pour des cas de h_0 faibles. A partir de la connaissance des régimes de lubrification mis en jeu dans l'aire de contact (sujet de recherche n° 1), on peut calculer des forces de frottement locales et les mettre en relation avec la force de frottement mesurée macroscopiquement. Des descripteurs du mouillage de la chaussée plus pertinents que la hauteur d'eau libre h_0 peuvent être développés et mis en relation avec des forces de frottement.
3. Microtexture. Mes premiers travaux dans le domaine de d'adhérence méritent d'être poursuivis. En effet, même si la méthode des indenteurs donnait des résultats prometteurs, la corrélation entre les deux paramètres angulaires (voir 3.4) et le coefficient de frottement est encore entachée d'incertitudes importantes. Une modélisation plus complète du contact pain de gomme/aspérités de chaussée est nécessaire pour intégrer l'influence de la macrotexture. Cette modélisation permettra également d'identifier des échelles « utiles » de microtexture vis-à-vis de l'indentation des pains de gomme et de l'expulsion des films d'eau minces. Pour l'indentation, le recours à la visualisation est nécessaire – utilisant des surfaces « modèles » – pour observer l'enveloppement des aspérités de chaussée par le pneumatique. La visualisation apportera également des renseignements très riches sur le processus d'expulsion d'eau.
4. Modélisation du contact roue/sol. La nécessité de cette modélisation a été révélée dans les deux projets HERMES (7.2.3) et IRCAD (7.3.2). Il s'agit ici, contrairement aux travaux cités dans la piste précédente, d'une modélisation macroscopique prenant en compte des conditions de contact comme : la vitesse d'avancement de la roue, le mode de contact (roulement, glissement partiel ou total), la charge à la roue, etc. Ce modèle de contact peut néanmoins s'appuyer sur des résultats obtenus dans les autres sujets : il peut intégrer par exemple des indicateurs de mouillage développés dans le sujet 3.
5. Evolution de l'adhérence. Des progrès ont été accomplis dans ce domaine, mais il faut poursuivre les efforts pour aboutir à un outil de prédiction fiable. En plus de la thèse de Dan Zhao, d'autres axes de recherche sont identifiés :
 - o une meilleure compréhension de l'influence des variations saisonnières sur l'évolution de l'adhérence. L'exploitation des données de météorologie en parallèle avec celle des données d'adhérence devrait permettre de mieux ajuster des fonctions (semi)périodiques sur des observations expérimentales ;

- o une modélisation physique plus complète de l'évolution de l'adhérence intégrant des mécanismes majeurs. Le premier modèle fournit des résultats prometteurs, mais certaines hypothèses ont besoin d'être validées par un plus grand nombre de sites expérimentaux.
- o une meilleure compréhension de l'influence mutuelle des paramètres de formulation sur l'évolution de l'adhérence.

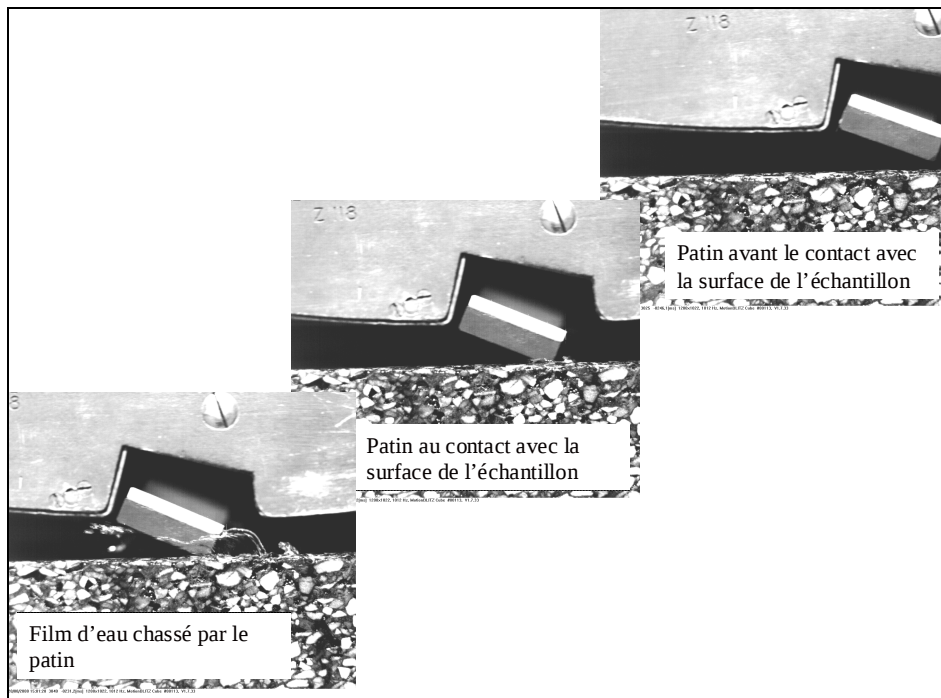


Figure 67. Visualisation du contact entre un patin de gomme et une surface de chaussée

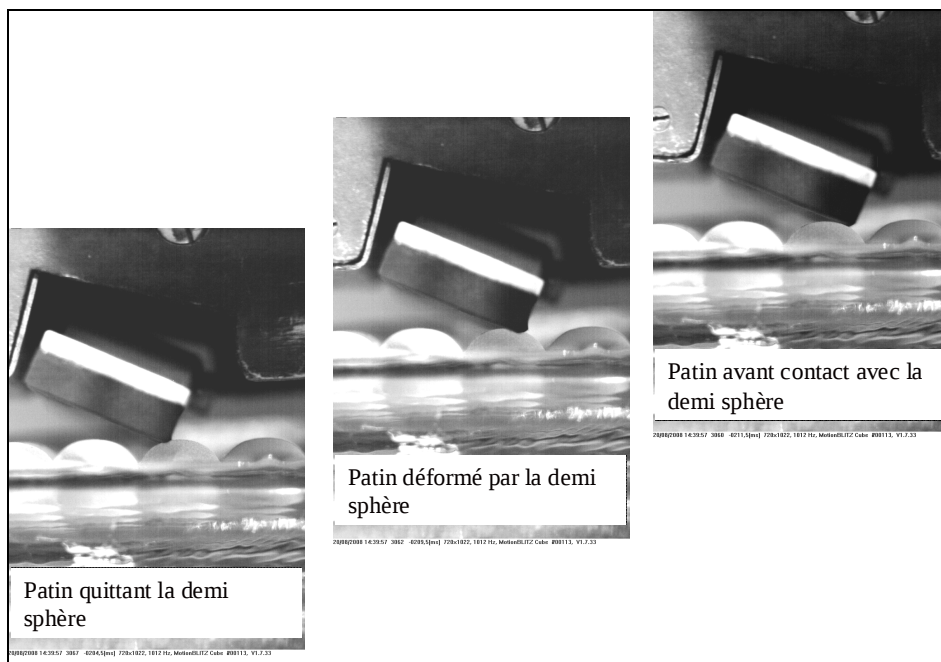


Figure 68. Visualisation du contact entre un patin de gomme et une surface composée de demi-sphères

Il est important de noter que des notions comme le glissement ou le frottement sont utilisées sans précision sur l'échelle d'observation. Le glissement roue/sol est défini comme étant le rapport entre la vitesse de glissement du pneumatique sur la surface de chaussée et la vitesse de la roue. Cette notion de rapport de vitesses n'apparaît pas lorsque l'on considère le glissement d'un pavé de gomme sur des aspérités de chaussée. Plus généralement, des modèles d'adhérence sont développés à diverses échelles mais peu d'études traitent du passage d'une échelle à une autre (Figure 66). La problématique est complexe, mais elle nécessite une réflexion dans le but de pouvoir prédire l'adhérence mesurée par des appareils de mesure ou par des véhicules à partir de la connaissance des mécanismes mis en jeu dans l'aire de contact.

5 ENCADREMENT DE THESES

5.1 Thèse de Yannick Beautru

<u>Descriptif</u>
« Relation mouillage/adhérence », Directeur de thèse : Philippe Lepert, Ecole Centrale de Nantes, 2009-2012.
<u>Objectifs</u>
Mieux comprendre les mécanismes de lubrification mis en jeu à l'interface pneumatique/chaussée afin de proposer des modèles de prévision de la variation de l'adhérence avec la hauteur d'eau.
<u>Présentation</u>
L'adhérence des revêtements de chaussée, facteur aggravant des accidents, diminue lorsque les revêtements sont mouillés. L'utilisateur de la route ne perçoit ce phénomène qu'à travers l'aquaplanage, situation extrême où, sous l'influence d'une forte hauteur d'eau et d'une vitesse élevée, les pneumatiques du véhicule ne sont plus en contact avec la chaussée et entraînent une perte de contrôle du véhicule. Or l'aquaplanage ne représente qu'une faible part des accidents sur chaussées mouillées, les statistiques ayant montré d'autres situations plus « propices » à l'occurrence d'un accident : à la première pluie après une longue période sèche, ou après une pluie où la visibilité est recouvrée. Il est donc important de voir comment le mouillage influe sur l'adhérence. Outre l'intérêt que représente cette thématique de recherche pour l'accidentologie, donc pour la gestion des infrastructures ou pour les industries routières et automobiles, on peut voir aussi des retombées pour l'harmonisation des mesures d'adhérence en Europe, dont l'un des principaux facteurs de variabilité est le mouillage du revêtement mesuré. La thèse proposée vise donc à mieux comprendre les mécanismes de lubrification mis en jeu à l'interface pneumatique/chaussée afin de proposer des modèles de prévision de la variation de l'adhérence avec la hauteur d'eau. Elle comporte trois parties : 1. Mécanismes de lubrification : il s'agit d'étudier, à l'aide de modèles, l'évacuation d'un film d'eau d'épaisseur h_0 dans l'aire de contact entre un pneumatique et une surface de chaussée. L'évacuation tiendra compte des conditions de contact (charge à la roue, vitesse, glissement) et des caractéristiques liées au pneumatique (type de gomme en particulier) et à la surface de chaussée (macro- et microtexture). L'objectif est de déterminer la fraction d'aire de contact où le pneumatique touche réellement la surface de chaussée. 2. Calcul d'un coefficient de frottement en fonction de la hauteur d'eau : il s'agit de calculer un coefficient de frottement « μ » lié à la surface réelle de contact, qui dépend d'une hauteur d'eau initiale h_0 et des conditions de contact, et d'en déduire une loi de variation $\mu-h_0$. Une comparaison avec des lois existantes sera faite. Des conditions d'occurrence du viscoplanage (glissance sur des revêtements mouillés dont le mouillage n'est pas perçu comme un danger par le conducteur) et de l'aquaplanage seront définies. 3. Validation expérimentale : il s'agit de valider le modèle $\mu-h_0$ pour des conditions de contact représentatives d'une situation de conduite réelle (utilisant un véhicule instrumenté) ou d'une opération de suivi du réseau routier (utilisant des appareils d'auscultation comme l'ADHERA et le SCRIM). Les essais seront réalisés sur la piste du LCPC de Nantes.
<u>Publications</u> (cette liste ne tient pas compte du mémoire de thèse)

5.2 Thèse de Dan Zhao

<u>Descriptif</u> « Préviation de l'Evolution de l'Adhérence des Chaussées », Directeur de thèse : François de Larrard, Ecole Centrale de Nantes, 2008-2011.
<u>Objectifs</u> - Développer la relation reliant la durée de polissage au trafic réel. - Mieux intégrer les effets du vieillissement et des variations saisonnières dans la prévision de l'évolution de l'adhérence. - Mieux comprendre l'influence des conditions météorologiques sur les variations saisonnières.
<u>Présentation</u> Cette thèse fait suite à celle de Zhen-Zhong Tang pour confirmer ou améliorer certains résultats importants comme la relation entre la durée de polissage (N) et le trafic (T) (3.5.2.4), ou l'intégration de l'effet du vieillissement dans la prévision de l'évolution de l'adhérence. Dans la partie théorique, il s'agit de mieux modéliser les conditions de contact lors du polissage par la machine de Wehner et Schulze (WS), et celles entre une roue de véhicule (VL, PL) et un revêtement de chaussée. Cette modélisation viendra compléter un modèle simple décrivant l'évolution d'un profil de surface par des chargements tangentiels répétés développé par Malal Kane, chercheur au LCPC. Une mise en correspondance entre le nombre de passages à la machine WS et le nombre de chargements répétés par les roues afin d'obtenir la même évolution d'un profil de surface permettra d'établir la relation N-T. Ces travaux de modélisation permettront également d'évaluer l'influence relative VL/PL. Dans la partie expérimentale, on cherche dans un premier temps à évaluer l'influence du type de bitume sur l'effet du vieillissement. Le temps d'une thèse ne permettant pas de réaliser cette étude à longue durée, nous avons recours à une machine de laboratoire pour accélérer le vieillissement des échantillons de chaussée. Des essais de caractérisation de l'adhésivité bitume/granulats sont également à réaliser. Les résultats de cette étape permettront d'améliorer la fonction μ_B (3.5.3.2) exprimant le frottement sur une surface non circulée. Dans un deuxième temps, une fonction exprimant les fluctuations du coefficient de frottement dues aux variations saisonnières sera introduite. Cette fonction devra intégrer l'influence des conditions météorologiques (pluviométrie, températures, etc.). Sa validation sera basée sur l'exploitation des données existantes.
<u>Publications</u> (cette liste ne tient pas compte du mémoire de thèse) 1. Kane, M., Zhao, D., Do, M.-T., Chailleux, E., de Larrard, F., Exploring the ageing effect on skid resistance evolution of asphalt pavement, European Asphalt Technology Association (EATA) Conference, 15-16 June 2010, Parma, Italy. A paraître dans International Journal of Road Materials and Pavement Design, Special issues EATA 2010.

5.3 Thèse de Romarick Rotimbo

Descriptif

« Texture et la Rugosité de la Route », Directeur de thèse : Majdi Khoudeir, Université de Poitiers, 2007-2010.

Objectifs

- Mesurer des images de revêtements de chaussée et en restituer des cartographies de hauteurs.
- Caractériser des images de revêtements de chaussée.
- Caractériser des cartographies de hauteurs.

Présentation

Cette thèse fait suite à ma collaboration avec l'Université de Poitiers sur le développement d'un appareil de mesure de la texture utilisant des techniques d'analyses d'images. Elle fait suite également à la thèse d'Anis Ben Slimane (6.3.1) à laquelle j'ai eu le plaisir de contribuer en tant que participant et membre du jury de soutenance.

Le sujet s'inscrit dans le cadre des travaux développés depuis quelques années au laboratoire Signal, Images et Communications (SIC) sur le thème de la rugosité de surfaces texturées 3D. Pour l'instant, cette étude de la rugosité par traitement d'image a été effectuée sans tenir compte des divers problèmes générés, soit par le mouvement relatif surface-caméra, soit par la déformation de la surface elle-même, soit par leur comportement spectral et réflectif. Ainsi, dans le cadre des nombreuses applications où ces problèmes apparaissent, il devient nécessaire de développer des outils spécifiques d'analyse de cette surface et de caractérisation de la rugosité, notamment à partir de l'extraction de relief.

L'objectif de cette thèse consistera tout d'abord à approfondir, au moyen de modèles appropriés, le comportement d'images texturées non déformables en mouvement. Ces modèles devront prendre en compte la nature spéculaire ou non de la surface, la nature du mouvement aussi bien local que global. Une adaptation de la méthode existante, basée sur la stéréovision photométrique, devra être réalisée en tenant compte des problèmes ci-dessus. Dans un deuxième temps, on développera des critères multi échelles pour l'analyse de la rugosité de surface, qui prennent en compte à la fois l'aspect géométrique et l'aspect fréquentiel de la surface.

Puis, on s'intéressera au cas des surfaces pouvant être affectées, au cours du temps, par une pollution liquide ou solide. Cela concernera notamment les surfaces humides.

Publications (cette liste ne tient pas compte du mémoire de thèse)

5.4 Thèse de Zhen-Zhong Tang

<u>Descriptif</u> « Polissage et Adhérence des Chaussées Routières », Directeur de thèse : François de Larrard, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004-2007.
<u>Objectifs</u> - Mieux comprendre les phénomènes mis en jeu dans l'évolution de l'adhérence. - Mettre au point un essai de laboratoire pour simuler le polissage. - Développer des outils de prévision.
<u>Présentation</u> Cette thèse a fait suite à une coopération franco-allemande sur l'adhérence (7.2.2). Elle avait pour but initial de produire un essai de laboratoire pour simuler l'action du trafic sur des échantillons de chaussée et anticiper l'évolution de leur adhérence. Le principal outil expérimental de la thèse est la machine de Wehner et Schulze (WS) (3.5.2) dont le potentiel a été perçu lors des travaux en commun avec l'Université de Berlin. L'une des principales préoccupations a été la comparaison entre les résultats issus de cette machine et ceux provenant des routes réellement circulées. En effet, cette étape paraissait primordiale avant tout développement d'outils de prévision. Des routes nouvellement construites au démarrage de la thèse ont été choisies pour servir de base de validation. Il a été mené ensuite en parallèle des travaux de modélisation (3.5.3) et de développement d'outils de prévision (3.5.2). Il s'agissait des objectifs ambitieux qui, compte tenu de la durée d'une thèse, ont nécessité des hypothèses simplificatrices. Sur la modélisation, les variations saisonnières n'ont pas été prises en compte. Sur les outils de prévision, la relation entre la durée de polissage et le trafic ne tenait pas compte des facteurs importants comme le type de revêtement, le climat, etc. De même, la relation entre la machine WS et des appareils d'auscultation nécessitait une étude plus complète, qui dépasserait le temps de thèse. Malgré ces approximations, les résultats ont permis de croire que la méthodologie initiée est bonne.
<u>Publications</u> (<i>cette liste ne tient pas compte du mémoire de thèse</i>) 1. Do, M.-T., Kane, M., Tang, Z., de Larrard, F., Physical Model for the Prediction of Pavement Polishing, Wear, Vol. 267, pp. 81-85, 2009. 2. Do, M.-T., Tang, Z., Kane, M., de Larrard, F., Evolution of Road Surface Skid-Resistance and Texture due to Polishing, Wear, Vol. 266, pp. 574-577, 2009. 3. Do, M.-T., Tang, Z., Kane, M., de Larrard, F., Laboratory Test Method for the Prediction of the Evolution of Road Skid-Resistance with Traffic, 6th Symposium on Pavement Surface Characteristics, Portoroz, Slovénie, 20-22 Octobre 2008. 4. Do, M.-T., Tang, Z., Kane, M., de Larrard, F., Pavement Polishing – Development of a Dedicated Laboratory Test and its Correlation with Road Results, Wear, Vol. 263, pp. 36-42, 2007. 5. Do, M.-T., Tang, Z., Kane, M., de Larrard, F., Evolution of Road-Surface Skid Resistance and Texture due to Polishing, 11th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Huddersfield (Grande Bretagne), 17-20 Juillet 2007. 6. Kane, M., Do, M.-T., Tang, Z., Modélisation du Polissage des Revêtements de Chaussée Soumis au Trafic, Journées Francophones de Tribologie « Lubrification et Tribologie des Revêtements Minces », Poitiers (France), 22-23 Mai 2007. 7. Tang, Z., Kane, M., Do, M.-T., de Larrard, F., Simulation Expérimentale du Polissage par le Trafic des Revêtements de Chaussée, Journées des Sciences de l'Ingénieur, Marne-la-Vallée (France), Décembre 2006.

5.5 Thèse de Pierrick Legrand

Descriptif

« Débruitage et Interpolation par Analyse de la Régularité Hölderienne : Application à la Modélisation du Frottement Pneumatique – Chaussée », Directeur de thèse : Jacques Levy-Vehel, Ecole Centrale de Nantes, 2001-2004.

Objectifs

- Rechercher une éventuelle structure fractale des chaussées.
- Mettre au point un modèle analytique fractal des profils.
- Calculer un coefficient de frottement à partir du couplage de ce modèle mathématique avec un modèle de contact.

Principaux résultats

Cette thèse a été lancée pour résoudre un problème pratique lié à l'échantillonnage des profils de microtexture. L'usage des fractals paraissait séduisant pour apporter une solution. La collaboration avec l'IRRCyN a été justifiée par la présence d'un spécialiste de fractals – qui était aussi le directeur de thèse – au sein de cet institut.

Les premiers travaux ont été dédiés à la confirmation du caractère fractal des profils de microtexture. Bien que ce résultat soit cité dans diverses publications, il fallait en avoir la confirmation pour justifier l'étude. Une méthode d'estimation de l'exposant de Hölder à partir des profils de microtexture a été proposée. Cette méthode d'estimation permettait de classer en termes de frottement des échantillons de chaussées.

La suite de la thèse a été consacrée à l'analyse de la régularité hölderienne sur les profils. Une méthode d'interpolation dite « hölderienne » a été proposée pour « agrandir » les profils. Cet outil semblait donc constituer un prétraitement spécialement adapté aux signaux pour lesquels le capteur n'a pas relevé les échelles les plus fines (signaux échantillonnés à 10 microns). D'autre part, lorsque l'on se plaçait aux limites de résolution du capteur (signaux échantillonnés à 2.5 microns), l'acquisition était perturbée par un bruit. Cet artefact pouvait être supprimé en appliquant une technique de débruitage dite « multifractal Bayésien ». Une nouvelle fois, ce prétraitement des signaux améliore la corrélation entre le frottement calculé et le frottement SRT.

Deux solutions de prétraitement des profils ont donc été rendues disponibles pour analyser les profils de surface de chaussée. Soit on choisit de mesurer des profils avec une relativement faible résolution puis on les interpole, soit on décide de se placer aux limites du capteur puis on effectue un débruitage.

Publications (cette liste ne tient pas compte du mémoire de thèse)

1. Legrand, P., Levy-Véhel, J., Do, M.-T., Fractal properties and characterization of road profiles, FRACTAL04, Complexity and Fractals in Nature, 8th International Multidisciplinary Conference, April 4-7, Vancouver, Canada, 2004.
2. Legrand, P., Levy-Véhel, J., Interpolation de signaux par conservation de la régularité Hölderienne, GRETSI03, 19 th GRETSI Symposium on Signal and Image Processing, September 8-11, Paris, 2003.
3. Legrand, P., Levy-Véhel, J., Local regularity-based interpolation, WAVELET X, Part of SPIE Symposium on Optical Science and Technology, CA, August 3-8, San Diego, Proceedings of SPIE, vol. 5207, 2003.

6 AUTRES ENCADREMENTS

6.1 Projets de fin d'études

1. Denis Mathelin, PFE, Ecole Nationale d'Ingénieur de St Etienne, Contribution à l'Elaboration d'un Indicateur Commun d'Adhérence en Europe, 2003. *Etude liée à l'harmonisation des méthodes de mesure d'adhérence en Europe (3.6.4), en particulier dans le cadre du projet HERMES (7.2.3).*
2. Julien Ortholan, PFE, Ecole Nationale d'Ingénieur de St Etienne, Prédiction de l'Adhérence à partir de la Texture des Surfaces de Chaussée, 2003. *Etude liée à la modélisation de la relation microtexture – frottement à basse vitesse (3.4.3).*
3. Stéphane Dolo, PFE, Ecole Nationale d'Ingénieur de St Etienne, Texture des Surfaces de Chaussée, 2002. *Etude menée dans le but d'identifier des paramètres de macrotexture que l'on peut extraire des cartographies de hauteurs.*
4. Cyril Boissinot, PFE, Ecole Nationale d'Ingénieur de St Etienne, Polissage des Surfaces de Chaussée, 2002. *Etude liée à l'évolution de l'adhérence (3.5.2).*
5. Nicolas Chouin, Stage 1ère année, Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, Relation Texture – Bruit de Contact Pneumatique/Chaussée, 2000. *Etude menée dans le but de voir la possibilité d'appliquer les descripteurs d'indenteur (3.4.2.4) à d'autres problèmes de contact.*
6. Simon Vidal, PFE, Ecole Nationale d'Ingénieur de St Etienne, Etude de l'Evolution de la Microtexture avec l'Usure par Polissage, 2000. *Etude liée à l'évolution de l'adhérence (3.5.4).*
7. Jérémy Etienne, Stage de fin de 2ème année, Ecole Centrale de Nantes, Description des Surfaces vis à vis du Frottement – Analyse de deux Paramètres Fonctionnels, 1999. *Etude liée à la caractérisation de la microtexture (3.4.2).*

6.2 Chercheurs étrangers

1. Sabina Taormina, stage effectué dans le cadre d'une thèse de Doctorat, Université de Catane, Italie, 2000. *Etude liée à l'évolution de l'adhérence (3.5.4).*
2. Annick Bédard, stage effectué dans le cadre d'une Maîtrise en Sciences Appliquées, Université Laval, Québec, Canada, 1998. *Etude liée à l'évolution de l'adhérence (3.5.4).*

6.3 Participations à des jurys

6.3.1 Jurys de thèses

1. Jamil Dakhallallah, Université d'Evry, Risque Intégré de Sortie de Route et Proposition d'une Assistance à la Conduite, 2010. *Participation en tant qu'examineur.*
2. Zhenzhong Tang, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Polissage et Adhérence des Chaussées Routières, 2007. *Participation en tant que conseiller d'étude.*
3. Pierrick Legrand, Université de Nantes, Débruitage et Interpolation par Analyse de la Régularité Hölderienne : Application à la Modélisation du Frottement Pneumatique – Chaussée, 2004. *Participation en tant que conseiller d'étude.*
4. Anis Benslimane, Université de Poitiers, Caractérisation de Textures Rugueuses par Traitement d'Images : Application aux Revêtements Routiers, 2004. *Participation en tant qu'examineur.*

6.3.2 Autres

1. Moumouni Ilboudo, TFE, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Influence de la température de l'eau de mouillage sur les valeurs de CFT mesurées par l'appareil SCRIM, 2009. *Participation en tant qu'expert.*
2. Philippe Cardon, TFE, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Aquaplanage dynamique et modélisation, 2008. *Participation en tant qu'expert.*
3. Fabrice Briet, TFE, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Simulation de l'Influence de l'Infrastructure sur l'Accidentologie des Poids Lourds, 2003. *Participation en tant qu'expert.*

7 CONTRATS DE RECHERCHE

7.1 Projets européens PCRD

7.1.1 Projet SKIDSAFE (2009-2012, projet en cours)

SKIDSAFE a pour objectif de développer des outils numériques permettant de prédire l'adhérence des chaussées mouillées à partir de la connaissance des matériaux constitutifs du pneumatique et du revêtement de chaussée. Les partenaires du projet sont : Université de Delft (Pays-Bas), LCPC (France), Aggregate Industries UK Limited (Grande-Bretagne), Geotecnia y Cimientos S.A. (Espagne), National Technical University of Athens (Grèce), Ooms Nederland Holding B.V. (Pays-Bas), Autostrade per l'Italia S.p.A. (Italie).

Je contribue à ce projet en pilotant un sujet (« work-package leader ») dédié à l'étude de la relation entre l'adhérence et le mouillage de la chaussée. J'encadre à ce titre la thèse de Yannick Beutru (n° 1, voir paragraphe 5.1).

7.1.2 Projet TYROSAFE (2008-2010, projet en cours)

TYROSAFE a pour objectif de faire un état de l'art sur les pratiques actuelles (réglementations, normalisations, mesures) en Europe en matière d'évaluation de trois qualités d'usage de la chaussée : adhérence, bruit de roulement et résistance au roulement. La finalité est de recenser des besoins de recherche et d'envisager des stratégies pour l'horizon de 2020. Les partenaires du projet sont : Arsenal Research (Autriche), LCPC (France), TRL (Grande-Bretagne), RWS (Pays-Bas), BASt (Allemagne), ZAG (Slovénie).

Je contribue à ce projet en pilotant un sujet (« work-package leader ») dédié à l'harmonisation des mesures d'adhérence en Europe. Il s'agit du sujet principal du projet – ayant conduit à son montage – dont les retombées peuvent être importantes pour différents acteurs impliqués dans la gestion des infrastructures routières (gestionnaires, opérateurs de mesure, constructeurs de matériels de mesure). Outre le travail d'animation (coordination des travaux, réunions de suivi), j'assume un travail administratif non négligeable (rapports d'avancement, suivi du budget et rapports financiers) en qualité de représentant du LCPC auprès du consortium. La nature de ce projet de support (Coordination and Support Action) m'amène également à organiser des séminaires (2008 à Portoroz en Slovénie, 2009 à Londres en Grande Bretagne). J'ai produit quatre livrables (rapports n° 1, 6, 7, 8, voir paragraphe 10.8).

7.1.3 Projet INTRO (2005-2008, projet terminé)

INTRO avait pour objectif de proposer de nouvelles technologies visant à informer les gestionnaires et les usagers de l'état des infrastructures (ouvrages d'art, routes) afin d'assister

les premiers dans la programmation des entretiens et les seconds dans leur sécurité. Les partenaires du projet sont : VTI (Suède), LCPC (France), INRETS (France), ISIS (France), EPFL (Suisse), IBDIM (Pologne), Arsenal Research (Autriche), ZAC (Slovénie), TRL (Grande- Bretagne).

J'ai contribué à ce projet en pilotant un sujet (« task leader ») dédié au développement d'un système embarqué permettant d'estimer l'adhérence disponible en toutes conditions (pluie, neige et verglas). L'objectif est de fournir aux conducteurs, au bord de son véhicule, des indicateurs sur l'état d'adhérence de la route (par exemple la distance de freinage). J'ai piloté trois équipes : une équipe du LCPC pour le développement d'un modèle reliant l'adhérence à la distance de freinage, une équipe d'Arsenal Research pour mener des essais en conditions pluvieuses, et une équipe du VTI pour mener des essais en conditions hivernales. J'ai produit un livrable (rapport n° 11, voir paragraphe 10.8).

7.1.4 Projet TROWS (2000-2003, projet terminé)

TROWS avait pour objectif de développer des outils expérimentaux et théoriques pour la prévision de l'usure des pneumatiques et du polissage des chaussées. Les partenaires du projet sont : TNO (Pays-Bas), Université de Delft (Pays-Bas), Université d'Helsinki (Finlande), Universités de Milan et de Florence (Italie), CETE Lyon et LCPC (France), Pirelli (Italie), Nokian Tires (Finlande), Viagroup, société de prestations de mesure (Suisse).

S'agissant de ma première participation aux projets européens, j'ai contribué à ce projet en tant que participant en supervisant notamment des expérimentations en site fermé, utilisant le Manège de Fatigue du LCPC, pour simuler l'action du trafic sur divers types de pneumatiques et de revêtements de chaussée. J'ai piloté deux équipes du LCPC : une équipe réalisant des essais sur le Manège et une autre réalisant des mesures de caractérisation de l'état d'usure des pneumatiques et des revêtements de chaussée. J'ai produit deux livrables (rapports n° 21, 22, voir paragraphe 10.8).

7.2 Autres types de projets européens

7.2.1 Action COST TU 0702 “Real-time monitoring, surveillance and control of road networks under adverse weather conditions” (2008-2012, projet en cours)

Ce projet de coopération a pour objectif de recenser des pratiques actuelles en Europe en matière de diagnostic des risques pour l'utilisateur de la route causés par une dégradation des conditions atmosphériques, et d'information aux usagers. Le diagnostic fait appel à des outils de prévision des qualités d'usage de la route (adhérence, visibilité, etc.) à partir des conditions météorologiques. Les partenaires du projet sont : INRETS (France), LCPC (France), Université de Gand (Belgique), EPFL Lausanne (Suisse), CRR (Belgique), Université de Delft (Pays-Bas), Arsenal (Autriche), National Technical University of Athens (Grèce), IBDIM (Pologne).

Je contribue à ce projet en pilotant un sujet (« work-package leader ») dédié à l'évaluation de l'impact des conditions atmosphériques sur l'état d'adhérence des chaussées. Les projets COST sont basés essentiellement sur des revues de littérature. Le nombre importants de partenaires (20 est une taille moyenne) et la faible fréquence des réunions (tous les 6 mois) exigent des responsables de sujet un effort important de coordination et de suivi. Les résultats issus de ce projet seront très utiles pour des recherches sur les systèmes d'information aux conducteurs en conditions atmosphériques dégradées (3.7).

7.2.2 Coopération franco-allemande dans le domaine de l'adhérence des chaussées (2002-2005, projet terminé)

Ce projet de coopération (2002-2005) avait pour objectif de mettre en commun les pratiques et les connaissances acquises par la France et l'Allemagne dans le domaine d'adhérence afin de

proposer des méthodologies communes pour l'auscultation des routes et pour la prévision d'un état d'adhérence des chaussées et son évolution sous l'effet du trafic. Les partenaires du projet sont : LCPC, SETRA, CETE Lyon, LR Angers (France), BAST, Université de Berlin (Allemagne).

Il s'agissait du point de départ de mes recherches menées avec la machine de Wehner et Schulze (3.5.2.2). J'ai contribué à ce projet en pilotant un sujet dédié au développement des méthodologies d'essais pour évaluer en laboratoire l'adhérence et son évolution dans le temps. Ces recherches ont permis de lancer une thèse sur le polissage des chaussées (voir paragraphe 5.4). J'ai produit un rapport (n° 14, voir paragraphe 10.8).

7.2.3 Projet HERMES(200-2004, projet terminé)

HERMES avait pour objectif de valider un projet de norme européenne visant à harmoniser les procédures d'évaluation de l'adhérence des chaussées. Les partenaires du projet sont : CRR (Belgique), LCPC et CETE Lyon (France), CEDEX (Espagne), DWW (Pays-Bas), TRL (Grande-Bretagne), DRI (Danemark).

J'ai contribué à ce projet en pilotant un sujet, en collaboration avec le DWW, dédié au développement d'un modèle exprimant la dépendance de l'adhérence de la vitesse. Ce modèle était au cœur du concept d'Index Européen de Frottement (EFI en anglais) qui a été proposé comme échelle commune de l'adhérence en Europe. J'ai organisé également deux campagnes d'essais de comparaison au LCPC de Nantes impliquant chacune 6-7 appareils de mesure venant de toute l'Europe et 20-25 participants. J'ai produit deux rapports (n° 16, 19, voir paragraphe 10.8).

7.3 Projets nationaux

7.3.1 Projet DIVAS (2007-2010, projet en cours)

Ce projet ANR (2007-2010) vise à développer des outils permettant de communiquer aux conducteurs des informations sur des risques liés : au tracé de l'itinéraire routier, à l'adhérence (par temps de pluie) et à la visibilité (par temps de brouillard). Les partenaires du projet sont : LCPC, CETE Normandie Centre, CETE de Lyon, Conseil Général des Côtes d'Armor, INRIA, Ecole des Mines, société Michelin, Université de Poitiers, Université de Clermont Ferrand.

Je contribue à ce projet en pilotant un sujet dédié à l'évaluation des risques la mise au point développement d'un système de mesure d'images de chaussée, la société Michelin sur le développement d'un modèle de contact pneumatique/chaussée mouillée et le LCPC sur le développement d'un modèle reliant les conditions météorologiques au mouillage de la chaussée. J'ai produit un livrable (rapport n° 5, voir paragraphe 10.8).

7.3.2 Projet IRCAD (2004-2009, projet terminé)

Ce projet du PREDIT (2004-2008) visait à développer des outils permettant d'établir un diagnostic sur des risques liés à la glissance de la chaussée, et des systèmes informant les conducteurs des risques encourus. Les partenaires du projet sont : LCPC, INRETS, CETE de Lyon, Conseil Général des Côtes d'Armor, sociétés CAR&D, NEXYAD, METEODYN et PROSIGN.

Il s'agit du projet « phare » de mes activités. En effet, en assumant la responsabilité de chef de projet, mon travail a été à la fois administratif (montage du projet, suivi financier, participation aux divers comités impliquant les financeurs et les utilisateurs, bilans et facturations) et technique (coordination des travaux, suivi de l'avancement, intégration, valorisation). La nature appliquée du projet (tester un système d'information sur routes réelles avec donc de vrais utilisateurs) exigeait une prise de responsabilité plus importante que dans le cadre des recherches antérieures. De plus, étant chargé d'un sujet, je travaillais également sur la comparaison entre l'adhérence mesurée par des appareils d'auscultation et celle estimée à bord d'un véhicule instrumenté. J'ai produit 8

livrables (rapports n° 2, 3, 4, 9, 10, 12, 13, 15, voir paragraphe 10.8), de nombreux rapports d'avancement pour la DRI (Direction de la Recherche et de l'Innovation) et participé à de nombreux séminaires de valorisation.

8 ACTIVITES COLLECTIVES

8.1 Gestion de l'équipe Infrastructure et Sécurité Routière

Parallèlement à mes activités de recherche, j'assume depuis 2004 la responsabilité d'une équipe de recherche au sein du LCPC. En 2009, cette équipe, appelée « section » dans l'organigramme du LCPC, est composée de douze personnes dont trois chercheurs et deux doctorants. Ma mission est multiple :

- sur le plan scientifique, il s'agit d'encadrer le travail des chercheurs afin d'atteindre les objectifs fixés en début de chaque année par la Direction. L'encadrement consiste en un suivi régulier des projets, en respectant les échéances, et des productions (articles, rapport). Tout en respectant la liberté des chercheurs, je cherche néanmoins à assurer une cohérence entre diverses activités ;
- sur le plan organisationnel, il s'agit de répartir le travail des techniciens en fonction de leurs compétences et des besoins exprimés par les chercheurs (incluant les doctorants). L'utilisation des équipements d'essais fait partie de cette planification ;
- sur le plan relationnel, il s'agit d'assurer un bon climat au sein de l'équipe. Ce travail, souvent ignoré dans les critères d'évaluation des chercheurs, est essentiel pour assurer un fonctionnement durable de l'équipe ;
- sur le plan administratif, il s'agit de gérer le budget accordé pour le fonctionnement quotidien et pour exécuter les contrats. Les chapitres courants de dépenses sont : consommables, déplacements, équipements.

8.2 Gestion du Laboratoire Texture/Adhérence

De 2000 à 2001, pour répondre à des demandes croissantes de mesure et de caractérisation de la texture des surfaces de chaussée, la Direction du LCPC m'a demandé de monter et d'en assurer la gestion un laboratoire dédié aux études de la texture et de son influence sur diverses propriétés comme l'adhérence, le bruit de roulement, etc. Outre l'aspect d'équipement, la gestion d'un tel laboratoire demande l'établissement d'un projet scientifique et d'un mode de fonctionnement pour répondre aux besoins exprimés par des équipes de recherche du LCPC et aussi par des clients extérieurs.

Le Laboratoire Texture/Adhérence, ainsi est le nom donné à ce laboratoire, a contribué à divers projets de recherche nationaux et internationaux. Il est continuellement en évolution : après l'achat des capteurs de laser en 2001 pour la mesure de la texture, nous avons acquis en 2004 une machine de polissage puis en 2007 des capteurs de mesure de hauteurs d'eau. En 2008, le laboratoire s'est enrichi des stations de météorologie pour l'étude de la relation entre la météorologie et le mouillage de la chaussée.

Avec des résultats prometteurs obtenus avec la machine de polissage de Wehner et Schulze, le laboratoire fait l'objet de nombreuses visites d'entreprises routières et d'instances internationales (CEN, AIPCR).

8.3 Actions de valorisation

Mes principales actions de valorisation se trouvent dans les contrats de recherche (voir paragraphe 7 pour la liste complète des contrats). En effet, il s'agit des opportunités d'appliquer des connaissances acquises et de rapporter des ressources financières. Ces dernières sont particulièrement importantes car elles permettent d'acheter d'autres équipements et donc, en retour, d'aller plus loin dans les connaissances. Il s'agit également des occasions d'établir des contacts et éventuellement des partenariats pour compléter nos compétences.

Je contribue également à des études d'expertise :

- en 1999, pour le compte de la Direction des Routes, en étudiant l'adhérence induite par la présence des produits absorbants sur la chaussée. Il s'agit de simuler sur la piste d'essais au LCPC de Nantes des conditions de répandage de ces produits et de voir l'évolution de l'adhérence du revêtement avec le trafic qui, dans un cas réel, a induit une glissance équivalente à celle du verglas et entraîné un accident mortel.
- de 2002 à 2003, pour le compte du SETRA, en étudiant l'adhérence des joints de dilatation des chaussées. Il s'agit de comprendre dans quelles conditions ces joints peuvent entraîner la chute des deux-roues motorisés. L'étude comporte donc une phase de mesure sur divers types de joints et une phase de simulation basée la modélisation de la dynamique des deux-roues.
- en 2008, j'ai effectué une étude pour l'entreprise Lafarge afin de mieux comprendre la résistance au polissage de onze granulats. Toujours en 2008 et dans le domaine du polissage, j'ai été contacté par la société Siemens pour étudier l'évolution de l'adhérence des poutres de béton utilisées comme des rails pour les trains sans conducteur de l'aéroport de Charles de Gaulle CDVal.

Mes actions de valorisation sont orientées également vers la rédaction des documents réglementaires. De 2000 à 2002, j'ai participé aux travaux du Groupe National des Caractéristiques de Surfaces (GNCDS) pour réviser la Circulaire d'Adhérence et pour la rédaction d'une méthodologie de mesure d'adhérence appelée « méthode d'essais n° 50 ». La Circulaire d'Adhérence rassemble des spécifications de niveaux d'adhérence pour diverses applications : réception des routes neuves, suivi du réseau routier, innovations, etc. Elle permet aux Maîtres d'œuvre de vérifier la conformité des travaux réalisés par des entreprises. L'exécution des mesures vérifiant la conformité est réalisée conformément aux procédures indiquées dans la méthode d'essais. L'établissement de ces deux documents demande donc une forte concertation entre divers acteurs impliqués dans le domaine d'adhérence : l'administration, l'entreprise routière, le producteur de granulats et le laboratoire de recherche. La participation à un tel groupe de travail me permet d'apporter des éclairages sur des questions posées par des praticiens. Elle me permet aussi de voir des difficultés du « terrain » (conditions d'essais mal maîtrisées, trafic, climat, etc.) et d'identifier des besoins de recherche.

Je participe régulièrement aux Journées Techniques Routes organisées annuellement par le LCPC à Nantes. Ces journées sont destinées à présenter à l'ensemble des LPC et, depuis peu, à des organismes extérieurs (industries, universités, etc.) des travaux (recherche, études de cas, chantiers, etc.) réalisés par diverses équipes des LPC. J'ai donc eu l'occasion de présenter des travaux sur la microtexture et sur le polissage. Ces journées sont suivies d'une journée destinée aux nouveaux arrivants dans le réseau. Il s'agit d'une journée de formation sur une

thématique choisie. J'ai donc partagé mon expérience sur le montage des projets européens et sur la prévision de l'évolution de l'adhérence.

Toujours dans le cadre de la diffusion des connaissances, je présente des posters aux divers salons de génie civil, comme le salon annuel d'Interoutes. J'écris également des articles de bilan dans le rapport général d'activités du LCPC.

En dehors de mes activités de recherche, privilégiant les projets subventionnés (voir 7) et les actions de valorisation (voir 8), il ne me reste finalement que peu de temps pour l'enseignement. Outre des journées de formation générale comme celle consacrée aux nouveaux arrivants dans le réseau des LPC, je donne une fois par an des cours à l'ENPC et l'ENI de Tarbes.

9 ACCREDITATION, QUALIFICATION DE MATERIELS

Il peut paraître surprenant de citer cette activité dans le cursus d'un chercheur. Après avoir conduit les campagnes d'essais listées ci-dessous et analysé moi-même les résultats, je supervise maintenant ce type d'essais, avec l'appui des agents de la section. Le suivi des appareils de mesure permet de voir la complexité de la mesure des forces de frottement entre un pneumatique et une surface de chaussée en présence d'eau. L'expérience visuelle est enrichissante car elle permet de faire des observations (déflexion du pneumatique, expulsion d'eau de l'aire de contact, etc.) qu'un travail de modélisation ou même d'expérimentation en laboratoire ne permet de voir. On s'aperçoit également des dispersions entre des appareils appartenant à la même flotte. La prise en compte de cette incertitude permet ensuite de limiter la complexité des modèles et de « se contenter » d'une certaine précision dans les prévisions.

- Organisation, pilotage et analyse de résultats d'essais croisés pour les appareils ADHERA (3 appareils) de 1998 à 2000.
- Organisation, pilotage et analyse de résultats d'essais croisés pour les appareils GRIPTESTER (4 appareils) en 2000.
- Organisation, pilotage et analyse de résultats de deux campagnes d'essais croisés pour des appareils de mesure d'adhérence européens dans le cadre du projet HERMES (7 appareils) en 2002.
- Organisation et pilotage d'essais croisés pour des appareils de mesure d'adhérence sur des pistes aéronautiques dans le cadre du projet Winter Runway Friction Measurement Program (10 appareils) en 2004.

10 LISTE DES PUBLICATIONS

10.1 Articles dans des revues internationales avec comité de lecture (ordre chronologique inverse)

1. M. Kane, D. Zhao, **M.-T. Do**, F. de Larrard, Exploring the Ageing Effect of Binder on Skid Resistance Evolution of Asphalt Pavement, International Journal of Road Materials and Pavement Design, Special issues EATA 2010, *à paraître en 2010*.
2. M. Kane, J.-M. Piau, **M.-T. Do**, On the Study of Polishing of Road Surface under Traffic Load, Journal of Transportation Engineering, *accepté, à paraître en 2010*.

3. **M.-T. Do**, M. Kane, Z. Tang, F. de Larrard, Physical Model for the Prediction of Pavement Polishing, *Wear*, Vol. 267, pp. 81-85, 2009.
4. **M.-T. Do**, Z. Tang, M. Kane, F. de Larrard, Evolution of Road Surface Skid-Resistance and Texture due to Polishing, *Wear*, Vol. 266, pp. 574-577, 2009.
5. M. Kane, **M.-T. Do**, Tribological Approach to Study the Polishing of Road Surface under Traffic, *Journal of Tribology, Materials, Surfaces and Interfaces*, Vol. 1, n° 4, pp. 203-210, 2008.
6. M. Kane, **M.-T. Do**, J.-M. Piau, Modelling of the Road Surface Polishing Based on Contact-Mechanics Approach, *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Special issues EATA 2008, Vol. 9, pp. 305-318, 2008.
7. A. Ben Slimane, M. Khoudeir, J. Brochard, **M.-T. Do**, Characterization of Road Microtexture by Means of Image Analysis, *Wear*, Vol. 264, Issues 5-6, pp. 464-468, 2008.
8. **M.-T. Do**, Z. Tang, M. Kane, F. de Larrard, Pavement Polishing – Development of a Dedicated Laboratory Test and its Correlation with Road Results, *Wear*, Vol. 263, pp. 36-42, 2007.
9. M. Khoudeir, J. Brochard, V. Legeay, **M.-T. Do**, Roughness Characterization through 3D Textured Image Analysis: Contribution to the Study of Road Wear Level, *Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, n° 19, pp. 93-104, 2004.
10. M. Khoudeir, J. Brochard, A. Benslimane, **M.-T. Do**, Estimation of the Luminance Map for a Lambertian Photometric Model: Application to the Study of Road Surface Roughness, *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 13, Issue 3, pp. 515-522, 2004.
11. F. Anfosso, **M.-T. Do**, Geometric Descriptors of Road Surface Texture in Relation to Tire/Road Noise, *Transportation Research Record*, n° 1806, 2002, pp. 160-167.
12. **M.-T. Do**, H. Zahouani, R. Vargiolu, Angular Parameter for Characterizing Road Surface Microtexture, *Transportation Research Record*, n° 1723, 2000, pp. 66-72.
13. **M.-T. Do**, O. Chaallal, P.-C. Aïtcin, Fatigue Behavior of High-Performance Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 5, n° 1, 1993, pp. 96-111.
14. **M.-T. Do**, G. Chanvillard, C. Lupien, P.-C. Aïtcin, Etude en Laboratoire de l'Adhérence Béton de Resurfaçage – Dalle de Chaussée, *Revue Canadienne de Génie Civil*, Vol. 19, 1992, pp. 1041-1048.

10.2 Articles dans des revues nationales avec comité de lecture (ordre chronologique inverse)

1. **M.-T. Do**, Z. Tang, M. Kane, F. de Larrard, Simulation Expérimentale et Modélisation du Polissage par le Trafic des Revêtements de Chaussée, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 267, pp. 31-48, 2007.
2. **M.-T. Do**, Modèle de Frottement pour Analyse du Freinage en Ligne Droite d'un Véhicule Léger, *Actes des Journées Internationales de Tribologie « Tribologie dans les Transports », JIFT 2005*, Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, pp. 129-138, 2006.
3. **M.-T. Do**, Relation entre la Microtexture et l'Adhérence, *Bulletin des Laboratoires -des Ponts et Chaussées*, n° 255, pp. 117-136, Avril-Mai-Juin 2005.
4. **M.-T. Do**, H. Zahouani, Frottement Pneumatique/Chaussée : Influence de la Microtexture des Surfaces de Chaussée, *Actes des Journées Internationales de*

Tribologie « Tribologie des Matériaux Organiques », JIFT 2001, Ed. SIRPE, pp. 49-61, 2002.

5. **M.-T. Do**, J. Lucas, Contact Pneumatique/Chaussée – Apport de la Microtexture du Revêtement, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 196, Mars-Avril 1995, pp 5-17.
6. **M.-T. Do**, I. Schaller, F. de Larrard, P.-C. Aïtcin, Fatigue des Bétons à Hautes Performances, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n° 536, Septembre 1995, pp. 1-27.

10.3 Communications aux congrès (ordre chronologique inverse)

1. **M.-T. Do**, Z. Tang, M. Kane, F. de Larrard, Laboratory Test Method for the Prediction of the Evolution of Road Skid-Resistance with Traffic, 6th Symposium on Pavement Surface Characteristics, Portoroz, Slovénie, 20-22 Octobre 2008.
2. D. Helbert, M. Khoudeir, **M.-T. Do**, Rough Surfaces and Relief Extraction by Generalized Lambertian's Photometric Model, IEEE International Conference on Signal Processing and Communication, Dubaï, Emirats Arabes, 24-27 Novembre 2007.
3. **M.-T. Do**, Z. Tang, M. Kane, F. de Larrard, Evolution of Road-Surface Skid Resistance and Texture due to Polishing, 11th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Huddersfield (Grande Bretagne), 17-20 Juillet 2007.
4. M. Kane, **M.-T. Do**, Z. Tang, Modélisation du Polissage des Revêtements de Chaussée Soumis au Trafic, Journées Francophones de Tribologie « Lubrification et Tribologie des Revêtements Minces », Poitiers (France), 22-23 Mai 2007.
5. C. Andrieux, P. Guillevic, P. Marsac, **M.-T. Do**, Modélisation de l'Etat Hydrique des Routes, Journées des Sciences de l'Ingénieur, Marne-la-Vallée (France), Décembre 2006.
6. M. Khoudeir, A. Benslimane, J. Brochard, **M.-T. Do**, Mesure et Caractérisation de la Microtexture des Revêtements de Chaussée par Analyse d'Images, Journées des Sciences de l'Ingénieur, Marne-la-Vallée (France), Décembre 2006.
7. M. Kane, **M.-T. Do**, Modélisation du Contact Pneumatique/Chaussée en Condition Mouillée par une Approche Viscoélastohydrodynamique, Journées des Sciences de l'Ingénieur, Marne-la-Vallée (France), Décembre 2006.
8. Z. Tang, M. Kane, **M.-T. Do**, F. de Larrard, Simulation Expérimentale du Polissage par le Trafic des Revêtements de Chaussée, Journées des Sciences de l'Ingénieur, Marne-la-Vallée (France), Décembre 2006.
9. P.-O. Vandanjon, **M.-T. Do**, Y. Delanne, A. Andrieux, P. Daburon, Comparison of Different Systems of Measurement of Skid Resistance, FISITA World Automotive Congress, Yokohama (Japon), Octobre 2006.
10. P.-O. Vandanjon, Y. Delanne, **M.-T. Do**, S. Deix, Drivers Warning: Locally Estimated Stopping Distance, World ITS Congress (Intelligent Transport Systems), Londres (Grande-Bretagne), Septembre 2006.
11. M. Kane, **M.-T. Do**, A Contribution of Elasto(Hydrodynamic) Theory to the Estimation of Tire/Road Friction in Wet Conditions, Leeds-Lyon Symposium, Leeds (Ecosse), Septembre 2006.
12. M. Kane, **M.-T. Do**, Apport de la Tribologie à la Prévention de l'Aquaplanage : Estimation des Paramètres du Contact Pneumatique – Chaussée en Conditions

- Dégradées, Journées Francophones de Tribologie « Tribologie et Couplage Multiphysiques », Lille (France), Mai 2006.
13. A. Benslimane, M. Khoudeir, J. Brochard, **M.-T. Do**, Characterization of Road Microtexture by Means of Image Analysis, 10th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, St Etienne (France), Juillet 2005.
 14. **M.-T. Do**, H. Zahouani, Influence of the Road-Surface Texture on the Speed Dependency of Tire/road Friction, 10th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, St Etienne (France), Juillet 2005.
 15. Y. Delanne, **M.-T. Do**, N.K. M'Sirdi, Tire Road Friction Estimation, EAEC Congress (European Automobile Engineers Cooperation), Belgrade, Mai 2005.
 16. **M.-T. Do**, Modèle de Frottement pour l'Analyse du Freinage en Ligne Droite d'un Véhicule Léger, Journées Francophones de Tribologie « La Tribologie dans les Transports », Tarbes (France), Mai 2005.
 17. **M.T. Do**, Y. Delanne, Prediction of tire/wet road friction coefficient and its variation with speed from road macro- and microtexture, and tire-related properties., SIIV, Florence (Italie), Octobre 2004.
 18. M. Khoudeir, A. Benslimane, J. Brochard, **M.-T. Do**, Détermination de la Cartographie de la Texture de Chaussée par Traitement d'Image, SURF, Toronto (Canada), 2004.
 19. M. Khoudeir, A. Benslimane, J. Brochard, **M.-T. Do**, Caractérisation de la Microtexture de Chaussées par Analyse d'Image, SURF, Toronto (Canada), Juin 2004.
 20. **M.T. Do**, P. Marsac, Y. Delanne, Prediction of tire / wet road friction from road surface microtexture and tire rubber properties, SURF, Toronto (Canada), Juin 2004.
 21. **M.T. Do**, P. Marsac, A. Mosset, Tribology approach to predict the variation of tire/wet road friction with slip speed, SURF, Toronto (Canada), Juin 2004.
 22. P. Legrand, J. Levy Vehel, **M.-T. Do**, Fractal properties and characterization of road profiles, FRACTAL04, Complexity and Fractals in Nature, 8th International Multidisciplinary Conference, April 4-7, Vancouver, Canada, 2004.
 23. M. Gothié, **M.-T. Do**, Méthode d'Evaluation du Polissage Superficiel des Routes (TROWS). 22ème Congrès Mondial de la Route, Durban (Afrique du Sud), Sept. 2003.
 24. **M.-T. Do**, J.-P. Kerzreho, J.-M. Balay, M. Gothié, Full-Scale Tests for the Assessment of Wear of Pavements Surfaces, 82ème Congrès du TRB, Washington D.C. (Etats-Unis), Janvier 2003.
 25. **M.-T. Do**, F. Hammoum, A Mechanical Model for the Prediction of the Tire/Road Friction. 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRA), Lisbon (Portugal), Juin 2002.
 26. J. Brochard, M. Khoudeir, V. Legeay, **M.-T. Do**, Photometric Model and Roughness Characterization for 3D Microtexture Analysis, Conference Machine Vision Applications in Industrial Inspection, SPIE, San Jose (Etats-Unis), Janv 2002.
 27. **M.-T. Do**, P. Marsac, Assessment of the Polishing of the Aggregate Microtexture by Means of geometric Parameters, 81ème congrès du TRB, Washington D.C. (Etats-Unis), Janv. 2002.

28. **M.-T. Do**, V. Lédée, D. Hardy, Tire/Road Friction – Assessment of the Polishing of Road Aggregates, 2nd World Tribology Congress, Vienne (Autriche), Septembre 2001.
29. **M.-T. Do**, H. Zahouani, Frottement Pneumatique/Chaussée: Influence de la Microtexture des Surfaces de Chaussée, Actes des Journées Internationales Francophones de Tribologie, Obernai (France), 2-4 Mai 2001, pp. 49-61.
30. C. Hun, J.-M. Caussignac, M. Bruynooghe, **M.-T. Do**, Application de la Technique du Speckle pour la Caractérisation de la Microtexture des Chaussées, Colloque Francophone sur des Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie, Biarritz (France), Novembre 2000.
31. H. Zahouani, R. Vargiolu, **M.-T. Do**, Characterization of Microtexture Related to Wet Road/Tire Friction, SURF, Nantes (France), Mai 2000.
32. **M.-T. Do**, I. Schaller, F. de Larrard, P.-C. Aïtcin, Fatigue of Plain and Reinforced High-Performance Concrete, International Symposium on the Utilization of High-Strength Concrete, Lillehammer (Norvège), Juin 1993.

10.4 Relecture d'articles, activité éditoriales

- Relecture des communications au congrès AIPCR sur des caractéristiques des surfaces de chaussée (SURF) à Toronto, Juin 2004.
- Relecture articles du Journal of Tribology.

10.5 Articles dans diverses revues technico-professionnelles

1. **M.-T. Do**, M. Kane, F. de Larrard, Z. Tang, Essai de polissage Wehner et Schulze, Revue Générale des Routes et Aéroports, Avril 2009.
2. C. Andrieux, P. Guillevis, P. Marsac, **M.-T. Do**, Modélisation de l'Etat Hydrique des Routes, Revue Générale des Routes et Aéroports, Novembre 2006.
3. **M.-T. Do**, J. Lucas, Contacto Neumatico/Pavimento – Aportacion de la Microtextura, Carreteras, n° 87, Janvier-Février 1997, pp. 18-35.

10.6 Autres communications (sans actes, sur invitation par exemple)

1. **M.-T. Do**, M. Kane, Evolution de l'Adhérence des Chaussées, Symposium Innovation Technologique et Systèmes de Transport, Paris (France), Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur, Octobre 2009.
2. **M.-T. Do**, M. Kane, Apport de la Tribologie à l'Etude du Contact Pneumatique – Chaussée, Journées Internationales d'Etudes « Vers des Ingénieries et des Technologies Communes aux Transports terrestres, maritimes, aériens et spatiaux (ITCT) », Paris (France), Ministère de la Recherche, Novembre 2006.

10.7 Livres

1. Y. Delanne, **M.-T. Do**, M. Gothié, G. Delalande, Potentiel d'Adhérence du Couple Pneumatique/Chaussée, Collection ERLPC (Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées), CR 43, Novembre 2006.
2. **M.-T. Do**, Contribution des Echelles de Texture Routière à l'Adhérence des Chaussées, Collection ERLPC (Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées), CR 35, Décembre 2004.

10.8 Rapports de recherche

1. P. Roe, **M.-T. Do**, E. Vos, Roadmaps and implementation plan for harmonised skid resistance measurement methods, Livrable D09, Projet européen 7ème PCRD TYROSAFE (Tyre and Road Surface Optimisation for Skid Resistance and Further Effects), Décembre 2009.
2. **M.-T. Do**, Projet PREDIT SARI/IRCAD – Rapport final, Juin 2009.
3. **M.-T. Do**, Mise en place et suivi des systèmes d'information – Equipements mise en œuvre sur les sites expérimentaux, Livrable 3.3.2, Projet PREDIT SARI/IRCAD, Juin 2009.
4. M. Aron, R. Bergel, P. Anelli, E. Violette, D. Doucet, P. Subirats, G. Louah, **M.-T. Do**, Etude d'enjeux, évaluation économique et perspectives de déploiement d'un système d'alerte en conditions atmosphériques dégradées, Livrable 4.2, Projet PREDIT SARI/IRCAD, Juin 2009.
5. O. Orfila, **M.-T. Do**, Méthode de calcul du facteur de risque de perte d'adhérence, à partir de simulation, Livrable 2B.4, Projet ANR DIVAS, Mai 2009.
6. P. Roe, **M.-T. Do**, J. Groenendijk, E. Vos, The Use of Reference Surfaces for Calibration and Harmonisation of Skid Resistance Measurements, Livrable D07, Projet européen 7ème PCRD TYROSAFE (Tyre and Road Surface Optimisation for Skid Resistance and Further Effects), Mars 2009.
7. J. Groenendijk, E. Vos, P. Roe, **M.-T. Do**, Analysis and Findings of Previous skid Resistance Harmonisation Research Projects, Livrable D05, Projet européen 7ème PCRD TYROSAFE (Tyre and Road Surface Optimisation for Skid Resistance and Further Effects), Mars 2009.
8. **M.-T. Do**, P. Roe, State of the Art of Skid-Resistance Test Methods, Livrable D04, Projet européen 7ème PCRD TYROSAFE (Tyre and Road Surface Optimisation for Skid Resistance and Further Effects), Décembre 2008.
9. P. Guillevic, C. Andrieux, D. Delaunay, P. Marsac, **M.-T. Do**, État hydrique des chaussées – Modélisation des hauteurs d'eau, Livrable 1.2, Projet PREDIT SARI/IRCAD, Mars 2007.
10. P. Guillevic, C. Andrieux, D. Delaunay, P. Marsac, **M.-T. Do**, État hydrique des chaussées – Mise en place d'une base de données en hydrométéorologie routière, Livrable 2.2, Projet PREDIT SARI/IRCAD, Janvier 2007.
11. **M.-T. Do**, P.-O. Vandanjon, Y. Delanne, S. Deix, M. Hjort, Model for Estimating Expectable Braking Distance, Livrable 2.1, Projet européen 6ème PCRD INTRO (Intelligent Roads), Juillet 2006.
12. **M.-T. Do**, Projet SARI/IRCAD - Rapport de synthèse de la tranche 1, Mai 2006.
13. P. Anelli, K. Kerdudo, M. Gothié, E. Violette, M. Aron, P. Vigouroux, **M.-T. Do**, Projet SARI/IRCAD - Choix des Itinéraires et Chiffrage des Expérimentations (livrable 3.31), Mai 2006.
14. S. Huschek, M. Böck, M. Gothié, **M.-T. Do**, P. Marsac, S. Wasner, Straßengriffigkeit im Rahmen der Deutsch-Französischen Zusammenarbeit auf dem Gebiet des Straßenwesens – Aktion 2, Rapport final, Projet de coopération franco-allemande sur l'adhérence des chaussées, Avril 2006.
15. **M.-T. Do**, P. Anelli, M. Gothié, G. Schaefer, Livrable 1.1 : Revue de Littérature, Projet PREDIT SARI/IRCAD « Informer des Risques de Rupture de l'Itinéraire en Conditions Atmosphériques Dégradées », Novembre 2005.
16. G. Descornet, B. Schmidt, M. Boulet, M. Gothié, **M.-T. Do**, J. Fafié, M. Van den Bol, M. Alonso, P. Roe, R. Forest, H. Viner, HERMES Project (Harmonization of

- European Routine and research Measuring Equipment for Skid Resistance) – Final Report, 2004.
17. **M.-T. Do**, P. Marsac, P. Maisonneuve, Etude d'Adhérence des Joints d'Ouvrages – 2ème étude, Contrat SETRA, Nov. 2003.
 18. **M.-T. Do**, P. Marsac, P. Maisonneuve, Etude d'Adhérence des Joints d'Ouvrages – 1ère étude, Contrat SETRA, Juil. 2002.
 19. **M.-T. Do**, P. Marsac, A. Mosset, Investigation of a Suitable Model for the Calculation of SRI, Rapport d'étude, Projet européen HERMES (Harmonization of European Routine and research Measuring Equipment for Skid Resistance), Novembre 2003.
 20. **M.-T. Do**, Contribution des échelles de texture routière à l'adhérence des chaussées, Rapport final du thème CH12, Décembre 2004.
 21. **M.-T. Do**, J.-P. Kerzreho, J.-M. Balay, Y. Brosseaud, M. Gothié, Expériences Manège avec Pneus de Camions, Rapport d'étude, Projet européen 5ème PCRD TROWS (Tire and Road Wear and Slip Assessment), Octobre 2002.
 22. **M.-T. Do**, Analyse de la Microtexture des Surfaces Abrasives Utilisées en Laboratoire pour l'Etude de l'Usure des Gommages, Rapport d'étude, Projet européen 5ème PCRD TROWS (Tire and Road Wear and Slip Assessment), Mars 2002.
 23. **M.-T. Do**, Etude d'Adhérence d'une Chaussée Traitée par un Produit Absorbant, Contrat Direction des Routes, 1999.
 24. **M.-T. Do**, C. Lupien, P.-C. Aïtcin, G. Chanvillard, Chapes Minces avec Béton Fibre : Etude de l'Adhésion des Dalles et de la Corrosion des Fibres, Rapport de recherche présenté dans le cadre de l'action concertée sur l'entretien et la réhabilitation du réseau routier au Québec, Février 1991.

10.9 Documents réglementaires

1. Circulaire DR 2002-39 sur l'adhérence des chaussées
2. Méthode d'essais n° 50 sur l'évaluation de l'adhérence des chaussées routières et aéronautiques.

11 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Neville, A.M., Properties of Concrete, 3rd edition, Ed. Longman Scientific & Technical, 1991, pp. 338-344.
- [2] Jaccoud, J.-P., Favre, R., Flèche des Structures en Béton Armé – Vérification Expérimentale d'une Méthode de Calcul, Annales ITBTP, n° 406, juillet-août 1982, pp. 23-56.
- [3] Shah, S.P., Prediction of Cumulative Damage for Concrete and Reinforced Concrete, Matériaux et Construction, vol. 17, n° 97, pp. 65-68.
- [4] Oh, B.H., Cumulative Damage Theory of Concrete under Variable Amplitude Fatigue Loadings, ACI Materials Journal, janvier/février 1991, pp. 41-48.
- [5] Committee on Fatigue and Fracture Reliability (CFFR), Fatigue Reliability: Introduction, Journal of the Structural Division, vol. 108, n° ST1, janvier 1982, pp. 3-23.
- [6] CFFR, Fatigue Reliability: Development of Criteria for Design, Journal of the Structural Division, vol. 108, n° ST1, janvier 1982, pp. 71-88.
- [7] Hsu, T.T.C., Fatigue of Plain Concrete, ACI Journal, juillet-août 1981, pp. 292-305.
- [8] Foucard, J., Rôle du Pneumatique dans le Phénomène d'Adhérence, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 255, 2005, pp. 11-22.
- [9] Leu, M.C., Henry, J.J., Prediction of Skid Resistance as a Function of Speed from Pavement Texture Measurements, Transportation Research Record, n° 666, 1978, pp. 7-13.

- [10] ISO 13473-1, Characterization of Pavement Texture by Use of Surface Profiles – Part 1: Determination of Mean Profile Depth, 1997.
- [11] Horne, W.B., Buhlmann, F., A Method for Rating the Skid Resistance and Micro/Macrotexture Characteristics of Wet Pavements, Frictional Interaction of Tire and Pavement, ASTM STP 793, W.E. Meyer & J.D. Walter Eds., 1983, pp. 191-218.
- [12] Mancosu F., Parry A., La Torre F., « Friction Variation Due to Speed and Water Depth », 4ème Symposium International sur les Caractéristiques de Surface SURF, Nantes, France, 2000.
- [13] Tourenq C., Fourmaintraux D., Propriétés des Granulats et Glissement Routière, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 51, 1971, pp. 61-69.
- [14] Rohde, S.M., On the Effect of Pavement Microtexture on Thin Film Traction, International Journal of Mechanics Science, vol. 18, 1976, pp. 95-101.
- [15] Golden, J.M., A Theory of Wet Road-Tyre Friction, Wear, n° 71, 1981, pp. 307-331.
- [16] Forster, S.W., Aggregate Microtexture: Profile Measurement and Related Frictional Levels, Report FHWA/RD-81/107, FHWA, 1981.
- [17] NF E 05-015, Etat de Surface des Produits – Partie 1: Généralités, Terminologie, Définitions, AFNOR, 1984.
- [18] Fahl, C.F., Motif Combination – A New Approach to Surface Profile Analysis, Wear, vol. 83, 1982, pp. 165-179.
- [19] Ech, M., Yotte, S., Breyse, D., Pouteau, B., Analyse Expérimentale de la Contribution des Liants Polymères à la Pérennité des Caractéristiques des Enrobés Bitumineux de Surface, Revue Européenne de Génie Civil, vol. n° 5, 2007, pp. 643-662.
- [20] 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 Society, Vol. 71, 1958, pp. 979-988.
- [21] Rochoux, D., Adhérence et Frottement d'Indentation, Rapport interne Michelin, Convention LCPC/Michelin, 1998.
- [22] Bellanger J., Delalande G., Dupont P., Ganga Y., Planches Expérimentales « Granulats – Adhérence » : Suivi à Trois Ans, Revue Générale des Routes et Aéroports 739, 1996, pp. 42-46.
- [23] Henry J.J., Meyer W.E., Prediction of Aggregate and Pavement Polishing, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 29, 1984, pp. 365-368.
- [24] NF EN 1097-8, Essais sur les Propriétés Mécaniques et Physiques des Granulats – Partie 8 : Détermination du Coefficient de Polissage Accélééré, 2000.
- [25] Delalande, G., Résistance des Granulats au Polissage – Méthode d'Essai par Projection, BLPC, n° 177, 1992, pp. 73-80.
- [26] 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.
- [27] Wilson D., Dunn G., Polishing Aggregates to Equilibrium Skid Resistance, Proceedings of the Conference "Surface Friction", 1-4 May 2005, Christchurch, New-Zealand.
- [28] Himeno K., Nakamura Y., Kawamura A., Saito K., Skid Resistance of Asphalt Pavement Surface Related to their Microtexture, Proceedings of the 4th International Symposium on Pavement Surface Characteristics, 22-24 May 2000, Nantes, France, pp. 205-215.
- [29] Neale, M.J., Gee, M., Wear problems and testing for industry, 2000.
- [30] Huschek S., Experience with Skid Resistance Prediction Based on Traffic Simulation, Proceedings of the 5th International Symposium on Pavement Surface Characteristics, 6-10 June 2004, Toronto, Canada.
- [31] Delanne, Y., Goyat, Y., Adhérence et sécurité routière, Revue Générale des Routes et Aéroports, n° 842, 2005, pp. 1-10.
- [32] Gothié, M., Les Mesures de l'Adhérence des Chaussées en France et leur Interprétation, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 255, 2005, pp. 53-69.
- [33] 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.
- [34] Roe P.G., Hartshorne S.A., The Polished Stone Value of Aggregates and In-Service Skidding Resistance, TRL Report 322, 1998.
- [35] 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, n° 127, Septembre- Octobre 1983, pp. 37-52.

- [36] ISO 5725 : Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure.
- [37] Jacobs, M.M.J., Gerritsen, W., Wennink, M.P., van Gorkum, F., Optimisation of Skid Resistance Characteristics with Respect to Surface Materials and Road Function, Proceedings of the 3rd International Symposium on Pavement Surface Characteristics, 3-4 Septembre 1996, Christchurch, Nouvelle-Zélande, 1996, pp. 283-298.
- [38] Violette E., Projet APTP – Sujet 1 : Comportement des Usagers – Synthèse des Etudes Effectuées, Rapport, CETE Normandie-Centre, Division Exploitation Sécurité Gestion des Infrastructures, 23 pages + annexes, 2002.
- [39] Jeufroy G., Influence de certaines caractéristiques de la surface des chaussées sur la sécurité des véhicules, Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers des Ponts et Chaussées, Spécial F, 1969, pp. 29-45.
- [40] Veith A. G., Tires – roads – rainfall – vehicles: the traction connection, Frictional interaction of tire and pavement, ASTM STP 793, W.E. Meyer and J. D. Walter Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1983, pp. 3-40.
- [41] Gallaway, B.M., Schiller, R.E., Rose, J.G., The Effects of Rainfall Intensity, Pavement Cross Slope, Surface Texture, and Drainage Length on Pavement Water Depths, Research report n° 138-5, Research study n° 2-8-69-138, Texas Transportation Institute, College Station, Texas, 1971.
- [42] Greenwood, J.A., Tabor, D., The Friction of Hard Sliders on Lubricated Rubber: The Importance of Deformation Losses, Proceedings of the Physical Society, vol. 71, 1958, pp. 989-1001.
- [43] Greenwood, J.A., Minshall, H., Tabor, D., Hysteresis Losses in Rolling and Sliding Friction, Proceedings of the Royal Society of London, A, January 24, 1961, pp. 480-507.
- [44] Moore, D.F., A Theory of Viscous Hydroplaning, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 9, 1967, pp. 797-810.
- [45] Moore, D.F., The Friction of Pneumatic Tyres, Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.
- [46] Barquins, M., Adhérence et Frottement des Matériaux Caoutchouteux, BLPC, n° 185, mai-juin 1993, pp. 75-91.

12 ACRONYMES

Les acronymes suivants ont été utilisés dans le texte :

ANR : Agence Nationale pour la Recherche

BBTM : Béton Bitumineux Très Mince

BHP : Béton à Hautes Performances

CEB : Code Européen du Béton

CFL : Coefficient de Frottement Longitudinal

CFT : Coefficient de Frottement Transversal

COST : European Cooperation in Science and Technology

DIVAS : Dialogue Infrastructure/Véhicule pour Améliorer la Sécurité

DRAST : Direction de la Recherche et de l'Animation Scientifique et Technique

DRI : Direction de la Recherche et de l'Innovation

FEHRL : Forum of European Highway Research Laboratory (Forum des laboratoires européens de recherche routière)

GN: Grip Number

HERMES : Harmonization of European Routine and Research Measurement Equipments for Skid Resistance of Roads and Runways

INTRO : Intelligent Road

IRCAD : Informer des Risques liés aux Conditions Atmosphériques Dégradées

PCRD : Programme-Cadre de Recherche et de Développement.

PMP : Profondeur Moyenne des Profils

PREDIT : Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports terrestres

PSV : Polished Stone Value

SETRA : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

SKIDSAFE : Enhanced Driver Safety due to Improved Skid Resistance

TRL : Transport Research Laboratory

TROWS : Tire and Road Wear and Slip Assessment

TYROSAFE : Tyre and Road Surface Optimisation for Skid Resistance and Further Effects