



HAL
open science

Influence des films d'eau très minces sur le frottement pneu/chaussée

Yannick Beautru

► **To cite this version:**

Yannick Beautru. Influence des films d'eau très minces sur le frottement pneu/chaussée. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2012. Français. NNT: . tel-00851330

HAL Id: tel-00851330

<https://theses.hal.science/tel-00851330>

Submitted on 13 Aug 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.

ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

ÉCOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGENIEUR GÉOSCIENCE ARCHITECTURE

Année 2012

N° B.U. : _____

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Mécanique

Présentée et soutenue publiquement par

Yannick BEAUTRU

Le 25 octobre 2012

*à l'Institut français des sciences et technologies des transports
de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar), Nantes*

**Influence des films d'eau très minces
sur le frottement pneu/chaussée**

Jury

Président : M. FRANCK PLESTAN, Professeur, Ecole Centrale de Nantes
Rapporteurs : M. JEAN DENAPE, Professeur, École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
M. HASSAN ZAHOUANI, Professeur, École Nationale d'Ingénieurs de St-Étienne
Examineurs : M. CHRISTIAN CHABANON, Docteur, Renault S.A.
M. MINH-TAN DO, IDTPE, HDR, Ifsttar
Invités : M^{me} VÉRONIQUE CEREZO, IDTPE, CETE Lyon
M. MALAL KANE, Chargé de Recherche, Ifsttar

Directeur de thèse : M. M.-T. DO Encadrant : M^{me} V. CEREZO Encadrant : M. M. KANE
Laboratoire : Ifsttar, Nantes Laboratoire : CETE, Lyon Laboratoire : Ifsttar, Nantes

N° E.D. : 498-236

À ma mère.

Remerciements

Je tiens à remercier Minh-Tan Do, Véronique Cerezo et Malal Kane pour leur encadrement au cours de ces trois années qui aura permis l'aboutissement de ce long travail. Je tiens plus particulièrement à remercier Véronique Cerezo pour sa disponibilité, son soutien et son amitié qui m'ont permis de franchir les périodes les plus délicates de ce travail.

Je remercie Jean Denape et Hassan Zahouani qui ont accepté de rapporter ce mémoire de thèse. En particulier, je tiens les à remercier pour les remarques pertinentes et détaillées qui ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire. Je remercie également Frank Plestan et Christian Chabanon qui m'ont fait l'honneur de participer au jury de ma thèse. Je tiens également à remercier Christian Chabanon et Jean-Michel Piau pour leur participation à mes comités de suivi. Leurs remarques tout au long de la thèse ont permis d'orienter mes recherches dans le bon sens.

Je remercie le projet SKIDSAFE qui a permis le financement de ma thèse.

Je remercie également tous les membres de EASE pour leur accueil chaleureux, en particulier l'équipe Adhérence avec qui j'ai passé 3 ans et demi bien agréables. Merci pour leur soutien dans les moments délicats. En particulier, un grand merci à Odile Dudouet de prendre soin avec autant de gentillesse de tous les doctorants de l'équipe. Enfin, un merci également à Jean-François Le Fur et Patrick Maisonneuve pour la réalisation de mes essais en laboratoire ainsi qu'à l'équipe de Véronique Cerezo au CETE de Lyon pour les essais sur piste et leur accueil lors de mes visites.

Je pense également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'avancement de mon travail en me conseillant à la fois scientifiquement mais également de manière plus générale. Merci donc à tous ceux qui ont pris le temps de m'aider et me conseiller. Une pensée particulière pour Agnès Jullien, Samuel Louis, Patrick Daburon, Vincent Gary, Samuel Doyen, Jean-Sébastien Pagnie, Guillaume Dubois, Amandine Fargier et Arnaud Can qui m'ont tous rendu le travail plus agréable à un moment donné.

Enfin, je n'aurais certainement pas pu réaliser ce mémoire et tout le travail qui va de pair sans Delphine Prevost. Merci pour ta patience, ta disponibilité, ta franchise, ta clairvoyance et ton amitié au quotidien.

Table des matières

Introduction générale	1
1 Étude bibliographique	5
1.1 Généralités	6
1.2 Principaux travaux sur l'influence de la microtexture et de la hauteur d'eau sur l'adhérence	25
1.3 Objectifs et démarche	34
2 Programme expérimental	37
2.1 Échantillons	38
2.2 Appareils et protocoles de mesure	47
3 Observations	53
3.1 Variation du frottement en fonction de la hauteur d'eau	54
3.2 Représentativité des résultats	59
3.3 Régimes de lubrification	60
4 Analyse des courbes frottement-hauteur d'eau	63
4.1 Caractérisation mathématique de la courbe frottement/hauteur d'eau . . .	65
4.2 Définition de la hauteur d'eau critique	69
4.3 Analyse de l'influence des conditions de contact	72
5 Modélisation physique	87
5.1 Introduction	88
5.2 Modélisation de la relation frottement/hauteur d'eau	88
5.3 Calcul de la hauteur d'eau au sommet des granulats	100
Conclusions	111
A Chiffres des accidents corporels en France métropolitaine en 2011	A.1
B Piste d'essai de l'Ifsttar	B.1
C Résultats des mesures DFT	C.1
C.1 Échantillon S420	C.1
C.2 Échantillon S590	C.16
C.3 Échantillon G800	C.31

Bibliographie

Bib.1

Introduction générale

Le transport routier est le principal moyen de locomotion dans la majorité des pays développés. Néanmoins, il s'agit du moyen de transport le plus meurtrier. L'Organisation mondiale de la santé prévoit que, d'ici 2030, les accidents de la route deviendront la cinquième cause de décès dans le monde. C'est pourquoi les gouvernements tentent d'enrayer le phénomène. Pour cela, l'Union européenne mise à la fois sur la prévention, la répression mais également la recherche. Ainsi, de nombreux projets de recherche sont actuellement financés par Bruxelles afin de mieux comprendre les mécanismes d'accidents et ainsi les éviter. En particulier, cette thèse est financée dans le cadre du projet SKIDSAFE visant à renforcer la sécurité des conducteurs en améliorant l'adhérence des chaussées, notamment en présence d'eau sur celles-ci.

Bien que les statistiques de la sécurité routière ne permettent pas de quantifier précisément la part d'accidents causés par une perte d'adhérence sur chaussée mouillée, les études s'accordent sur le fait que la pluie est un facteur accidentogène. Ainsi, il ressort que par temps de pluie, le risque d'accident est, de manière générale, multiplié par deux. Les conducteurs adaptent certes leur comportement aux circonstances, mais pas suffisamment pour compenser l'augmentation du risque (SWOV, 2009).

Cependant, les rapports d'accidents ne prennent pas en compte de manière précise les conditions climatiques et l'état de mouillage de la chaussée comme le montre par exemple un récent document de travail de l'Observatoire national interministériel de la sécurité routière (ONISR) sur les accidents corporels de la circulation présenté en annexe A (ONISR, 2012). Ce rapport signale qu'en 2011, 6134 accidents corporels (soit un peu moins de 10% du total) ont eu lieu en conditions de *pluie légère*, ce qui en fait l'intempérie la plus accidentogène, contre 1211 en conditions de *pluie forte*. De plus, 9597 accidents corporels (soit près de 15% du total) ont eu lieu sur route *mouillée*, 49 à cause de la présence de *flaques* et seulement 22 sur route *inondée*. L'état *mouillé* est donc la dégradation de l'état de surface le plus accidentogène. Ces chiffres tendent à prouver qu'une part importante des accidents corporels a lieu en présence de faibles quantités d'eau sur la chaussée, c'est-à-dire insuffisantes pour être à l'origine d'un phénomène d'aquaplanage.

Finalement, les facteurs menant à l'accident routier sont multiples et il est toujours difficile d'en incriminer un seul. Néanmoins, la diminution du nombre de facteurs potentiels est la clé vers une réduction notable et durable du nombre de victimes d'accidents de la route chaque année. Cette thèse a pour objectif de comprendre les phénomènes entraînant une perte d'adhérence néfaste sur une faible couche d'eau et ainsi d'aider les gestionnaires à éliminer ce facteur précis.

L'étude présentée ici porte uniquement sur les faibles hauteurs d'eau (inférieures à 1 mm). Les phénomènes mis en jeu sont très différents de ceux qui conduisent à l'aqua-

planage. Cette perte d'adhérence sur une épaisse couche d'eau a déjà été très largement étudiée dans la littérature. Par opposition à l'aquaplanage, la perte de contrôle sur une faible épaisseur d'eau est appelée viscoplanage. Ce sujet a été bien moins étudié. Ceci s'explique probablement par l'absence de mesure précise de la hauteur d'eau présente sur le lieu d'un accident. Ainsi, si une chaussée est mouillée, la perte d'adhérence a été pendant longtemps imputée à de l'aquaplanage. Néanmoins, les moyens de mesure devenant plus précis, plus transportables, ils se généralisent. Les données récoltées sur les sites d'accidents ont montré que les hauteurs d'eau sont souvent trop faibles pour avoir provoqué de l'aquaplanage.

Une étude allemande [JTR] a récemment confirmé cette hypothèse. Parallèlement, des mesures en laboratoire ont montré une chute notable de l'adhérence dès l'ajout d'une infime quantité d'eau (Delanne et Lechner, 2002). Finalement, la part d'accidents due au viscoplanage est élevée à cause d'un manque de considération comportementale du conducteur. En effet, en présence d'une grande quantité d'eau, et plus fortement pendant un épisode pluvieux, le conducteur est conscient du danger et modifie son comportement de conduite en conséquence.

De plus, la perte de visibilité due aux précipitations et aux projections ajoute à la nécessité de réduire la vitesse pratiquée (Delanne et Lechner, 2002). Au contraire, après un épisode pluvieux, le conducteur n'est pas conscient de la perte d'adhérence de son véhicule et n'adapte pas correctement son comportement. Le véhicule se retrouve ainsi en limite d'adhérence et la moindre perturbation peut conduire à l'accident, en cas de freinage par exemple.

Le **chapitre 1** définit les notions physiques liées au phénomène d'adhérence. Ce chapitre présente également les différents appareils de caractérisation de la chaussée et de mesure de l'adhérence. Ensuite, les principaux travaux s'intéressant à l'influence de la hauteur d'eau et de la microtexture sur l'adhérence sont présentés. Enfin, les objectifs de la thèse ainsi que la méthodologie employée concluent ce chapitre.

Le **chapitre 2** traite de l'aspect expérimental du travail effectué. Tout d'abord, la fabrication des surfaces testées est décrite. Ensuite, les protocoles de mesure de la texture et du frottement sont détaillés. Finalement, les protocoles mis au point permettant la mesure du frottement en présence d'un film d'eau très mince sont expliqués.

Le **chapitre 3** aborde l'ensemble des résultats obtenus au cours des essais. La description des courbes frottement-hauteur d'eau y est effectuée ainsi que l'analogie avec les régimes de lubrification. Ce chapitre permet de relier les résultats des essais aux travaux de la littérature afin de déterminer les outils à utiliser pour les analyser.

Le **chapitre 4** est dédié à l'analyse des résultats. Des indicateurs liés à la hauteur d'eau et au frottement d'une part et à la microtexture d'autre part sont définis à l'aide de caractérisations mathématiques. Ensuite, l'étude des variations de ces indicateurs permet de quantifier les influences relatives des paramètres de contact sur le frottement sur une surface faiblement lubrifiée.

Le **chapitre 5** est consacré à la modélisation de la relation entre le frottement et la hauteur d'eau. Un modèle prenant en compte entre autres la dissimulation de la texture par l'eau est développé.

Le **chapitre 6** récapitule l'ensemble des résultats obtenus. Il montre les applications possibles des travaux effectués et propose des perspectives de recherches.

Chapitre 1

Étude bibliographique

Plan du chapitre

1.1	Généralités	6
1.1.1	Définition de l'adhérence	6
1.1.1.1	Composantes longitudinale et transversale de l'adhérence	6
1.1.1.2	Mécanismes physiques à l'origine de la génération d'adhérence	7
1.1.1.3	Adhérence sur chaussée mouillée	8
1.1.2	Évaluation du niveau de mouillage des chaussées	9
1.1.3	Texture de chaussée	11
1.1.3.1	Origine de la texture des chaussées	11
1.1.3.2	Macrotecture	13
1.1.3.3	Microtexture	18
1.2	Principaux travaux sur l'influence de la microtexture et de la hauteur d'eau sur l'adhérence	25
1.2.1	Effet de la hauteur d'eau	26
1.2.1.1	Étude de Veith	26
1.2.1.2	Modèle hauteur d'eau/adhérence de Kulakowski	26
1.2.2	Effet de la microtexture	28
1.2.2.1	Géométrie de la microtexture/Adhérence	28
1.2.2.2	Microtexture/Épaisseur d'eau minimale	30
1.2.3	Viscoplanage	31
1.3	Objectifs et démarche	34
1.3.1	Objectifs de la thèse	34
1.3.2	Méthodologie	34

1.1 Généralités

1.1.1 Définition de l'adhérence

L'adhérence désigne la capacité à mobiliser les forces de frottement développées à l'interface entre le pneumatique et la chaussée sous l'effet de sollicitations variées engendrées par la conduite. Ces forces permettent au véhicule de conserver la trajectoire désirée lors d'une manœuvre de conduite. De ce fait, l'adhérence contribue de manière importante à la sécurité des usagers sur la route.

1.1.1.1 Composantes longitudinale et transversale de l'adhérence

L'adhérence est généralement appréhendée suivant deux composantes : transversale et longitudinale.

La composante longitudinale (CFL^{1.}) est celle parallèle à la direction de déplacement du véhicule. Elle se manifeste en situation d'accélération ou de freinage en ligne droite. La composante de la force de frottement suivant la direction de déplacement du véhicule F_x se crée car la vitesse de roulement du pneu est différente de la vitesse du véhicule par rapport au sol. Le CFL est défini par la formule suivante :

$$\text{CFL} = \frac{F_x}{F_z} \quad (1.1)$$

où F_z est la charge verticale appliquée par le pneu sur la surface de chaussée.

Le CFL varie donc selon le freinage ou l'accélération appliquée car le pneu glisse plus ou moins sur la chaussée. Le taux de glissement s est défini de la manière suivante :

$$s = \frac{V - \omega r}{V} \quad (1.2)$$

avec :

- ω la vitesse angulaire de la roue ;
- r le rayon effectif de la roue qui varie selon la charge appliquée au pneumatique ;
- V la vitesse linéaire du véhicule.

Ainsi, lors du freinage, le taux de glissement peut varier entre 0 et 1. Lorsqu'il est égal à 1, il s'agit d'un freinage en roue bloquée (la vitesse de rotation de la roue est nulle). La figure 1.1 montre l'évolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement. La courbe passe par un maximum dans une plage allant de 10 à 25 % de glissement. Cette valeur dépend du type de revêtement et de la présence de contaminant sur la chaussée (par exemple, la courbe ne présente pas de maximum en présence de glace sur la chaussée).

1. coefficient de frottement longitudinal

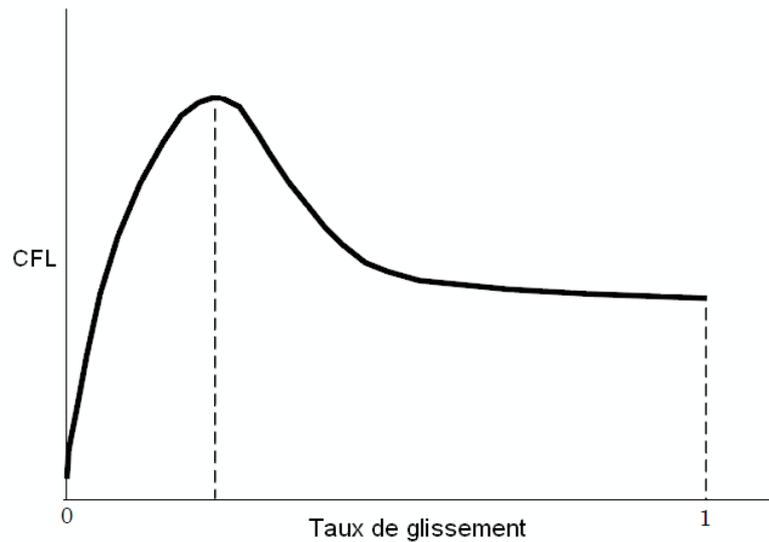


Figure 1.1 — *Évolution typique du CFL en fonction du taux de glissement.*

La composante transversale de l'adhérence (CFT².) est celle perpendiculaire à la direction de déplacement du véhicule. Elle s'oppose à la force centrifuge lorsqu'un véhicule est dans un virage ou dérape. Cette force de frottement naît de la dérive entre la trajectoire et le plan de rotation des roues. Le frottement transversal augmente avec la dérive jusqu'à une valeur maximale, que l'on atteint entre 4° et 7° de dérive pour une voiture en fonction de l'architecture du pneumatique, de la nature de la gomme et du sol, et de la pression de gonflage (Michelin, 2002).

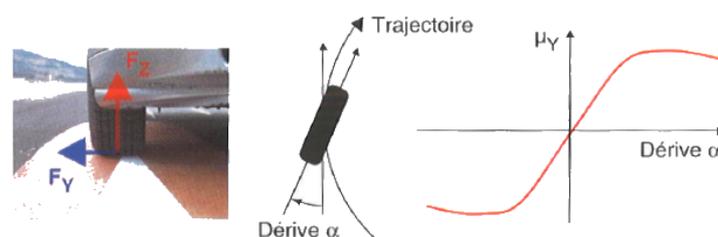


Figure 1.2 — *Composante transversale de l'adhérence. (Foucard, 2005)*

Les études effectuées dans le cadre de cette thèse concernent uniquement l'adhérence longitudinale. Ainsi, dans la suite du document, on désignera le CFL par coefficient de frottement ou μ .

1.1.1.2 Mécanismes physiques à l'origine de la génération d'adhérence

Deux mécanismes sont à l'origine de la génération des forces de frottement : la déformation de la gomme du pneu sur les aspérités – nommé hystérésis – et les interactions moléculaires entre les surfaces de la chaussée et du pneu – nommé adhésion.

2. coefficient de frottement ltransversal

L'hystérésis

La gomme est un matériau visco-élastique ; après une déformation elle ne retrouve pas sa forme d'origine instantanément mais avec un temps de retard. Cette propriété crée une dissymétrie de la déformation de la gomme du pneu sur les aspérités de chaussée, donnant naissance à une résultante de force opposée au glissement, comme le montre la figure 1.3a. La part du frottement liée à ce mécanisme est appelée frottement d'**hystérésis**. Il s'agit de la part la plus importante du frottement sur chaussée mouillée (voir section 1.1.1.3 suivante).

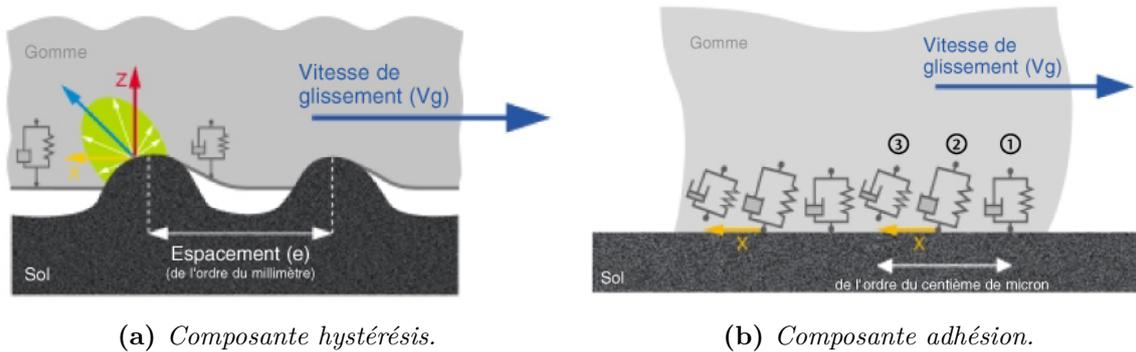


Figure 1.3 — Mécanismes physiques à l'origine de la génération d'adhérence. (Michelin, 2002)

L'adhésion

D'autre part, le frottement d'**adhésion** résulte des interactions moléculaires existant entre le pneu et la chaussée. Il nécessite un contact direct entre la gomme et la surface de chaussée. Les liaisons moléculaires (forces de Van der Waals) se forment, s'étirent puis se cassent au fur et à mesure du glissement de la gomme sur la surface (figure 1.3b). Ces sollicitations dissipent de l'énergie par frottement des chaînes moléculaires entre elles. Ce phénomène ne peut plus se produire si la présence d'un polluant empêche le contact direct entre la gomme et la surface de chaussée ce qui explique la chute d'adhérence sur chaussée mouillée.

1.1.1.3 Adhérence sur chaussée mouillée

Par son effet lubrifiant, la présence éventuelle d'eau, même en très faibles quantités, à la surface des chaussées altère fortement l'adhérence (Veith, 1983; Kulakowski et Harwood, 1990). Cette situation se produit en cas de bruine ou après un épisode pluvieux. C'est même dans ces conditions de faibles épaisseurs d'eau que le risque d'accidents devient plus élevé. En effet, la visibilité n'étant pas réduite par la pluie, la réduction de la vitesse appliquée par le conducteur sur ces routes peu mouillées est souvent insuffisante vis-à-vis de la perte d'adhérence constatée par rapport au niveau d'adhérence sur chaussée sèche (Delanne *et al.*, 2006).

Mécanismes physiques de perturbation de l'adhérence sur chaussée mouillée

La présence d'eau perturbe les mécanismes présentés précédemment. Le frottement d'adhésion ne peut se produire si un film d'eau sépare la gomme de la surface de la chaussée. Le frottement d'hystérésis est perturbé si la quantité d'eau présente couvre les rugosités du revêtement routier. Par conséquent, pour maintenir le niveau d'adhérence, il est nécessaire d'évacuer l'eau pour restaurer un contact sec entre le pneumatique et la chaussée. La route y contribue par sa pente, son dévers, sa texture et sa structure (enrobés drainants, par exemple). Le pneumatique y contribue par la forme de l'aire de contact et la forme de ses sculptures qui, respectivement, repoussent vers l'avant et drainent sur les côtés du pneumatique le bourrelet d'eau pouvant se former devant la roue.

Dans l'aire de contact d'un pneumatique sur une chaussée mouillée, on peut distinguer trois mécanismes qui apparaissent progressivement de l'avant à l'arrière (figure 1.4) :

- à l'entrée du contact, un bourrelet d'eau se forme et l'eau est progressivement évacuée par les sculptures du pneumatique et les aspérités de la chaussée. La hauteur d'eau est supérieure à 0,5 mm et des phénomènes hydrodynamiques se produisent. Dans cette zone appelée *zone de pénétration*, l'adhérence est quasi-nulle. C'est généralement dans cette zone que prend naissance l'hydroplanage. L'hydroplanage, communément appelé aquaplaning, est une perte d'adhérence due à une quantité d'eau importante sur la chaussée ainsi qu'une vitesse élevée du véhicule circulant sur la chaussée. Sous l'effet de la vitesse de déplacement, le pneumatique génère une mise en pression importante de l'eau dans le bourrelet présent dans la zone de pénétration. Lorsque cette pression devient supérieure à la pression moyenne d'appui du pneumatique sur la chaussée (de l'ordre de 2 bars pour une voiture), le pneu ne peut plus repousser l'eau et il se retrouve soulevé (Michelin, 2002).
- à l'arrière de la zone de pénétration se trouve une *zone de transition*. Une partie de l'eau ayant été évacuée à l'avant du contact, le pneumatique entre progressivement en contact avec certaines aspérités du revêtement de la chaussée. La hauteur d'eau est comprise entre quelques micromètres et 0,5 mm.
- à l'arrière de l'aire de contact se trouve la *zone de contact* humide ou sèche où peut persister la présence d'un film d'eau résiduel discontinu. La majorité du frottement entre le pneumatique et la chaussée est générée dans cette zone. C'est souvent dans cette zone que se manifeste le viscoplanage. Il s'agit d'une perte d'adhérence se déroulant dans la zone de transition où la hauteur d'eau présente entre le pneumatique et la surface de la chaussée est très faible. Ce mince film d'eau interrompt les liaisons moléculaires entre la gomme et le revêtement de la chaussée empêchant le phénomène d'adhésion de se produire. La présence de ce film d'eau très mince (quelques micromètres) résulte de l'existence d'efforts de cisaillement visqueux dans le film d'eau (Foucard, 2005). Dans le cas académique du passage d'un véhicule à 100 km/h, un point du sol voit passer l'aire de contact du pneumatique en 6 milli-secondes. La gomme ne dispose alors que de très peu de temps pour évacuer le film d'eau. Par exemple, sur une surface parfaitement lisse, l'épaisseur du film d'eau ne peut descendre au-dessous de 2 à 3 μm (Moore, 1975).

1.1.2 Évaluation du niveau de mouillage des chaussées

Différentes définitions de la hauteur d'eau présente sur une surface sont données dans la littérature (Lamm *et al.*, 1990). Le concept d'épaisseur de film d'eau suggère un milieu

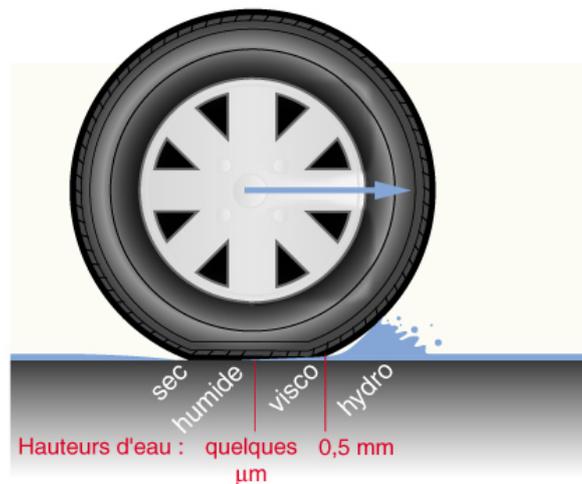


Figure 1.4 — Aire de contact entre un pneumatique et la chaussée en présence d'eau.
(Michelin, 2002)

d'épaisseur homogène. Ce n'est pas le cas pour une chaussée dont la surface est aléatoire selon sa composition et son état.

On peut néanmoins souligner deux manières classiques de mesures de hauteur d'eau.

Le limnimètre est un appareil de mesure ponctuelle de la hauteur d'eau présente au dessus des aspérités. Il s'agit d'un couple d'aiguilles qui permet la détection de la surface liquide par fermeture d'un circuit électrique lors d'un mouvement vertical en direction du sol (figure 1.5). La surface du sol est détectée par contrainte mécanique lorsque les aiguilles l'atteignent. La hauteur d'eau est la différence entre les deux hauteurs. Cette mesure ne peut être représentative de toute une surface à moins de répéter la mesure à plusieurs endroits pour calculer une épaisseur moyenne de film d'eau. En effet, sur une chaussée, la hauteur d'eau peut être très différente à cause des nombreuses rugosités présentes à sa surface. De plus une mesure avec le limnimètre prend une trentaine de secondes. Les phénomènes d'infiltration et de séchage de l'eau viennent alors perturber la mesure. La méthode est à réserver aux films d'eau continus et établis.

La hauteur d'eau peut également être mesurée sans contact par des capteurs optiques tels que l'Aquasens (Holzwarth et Eichhorn, 1993). L'appareil émet un flux lumineux en direction de la surface. Le flux rétrodiffusé par le revêtement routier est altéré en présence d'un milieu liquide à la surface. Il est ensuite analysé en fonction des propriétés spécifiques d'absorption de l'eau dans trois bandes d'onde spécifiques.

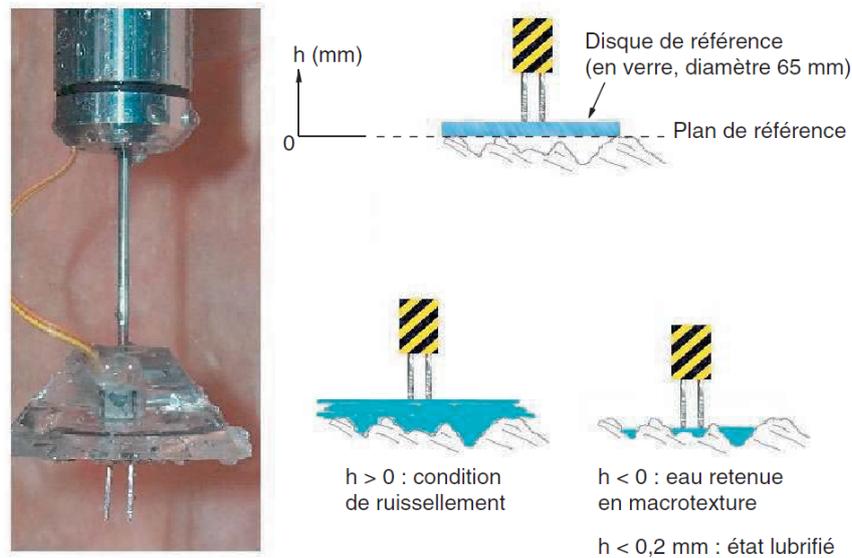


Figure 1.5 — Mesure ponctuelle de la hauteur d'eau à l'aide d'un limnimètre. (Coiret, 2005)

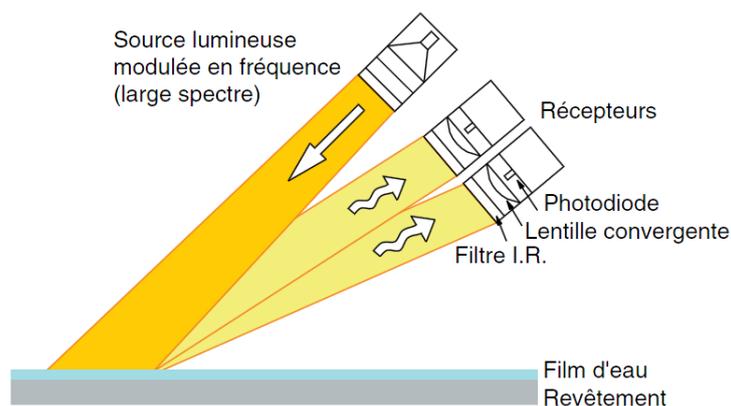


Figure 1.6 — Principe de fonctionnement de l'Aquasens. (Coiret, 2005)

1.1.3 Texture de chaussée

La texture de la surface influence les mécanismes du frottement d'hystérésis et d'adhésion. La force d'adhésion est proportionnelle à l'aire réelle de contact entre le pneu et la chaussée. Le frottement d'hystérésis est généré par les déformations des pains de gomme de la bande de roulement du pneumatique. Les nombreuses rugosités d'une surface de chaussée sollicitent de différentes façons ces deux phénomènes à l'origine de l'adhérence.

1.1.3.1 Origine de la texture des chaussées

Les revêtements routiers sont composés de granulats, de sable et de fines³ unis par un liant, généralement du bitume. Ces éléments sont mélangés à chaud pour constituer un béton bitumineux répandu sur la route et compacté. Il existe de nombreux types de béton

3. poudre minérale dont les granulats ont un diamètre inférieur à 125 μm .

bitumineux qui diffèrent par leur granulats (type, taille) ou encore par leur teneur en liant. Cette composition bien particulière de chaque chaussée leur confère des propriétés spécifiques (Michelin, 2002). De plus, ces propriétés varient avec le temps : décapage du liant, polissage et arrachage des granulats (Tang, 2007; Zhao, 2011). C'est pourquoi chaque chaussée présente un profil différent et a donc un comportement unique vis-à-vis de l'adhérence. La combinaison des granulats, du sable, des fines et du liant donne à la chaussée routière son aspect rugueux. Dans le cadre de cette étude, deux échelles de rugosité seront distinguées : la macrotexture et la microtexture. Il existe d'autres échelles mais qui ne seront pas utiles ici. Le frottement d'adhésion est généralement relié au niveau de microtexture tandis que le frottement d'hystérésis est principalement influencé par la macrotexture. Sur chaussée humide, le frottement d'adhésion chute brutalement avec l'augmentation de la vitesse alors que le frottement d'hystérésis augmente de sorte qu'au dessus de 90 km/h, il a été montré que le frottement d'hystérésis était à l'origine de 90 % de l'adhérence entre le pneu et la chaussée.

La séparation entre microtexture et macrotexture n'est pas absolue même si, dans le domaine de la route, les auteurs sont plutôt d'accord sur leurs définitions. Elle est exprimée en termes de dimension horizontale, la longueur d'onde, et de dimension verticale, l'amplitude (Gothié, 2000).

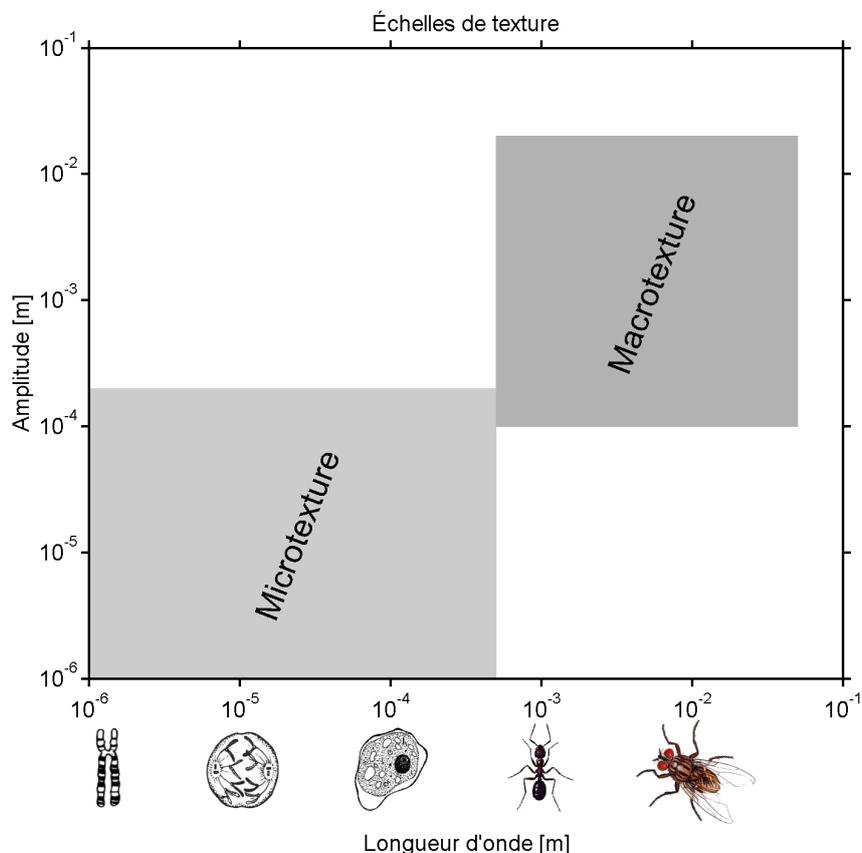


Figure 1.7 — Échelles de texture.

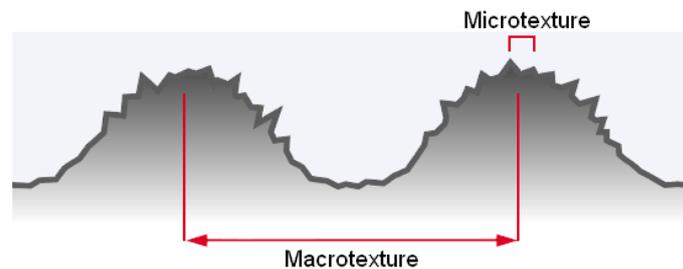


Figure 1.8 — Illustration de la macrotexture et de la microtexture.

1.1.3.2 Macrotexture

Définition

La macrotexture correspond au domaine de longueur d'onde compris entre 0,5 et 50 mm avec une amplitude verticale comprise entre 0,1 et 20 mm (figure 1.7). Elle est liée à la composition granulométrique de la chaussée ainsi qu'à sa mise en œuvre. C'est l'acteur majeur pour la génération de l'hystérésis. En cas de pluie, la macrotexture influe sur la capacité de drainage (entraînement naturel de l'eau dans le sol et vers le bas-côté) et d'évacuation, par le pneu, de l'eau présente sur la chaussée.

Évaluation de la macrotexture

L'évaluation de la macrotexture peut se faire directement par mesures profilométrique ou volumétrique ; mesure de vide entre les granulats d'une chaussée ou bien indirectement via des mesures de frottement à haute vitesse.

Méthodes directes

Techniques volumétriques

Historiquement, la macrotexture se mesure par la **méthode volumétrique de mesure à la tâche**. Cette méthode, normalisée (AFNOR NF EN 13036-1), fournit une valeur appelée *profondeur moyenne de texture* (PMT). Cette valeur est issue d'une mesure du diamètre D d'une tâche circulaire formée par un volume V connu de billes de verre⁴ calibrées, versées et arasées sur la surface routière à caractériser (figure 1.9). La PMT se calcule alors suivant la relation :

$$\text{PMT} = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (1.3)$$

Les valeurs minimales réglementaires⁵ sont comprises entre 0,4 et 0,8 mm. La PMT peut atteindre des valeurs supérieures à 3 mm sur certains revêtement.

4. A l'origine, la tâche était réalisée avec du sable et la valeur mesurée était la hauteur au sable vraie, HSv. La norme française a été révisée et remplacée par la norme européenne en 2002 et le sable a disparu au profit des billes de verre, de forme plus régulière

5. D'après la circulaire n° 2002-39 du 16 mai 2002 de la Direction Générale des Routes - Adhérence des couches de roulement neuves et contrôle de la macrotexture.



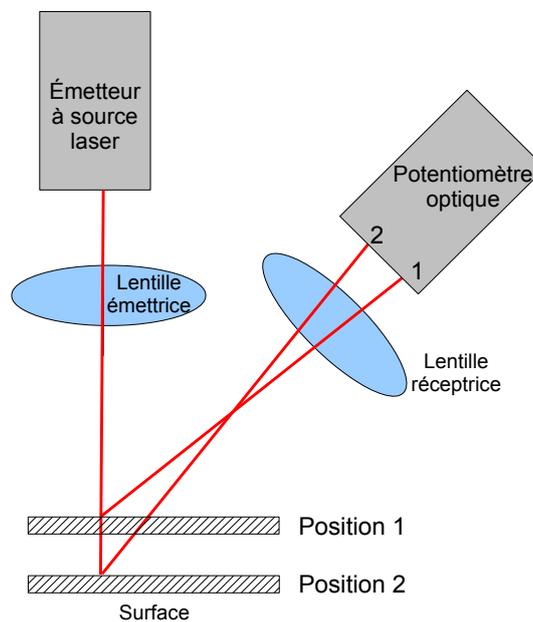
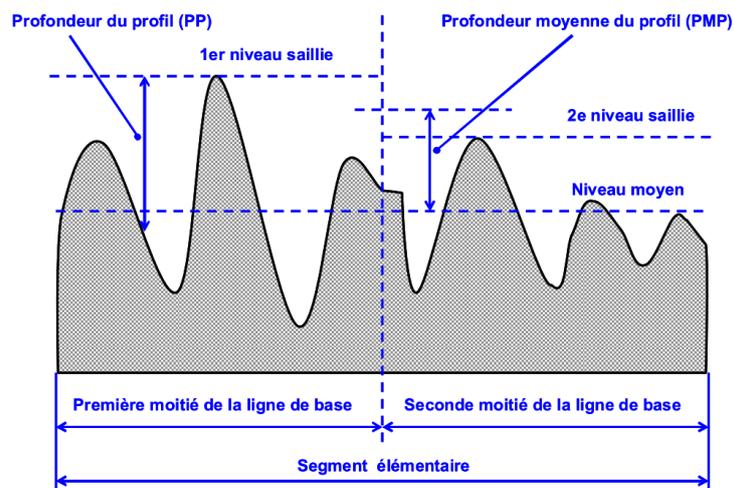
Figure 1.9 — Tâche circulaire et disque araseur.

Cette méthode donne une idée de la macrotexture et permet de classer les chaussées ainsi que d'étudier leur évolution temporelle. Néanmoins, elle présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, il n'est pas correct de l'appliquer sur des chaussées dites *drainantes*. En effet, les billes disparaissent dans les aspérités de ces chaussées, et ainsi faussent la mesure. Ensuite, cette méthode de mesure est locale, le risque de mesurer une partie de chaussée non représentative existe. Elle est également fortement dépendante de l'opérateur. Finalement, cette méthode ne permet pas de récupérer un profil de chaussée.

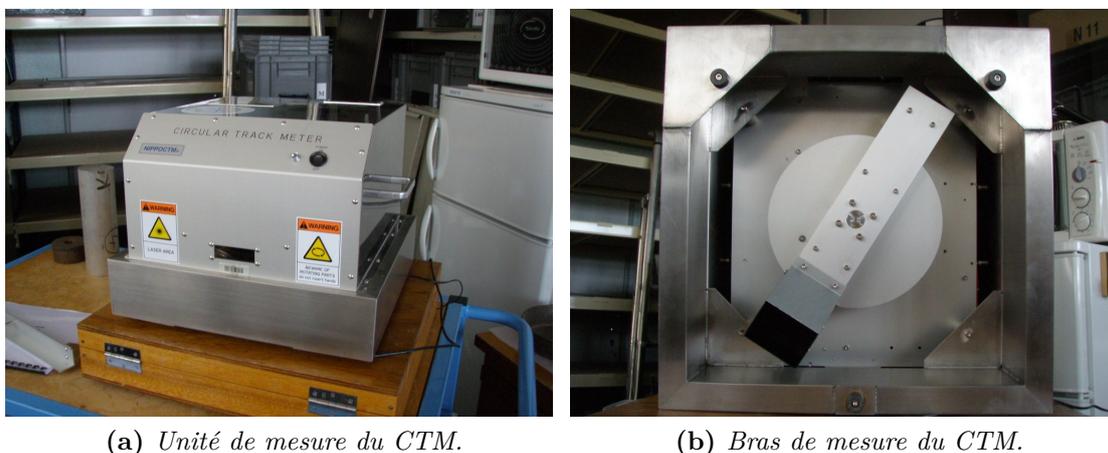
Techniques profilométriques

Il existe de nombreux appareils permettant de mesurer la macrotexture des revêtements routiers. Deux appareils utilisés dans le cadre de cette thèse sont présentés ci-après : le Rugolaser permettant des mesures à grand rendement embarqué sur un véhicule et le CTM qui permet de réaliser une mesure ponctuelle.

Le **Rugolaser** (figure 1.10) est un profilomètre embarquable fréquemment utilisé par les gestionnaires routiers. Il est utilisable *in situ* installé sur un véhicule roulant entre 30 et 100 km/h. L'appareil se compose, entre autres, d'un émetteur à rayon laser et d'un potentiomètre optique. En fonction de la position du rayon réfléchi sur le potentiomètre, il est déduit la hauteur du point de réflexion au sol. Le principe de cette mesure est illustré sur la figure 1.11. La mesure s'effectue en continu, sur une chaussée sèche et propre. Elle permet de récupérer un profil de chaussée avec une fréquence d'échantillonnage de 15 Hz. L'appareil permet également de calculer un indicateur appelé *profondeur moyenne de profil* (PMP), calculé au moyen d'un algorithme (AFNOR NF EN 13473-1) donnant une valeur de PMP tous les 10 ou 20 m. Pour calculer la PMP, le profil est divisé en séries de segments de 100 mm de long. La PMP est la profondeur moyenne de chaque segment du profil donnée en millimètres. Cette hauteur moyenne est définie comme la distance entre la hauteur moyenne du segment et la hauteur moyenne des deux maxima de chaque demi-segment comme illustré figure 1.12. La mesure de la PMP est effectuée en continu sur une ligne de base. L'avantage de cet appareil est donc la mesure rapide de la macrotexture *in situ*, permettant en plus de récupérer le profil de la chaussée. Cependant, le Rugolaser n'est pas utilisable en laboratoire sur des échantillons.

Figure 1.10 — *Rugolaser.*Figure 1.11 — *Principe de mesure par triangulation.*Figure 1.12 — *Méthode de calcul de la PMP sur un segment de profil. (AFNOR NF EN 13473-1)*

Le CTM est un appareil portatif (figure 1.13) qui permet de mesurer ponctuellement la macrotexture d'une surface sur un profil le long d'un cercle de 142 mm de rayon. Il est muni d'un bras rotatif sur lequel est monté un capteur de déplacement à laser CCD, c'est-à-dire qui mesure la position de la surface par triangulation, selon le même principe que le Rugolaser (figure 1.11). La figure 1.14 détaille le principe de la mesure. Le profil obtenu est composé de 1024 points au pas de 0,87 mm soit 892 mm de long comme le montre l'exemple de la figure 1.15. On remarque que le profil mesuré par le CTM a des ordonnées négatives par rapport à une origine inconnue. Un autre inconvénient de l'appareil est que les paramètres de précision de la mesure sont fixés par le constructeur et ne sont pas modifiables. Néanmoins, il est très utilisé car la portabilité de l'appareil permet de réaliser des mesures sur des échantillons en laboratoire mais aussi *in situ* sur routes réelles.



(a) Unité de mesure du CTM.

(b) Bras de mesure du CTM.

Figure 1.13 — Circular track meter.

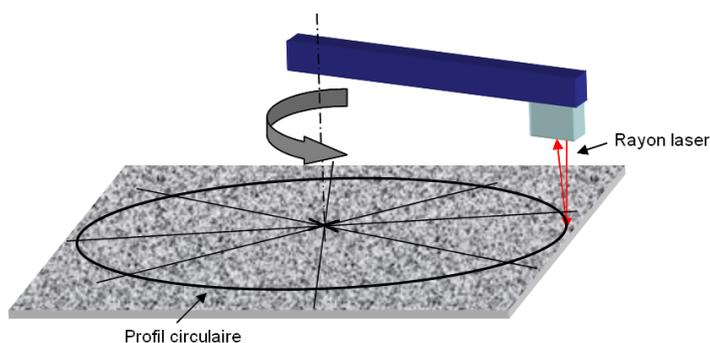


Figure 1.14 — Principe de mesure du CTM.

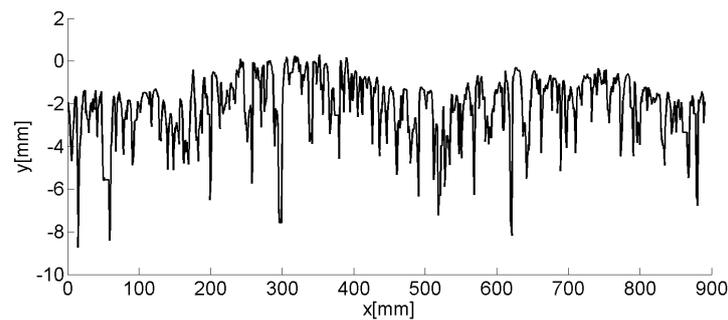


Figure 1.15 — Exemple de profil CTM mesuré sur un béton bitumineux.

Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes consistent à évaluer la macrotexture par des mesures de frottement à vitesse élevée sur chaussée mouillée. En effet, en présence d'une quantité d'eau suffisante à la surface de la chaussée, il est supposé que le frottement dépend principalement de cette échelle de texture. Un exemple de mesure de frottement à haute vitesse est présenté ci-après.

L'**ADHERA** est un appareil français de mesure dynamique *in situ* du CFL avec un taux de glissement de 1 (roue bloquée) sur chaussée mouillée. Il est constitué d'un véhicule tractant une remorque de mesure (figure 1.16). Le véhicule est équipé d'un dispositif de mouillage de la chaussée et d'un dispositif de pilotage de l'essai. Au centre de la remorque se situe une roue de mesure qui glisse dans le sens de circulation du camion tracteur (figure 1.17). Cette roue est lestée et équipée de capteurs permettant de mesurer le CFL en continu lors d'un *tir*, c'est-à-dire lorsque la roue est bloquée. Le comportement dynamique de la remorque est très proche de celui d'un quart de véhicule léger moyen (en particulier, charge statique appliquée au pneu de 250 kg). La roue peut accueillir différents pneumatiques ; les essais standards sont réalisés avec des pneus AIPCR lisses (AIPCR, 2009). L'outil de mouillage de la chaussée est contrôlé en débit afin de garantir une hauteur d'eau à peu près constante tout au long de la mesure. La mesure du CFL permet de porter un jugement sur les niveaux de microtexture et de macrotexture du revêtement selon la vitesse de mesure qui peut varier de 40 à 120 km/h⁶. La macrotexture est évaluée par une mesure de CFL à moyenne ou forte vitesse d'essai et par la pente de la décroissance du CFL en fonction de la vitesse. La mesure de la microtexture est estimée par une mesure de CFL à faible vitesse d'essai. L'ADHERA permet ainsi de réaliser les mesures *in situ* en circulation avec différents types de pneus (qui peuvent être des pneus du commerce). Cependant, l'essai ne peut s'effectuer qu'en roue bloquée. C'est pour cela qu'une version expérimentale de l'appareil appelée *ADHERA Recherche* a été développée. La roue de mesure y est freinée de façon à mesurer le CFL en faisant varier le taux de glissement entre 0 et 1.

6. La mesure est appelée CFLXX. XX est la vitesse de mesure. A 90 km/h, par exemple, la mesure s'appelle CFL90.



Figure 1.16 — *Appareil de mesure ADHERA.*



Figure 1.17 — *Remorque et roue de mesure de l'ADHERA.*

1.1.3.3 Microtexture

Définition

La microtexture correspond au domaine de longueur d'onde compris entre $1\ \mu\text{m}$ et $0,5\ \text{mm}$ avec une amplitude verticale comprise entre $1\ \mu\text{m}$ et $0,2\ \text{mm}$ (figure 1.7). Ces irrégularités de surface sont trop petites pour être observées à l'œil nu mais sont palpables au toucher. Cette échelle de texture est due aux petites aspérités à la surface des granulats ainsi qu'au sable et aux fines noyées dans le liant du revêtement.

Évaluation de la microtexture

Tout comme la macrotecture, l'évaluation de la microtexture peut se faire directement par des relevés profilométriques ou indirectement via des mesures de frottement à faible vitesse de glissement. En effet, il a été montré que plus la vitesse de glissement est faible,

plus la mesure du coefficient de frottement réalisée est sensible à la microtexture (Gothié, 2005)

Méthodes directes

La station de mesure **STIL** (figure 1.19), du nom de l'entreprise qui la commercialise, intègre un capteur optique de haute précision. Elle permet de mesurer un profil de texture au pas minimal de 10 μm . La figure 1.18 montre un exemple de profil STIL. Le zéro des ordonnées est défini par la plage d'amplitude maximale du STIL (cette valeur varie selon la tête de mesure utilisée : dans le cadre des mesures réalisées pour cette thèse l'amplitude maximale est de 3 mm). Les *plats* de valeur nulle qui apparaissent ne sont ainsi pas représentatifs de la réalité, il s'agit d'un effet de troncature. L'appareil est très précis et permet de choisir les paramètres de précision de mesure souhaités (pas et longueur de la mesure). Cependant, la mesure n'est réalisable que sur un échantillon en laboratoire.

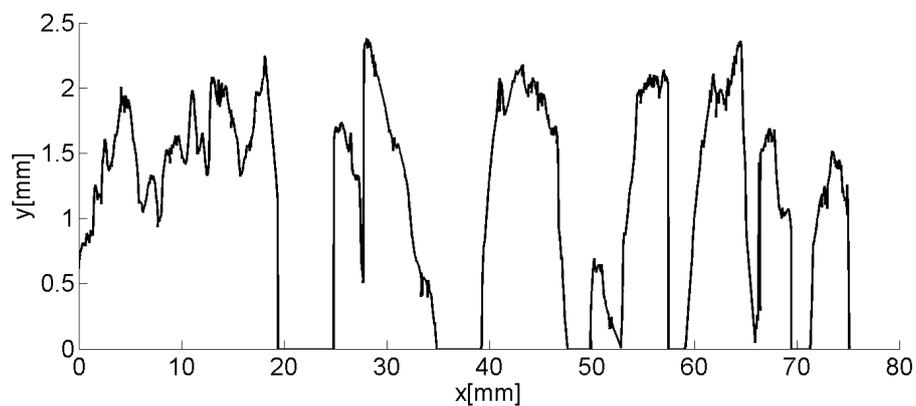


Figure 1.18 — Exemple de profil STIL sur un béton bitumineux.



Figure 1.19 — Unité de mesure du STIL.

L'unité de mesure **Alicona**, du nom de l'entreprise qui la commercialise, est une machine de mesure optique tridimensionnelle de forme et de rugosité de surface à haute résolution verticale (figure 1.20). Cet appareil utilise le principe de la variation focale. L'échantillon est placé sur une table de déplacement et illuminé par un éclairage modulé. La lumière est réfléchie et la réflexion coaxiale est projetée sur un capteur numérique à l'intérieur de l'optique. Lorsque la distance entre l'échantillon et l'objectif est progressivement changée lors du mouvement de ce dernier, la variation de contraste point par point est calculée afin de déduire la position de chaque point. La figure 1.21 montre un exemple de cartographie réalisée avec l'appareil.

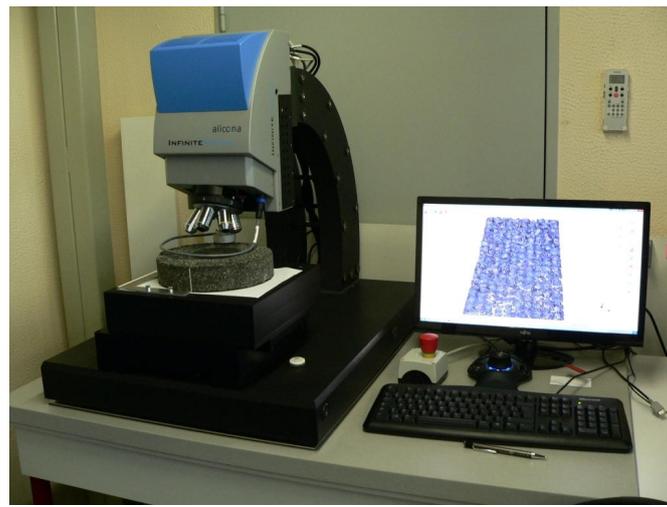


Figure 1.20 — Unité de mesure Alicona.

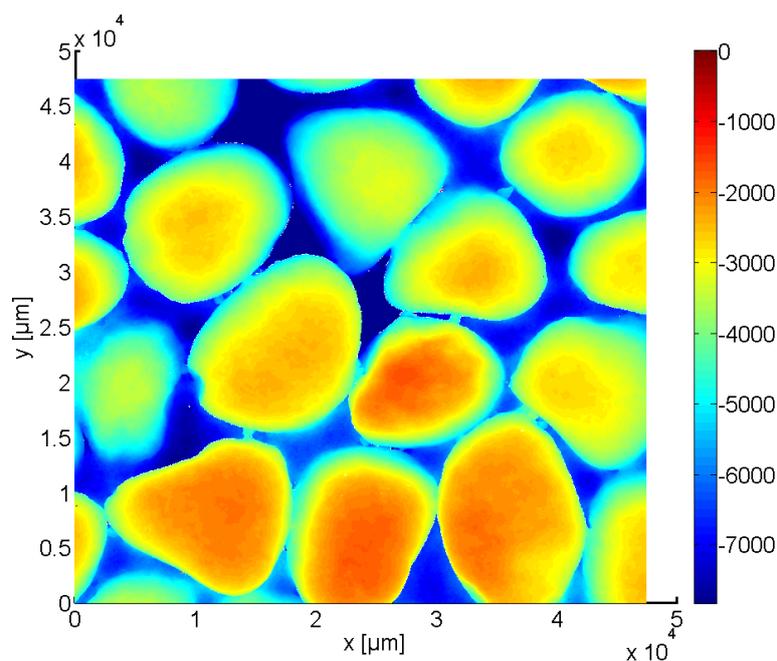
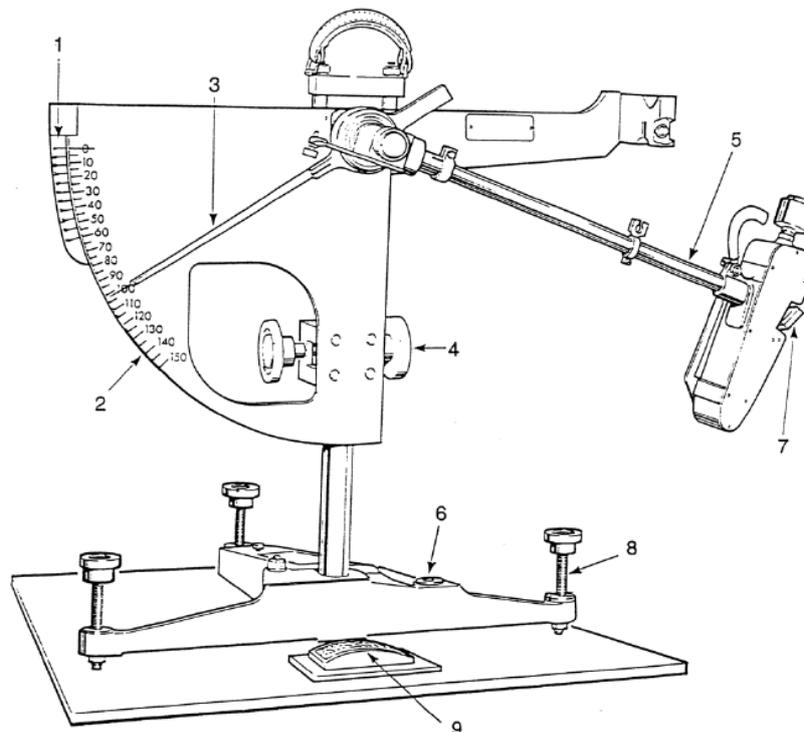


Figure 1.21 — Exemple de cartographie Alicona.

Méthodes indirectes

L'essai au **pendule SRT** (*skid resistance tester*) permet une mesure ponctuelle du frottement d'un patin de caoutchouc sur une surface. C'est un dispositif qui peut être utilisé en laboratoire sur des échantillons ou directement *in situ* pour évaluer le frottement d'une chaussée. La mesure est normalisée par une norme européenne (AFNOR NF EN 13036-4). Le dispositif d'essai au pendule comporte un patin en caoutchouc normalisé fixé à l'extrémité du bras du pendule (figure 1.22) et qui est chargé par un ressort. Le ressort permet de faire frotter le patin sur une distance normalisée et d'empêcher son rebond au moment du contact avec la surface. Le bras est lâché à partir de la position horizontale. La hauteur maximale de remontée du pendule est ensuite repérée à l'aide d'une aiguille. Elle dépend de l'énergie absorbée par le frottement lors du contact entre le patin et la surface. L'échelle graduée du pendule convertit directement le résultat en coefficient de frottement VEP (valeur équivalent au pendule). Cette valeur VEP, sans unité, sert à caractériser la microtexture d'un revêtement car la vitesse de glissement du patin sur la surface est faible (entre 8 et 11 km/h).



Légende

- 1 Échelle F
- 2 Échelle graduée
- 3 Aiguille
- 4 Vis d'ajustement vertical
- 5 Pendule
- 6 Niveau à bulle
- 7 Patin en caoutchouc
- 8 Vis d'ajustement du niveau
- 9 Roue porte-épreuve

Figure 1.22 — Pendule de frottement. (AFNOR NF EN 13036-4)

Le **GripTester** est un appareil d'origine écossaise permettant la mesure *in situ* d'un CFL avec un taux de glissement constant de l'ordre de 14% sur chaussée mouillée. L'appareil se présente sous la forme d'une petite remorque autonome⁷ permettant le mouillage, la mesure du CFL et son enregistrement. La remorque est munie d'une troisième roue comme l'ADHERA. Celle-ci est équipée d'un pneumatique dont la bande de roulement est lisse. L'axe de la roue est instrumenté avec un système à jauges de contraintes permettant l'estimation des forces verticales et horizontales (CEN/TS 15901-7). Le CFL calculé est appelé Gripnumber (GN) et peut être mesuré pour des vitesses comprises entre 5 et 40 km/h. Son inconvénient principal est la faible amplitude de vitesse pour la mesure de CFL ainsi que le diamètre de la roue de mesure qui est bien différent des tailles de roue des véhicules légers.



Figure 1.23 — *GripTester*

Le **SCRIM** est un appareil britannique de mesure dynamique de frottement transversal (CEN/TS 15901-6). Le mot SCRIM est l'abréviation de *sideway-force coefficient routine investigation machine*. Il s'agit d'un camion équipé d'un réservoir d'eau de 6000 litres. Le camion est équipé d'une roue de mesure qui fait un angle de 20° par rapport à la direction du véhicule. La roue est équipée d'un pneu dont les caractéristiques géométriques et de gomme sont standardisées. En conditions normalisées d'essai, la vitesse de mesure est limitée à 60 km/h mais des essais peuvent être réalisés jusqu'à 100 km/h sur voie rapide. Les mesures sont effectuées en continu avec une hauteur d'eau répandue devant la roue de mesure de 0,5 mm.



Figure 1.24 — *Appareil de mesure de frottement SCRIM.*

7. En plus de pouvoir être tractée par un véhicule, la remorque peut être poussée manuellement par un opérateur pour réaliser la mesure à très basse vitesse de glissement.

Le **DFT**, *dynamic friction tester*, est un dispositif permettant d'effectuer une mesure ponctuelle de frottement sur une surface aussi bien en laboratoire que sur le terrain. Il s'agit d'un appareil communément utilisé en Amérique du Nord, en Asie et en Océanie, dont le premier exemplaire en France a été acquis par l'Ifsttar en 2009. Le DFT est composé d'une unité de mesure, présentée sur la figure 1.25, et d'une unité de contrôle. L'unité de mesure est équipée de trois patins de gomme spécifique (figure 1.26). La procédure d'essai fait l'objet d'une norme ASTM (ASTM E 1911, 2009). Lors d'une mesure standard, le disque est entraîné par un moteur afin de donner aux patins une vitesse de consigne imposée par l'utilisateur. Lorsqu'une vitesse-cible⁸ légèrement inférieure à la vitesse de consigne est atteinte, de l'eau est projetée sur la surface d'essai et le débit est maintenu pour obtenir une hauteur d'eau maîtrisée. Lorsque la vitesse de consigne est atteinte, le moteur s'arrête. Le disque est mis en contact avec la surface et l'appareil impose une charge verticale de 11,8 N par patin. Ces patins sont en glissement total sur la surface. La vitesse des patins décroît alors jusqu'à l'arrêt grâce aux frottements générés dans les surfaces de contact. Ce frottement est mesuré par l'appareil qui est équipé d'un affichage digital de contrôle présentant les valeurs à 20, 40 et 60 km/h. Les fichiers de résultats créés contiennent cependant les valeurs du frottement pour toutes les vitesses entre 0,1 et 80 km/h par pas de 0,1 km/h, soit 800 valeurs, comme le montre l'exemple de la figure 1.27. Cependant, il n'est pas possible d'obtenir l'évolution de la vitesse glissement des patins en fonction du temps au cours de l'essai car l'appareil ne l'enregistre pas. L'avantage du DFT est sa polyvalence qui permet aussi bien de réaliser des essais en laboratoire qu'*in situ*. De plus, l'utilisation du système de mouillage intégré n'est pas obligatoire, ce qui permet à l'opérateur d'utiliser un autre système de mouillage lors d'essais plus spécifiques. Par contre, l'essai de frottement étant réalisé avec des patins de gomme, le seul taux de glissement disponible est 100%.



Figure 1.25 — Le dynamic friction tester *DFT*.

8. Cette vitesse dépend de la vitesse de consigne.

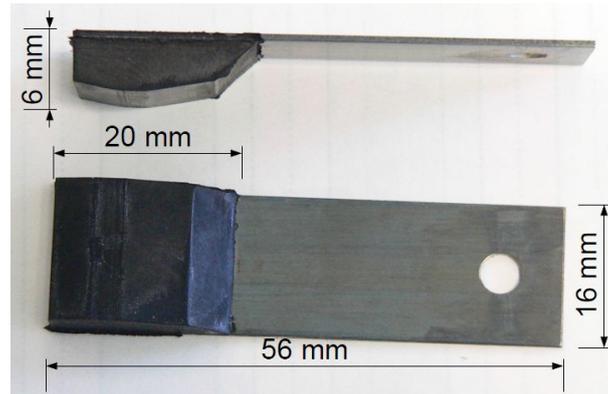


Figure 1.26 — *Patin du DFT.*

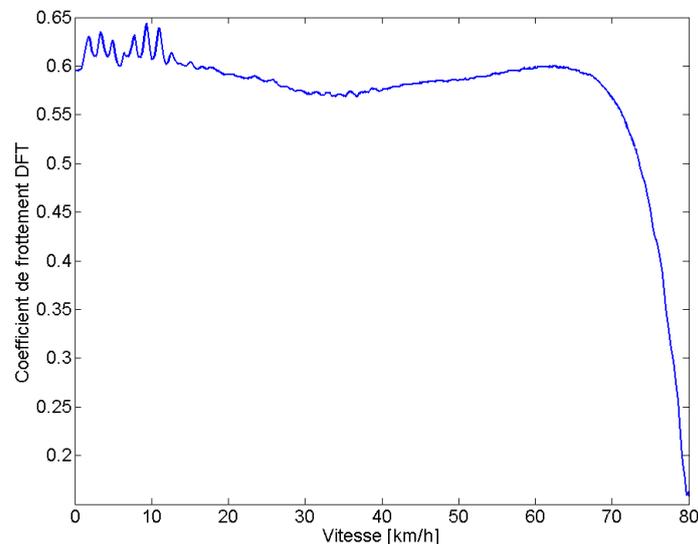


Figure 1.27 — *Exemple de courbe de freinage DFT.*

Description géométrique de la texture

Les descripteurs calculés à partir de profils de texture sont variés. Néanmoins, ils appartiennent généralement à trois familles : taille, forme et densité. Classiquement, il est possible de caractériser la taille moyenne des aspérités par le paramètre R_q qui est l'écart-type des hauteurs sur un profil de texture. Cependant, considérant ce R_q pas suffisamment précis pour donner une indication sur l'adhérence, plusieurs auteurs ont proposé d'autres méthodes de caractérisation plus corrélables avec l'adhérence d'une chaussée.

Afin de décrire la forme des microaspérités, Do introduit la notion d'indenteurs (Do, 2004). Un indenteur est défini comme une portion de profil comprise entre deux vallées. Ainsi, un profil de surface contient plusieurs indenteurs répartis de manière aléatoire. Par conséquent, en plus de la forme, deux autres paramètres sont considérés pour tenir compte de cette répartition : la densité d'indenteurs, et le relief créé par leurs hauteurs et leur espacements relatifs. La figure 1.28 présente trois paramètres d'indenteur.

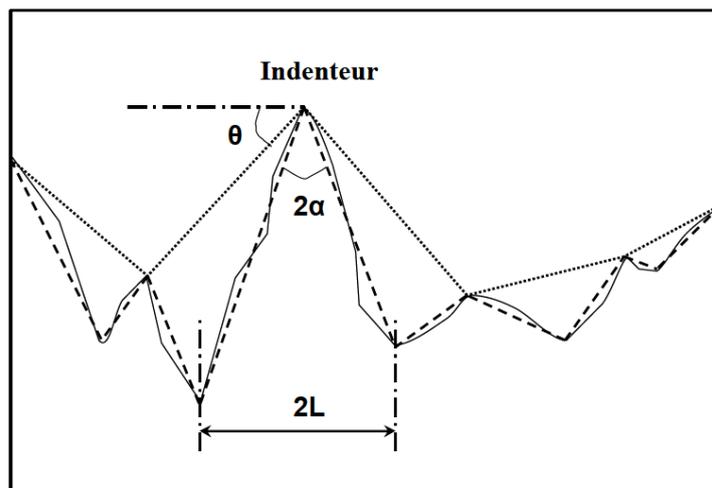


Figure 1.28 — Définition d'un indenteur.

La forme de l'indenteur est caractérisée par son angle au sommet 2α . Cet angle caractéristique est calculé de la manière suivante :

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\arctan \frac{x_i - x_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} + \arctan \frac{x_i - x_{i+1}}{z_i - z_{i+1}} \right) \quad (1.4)$$

où :

- x_i est l'abscisse du sommet (maximum local) et z_i son altitude ;
- x_{i-1} l'abscisse du creux (minimum local) précédant le sommet et z_{i-1} son altitude ;
- x_{i+1} l'abscisse du creux (minimum local) suivant le sommet et z_{i+1} son altitude.

Il est également possible de caractériser la forme par la cotangente de l'angle α , paramètre directement relié à la déformation de la gomme et au frottement.

La largeur de l'indenteur $2L$ peut être calculée de la manière suivante :

$$2L = x_{i+1} - x_{i-1} \quad (1.5)$$

Ensuite la densité d'indenteurs est définie par le nombre d'indenteurs par unité de longueur du profil.

Enfin, le relief est défini par l'angle θ formé par le segment reliant les sommets de deux indenteurs consécutifs et l'horizontale. On le calcule de la manière suivante :

$$\theta = \arctan \frac{z_{k+1} - z_k}{x_{k+1} - x_k} \quad (1.6)$$

où l'indice k représente un sommet et $k + 1$ le suivant.

Il sera montré par la suite que, tout comme α , θ est relié au frottement.

1.2 Principaux travaux sur l'influence de la microtexture et de la hauteur d'eau sur l'adhérence

Comme il a déjà été signalé précédemment, le niveau d'adhérence dépend d'une combinaison de nombreux paramètres. Les facteurs les plus influents sont la texture du revêtement, la vitesse du véhicule, les caractéristiques du pneumatique et surtout, celui qui

nous intéresse le plus dans le cadre de cette étude, la présence d'eau à la surface de la chaussée. Dans cette partie, on s'attachera à présenter les études menées pour décrire la relation existant entre l'adhérence, la hauteur d'eau et la microtexture.

1.2.1 Effet de la hauteur d'eau

1.2.1.1 Étude de Veith

Une étude bibliographique de Veith a permis d'analyser l'influence de la vitesse sur le coefficient de frottement (Veith, 1983). Elle montre que le coefficient de frottement est indépendant de la vitesse en dessous de 50 km/h. Cette étude montre également que le coefficient de frottement est fortement dépendant de la hauteur d'eau à haute vitesse (au-delà de 96 km/h). La figure 1.29 montre que le coefficient de frottement diminue exponentiellement avec la hauteur d'eau. Les hauteurs d'eau étudiées sont supérieures à 0,12 mm.

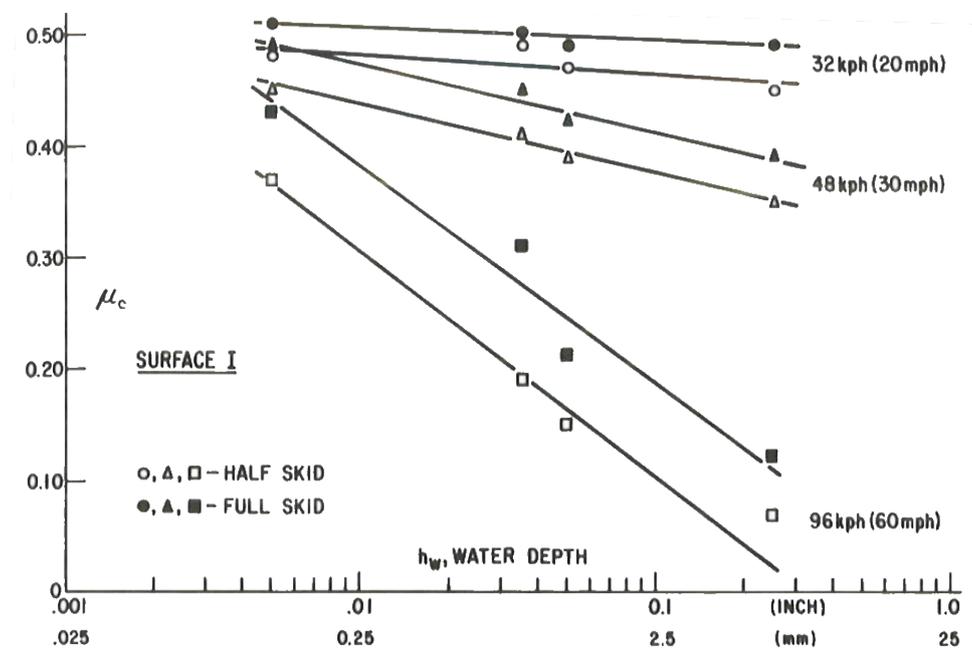


Figure 1.29 — Évolution du coefficient de frottement en fonction de la hauteur d'eau. (Veith, 1983)

1.2.1.2 Modèle hauteur d'eau/adhérence de Kulakowski

L'analyse de l'influence des différents paramètres du contact sur le frottement du pneumatique en présence d'eau sur la chaussée a conduit certains auteurs à proposer des modèles afin de prévoir la dégradation du frottement.

Parmi les travaux notables, on peut citer l'étude menée par Kulakowski et Harwood (Kulakowski et Harwood, 1990). Cette étude a mené à la création d'un modèle mathématique donnant l'évolution du frottement pneumatique-chaussée en fonction de la hauteur d'eau. Il a été développé à partir d'essais de frottement à différentes hauteurs d'eau réalisés en laboratoire mais aussi en conditions réelles.

En laboratoire, une jauge de profondeur micrométrique a été fabriquée afin de mesurer le plus précisément possible l'épaisseur d'eau présente à la surface des échantillons. Pour mesurer le frottement, l'appareil développé par le *Pennsylvania Transportation Institute* présenté sur la figure 1.30 a été utilisé. Il s'agit d'un patin de gomme dont le mouvement est contrôlé par la chute libre d'un poids se situant au bout d'un câble reliant les deux objets. Les essais ont été conduits sur :

- six surfaces (bloc de granite lisse, trois surfaces artificielles et deux échantillons de revêtement) ;
- quatre types d'eau (distillée, pluie, robinet et salée).

La méthode de mesure d'épaisseur de film d'eau donnant un résultat ponctuel, dix mesures de hauteur d'eau ont été réalisées pour chaque essai. La vitesse du patin de gomme est comprise entre 8 et 11 km/h. Entre 20 et 25 mesures de frottement ont été réalisées pour chaque couple surface-type d'eau à différentes hauteurs d'eau.

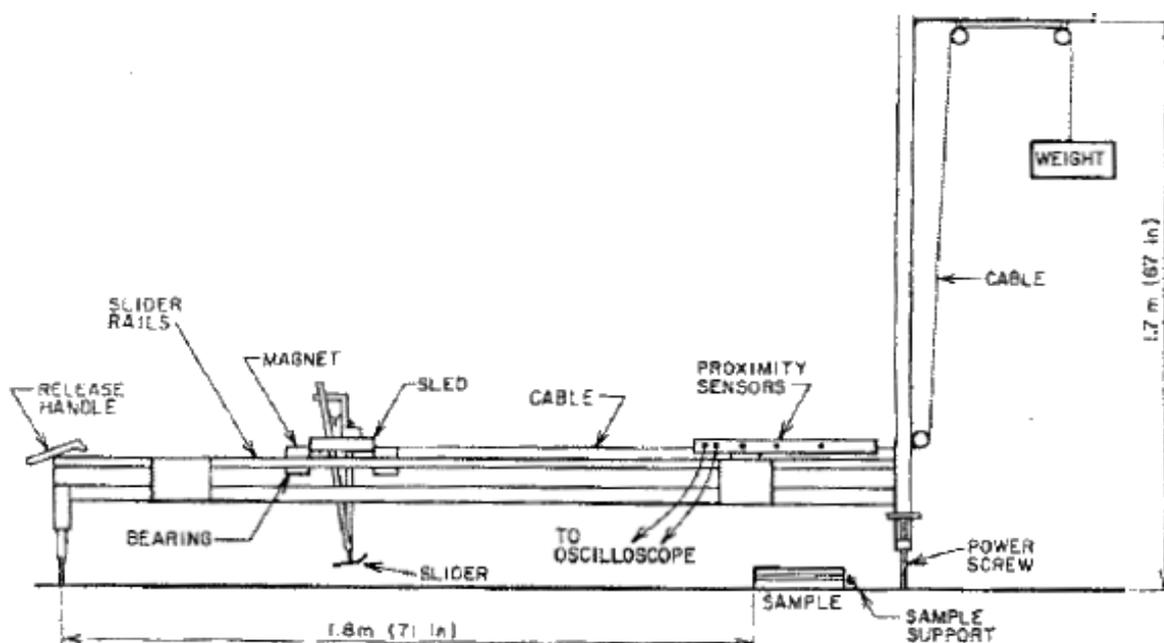


Figure 1.30 — Appareil de mesure du frottement PTI. (Kulakowski et Harwood, 1990)

Les essais *in situ* ont été réalisés avec des véhicules afin de voir si les observations faites avec un patin de gomme sur un échantillon pouvaient également être faites lors du glissement d'un pneumatique à des vitesses plus élevées. Les appareils de mesure de hauteurs d'eau ont été placés à différents endroits des revêtements pour permettre plusieurs mesures simultanées. Les différentes hauteurs d'eau ont été obtenues par séchage de revêtement après mouillage de la chaussée. Trois pneus ont été testés (pneu ASTM lisse, pneu ASTM rainuré et pneu commercial) sur plusieurs chaussées de textures variées. Le freinage du véhicule a été réalisé en roue bloquée à trois vitesses : 8, 32 et 64 km/h.

Ces différents essais ont permis de trouver la relation suivante reliant le coefficient de frottement à la hauteur d'eau :

$$\mu = \Delta\mu \cdot e^{-\beta h} + \mu_F \tag{1.7}$$

avec :

- μ : coefficient de frottement ;
- h : hauteur d'eau ;
- μ_F : coefficient de frottement *final* ;
- $\Delta\mu$: différence entre $\mu(h = 0)$ et μ_F ;
- β : paramètre du modèle.

Ce modèle suppose que le coefficient de frottement atteint une valeur minimale μ_F qui ne varie plus avec l'augmentation de la hauteur d'eau.

De plus, une hauteur d'eau critique a été définie arbitrairement comme la valeur à laquelle le coefficient de frottement est diminué de 75% de la valeur de $\Delta\mu$. Les essais ont montré que l'eau n'avait une influence significative qu'à 64 km/h. A cette vitesse, l'influence du revêtement et du pneu sur la hauteur d'eau critique a été étudiée. Les hauteurs d'eau critiques trouvées sont comprises entre 0,025 et 0,23 mm selon la configuration d'essai. Les essais conduits à 64 km/h indiquent qu'une hauteur d'eau sur la chaussée de 0,05 mm peut réduire de 20 à 30 % le coefficient de frottement par rapport à celui mesuré sur chaussée sèche. L'importante variation des résultats en fonction du type de chaussée et du type de pneu montre leur grande influence sur le frottement.

1.2.2 Effet de la microtexture

1.2.2.1 Géométrie de la microtexture/Adhérence

Moore (Moore, 1969) a montré que pour des surfaces dont la macrotexture est *suffisamment* anguleuse (l'auteur ne donne pas de valeur définissant le terme *suffisamment*), la présence de microtexture au sommet des aspérités de la chaussée n'est pas nécessaire étant donné que les pics de pression générés sont suffisants pour empêcher l'existence d'un film d'eau continu. Cependant, la macrotexture des chaussées routières n'est pas suffisante à elle seule pour l'évacuation de l'eau dans le contact entre le pneumatique et la chaussée et la plupart des surfaces de chaussée présente une microtexture afin d'empêcher l'effet lubrifiant dû à l'entraînement de l'eau aux sommets des aspérités.

La relation entre les paramètres d'indenteurs et le frottement a été analysée par Do (Do, 2004). Des mesures de profils et des essais de frottement ont été réalisés sur des carottes⁹ prélevées sur des routes circulées. Les mesures de profil ont été réalisées avec le capteur STIL (section 1.1.3.3). Les mesures de frottement ont été réalisées avec un pendule SRT (section 1.1.3.3). La valeur de chaque descripteur est la moyenne des valeurs obtenues sur l'ensemble des indenteurs des profils mesurés sur une même surface. Les figures 1.31 et 1.32 montrent respectivement l'évolution du frottement en fonction du relief θ et de la forme $\cot(\alpha)$. Malgré une corrélation faible à cause de la dispersion des données, l'observation de l'évolution générale est logique. Lorsque le relief est plus prononcé ou que les indenteurs sont plus pointus, la valeur mesurée du frottement augmente.

9. Prélèvement cylindrique d'un échantillon de revêtement à l'aide d'un tube appelé carottier.

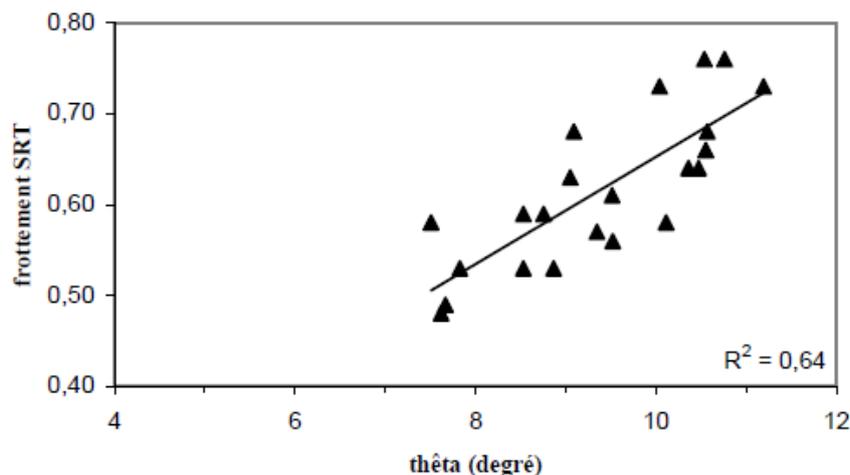


Figure 1.31 — Relation entre le relief et le frottement. (Do, 2004)

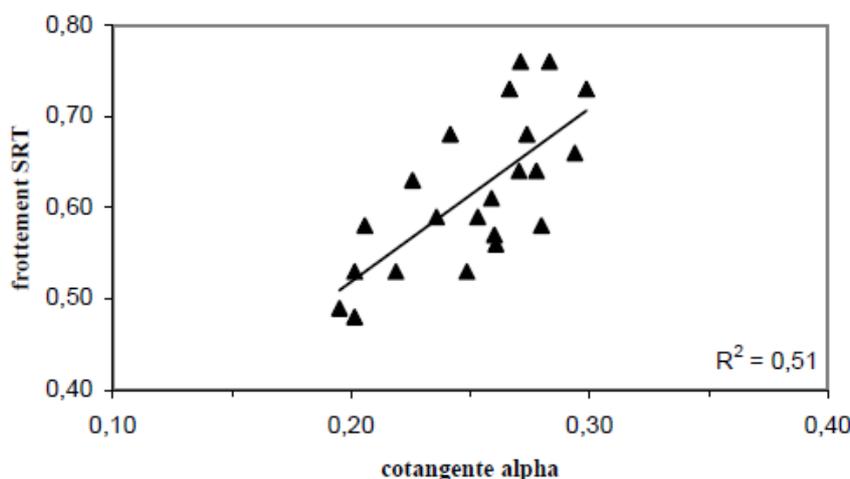


Figure 1.32 — Relation entre la forme et le frottement. (Do, 2004)

Savkoor (Savkoor, 1991) remarque également l'importance de la forme des rugosités : des aspérités pointues permettent plus facilement la création de pics de pression locaux permettant de briser un film d'eau que des aspérités arrondies. Il souligne que les aspérités s'arrondissent lors du polissage de la surface d'une chaussée par le trafic ce qui explique la dégradation d'adhérence généralement constatée lors du vieillissement d'une chaussée (Zhao, 2011). Savkoor remarque néanmoins que la microtexture est souvent décrite sous des termes qualitatifs (arrondi, pointu) montrant la nécessité de définir des descripteurs mathématiques de microtexture.

Yandell (Yandell, 1972) a montré que la microtexture jouait un rôle très important sur le niveau de frottement en présence d'un lubrifiant sur la chaussée. En effet, une augmentation de l'épaisseur du film masquant la surface de l'ordre de 0,5% de la valeur de l'amplitude d'un granulat de la chaussée (par exemple, pour un granulat de 5 mm, cela représente 25 μm) peut diminuer de 50% la valeur du coefficient de frottement mesurée. De telles variations se produisent lors de l'augmentation de la vitesse du véhicule ou lorsqu'un polluant plus visqueux que l'eau se trouve sur la chaussée.

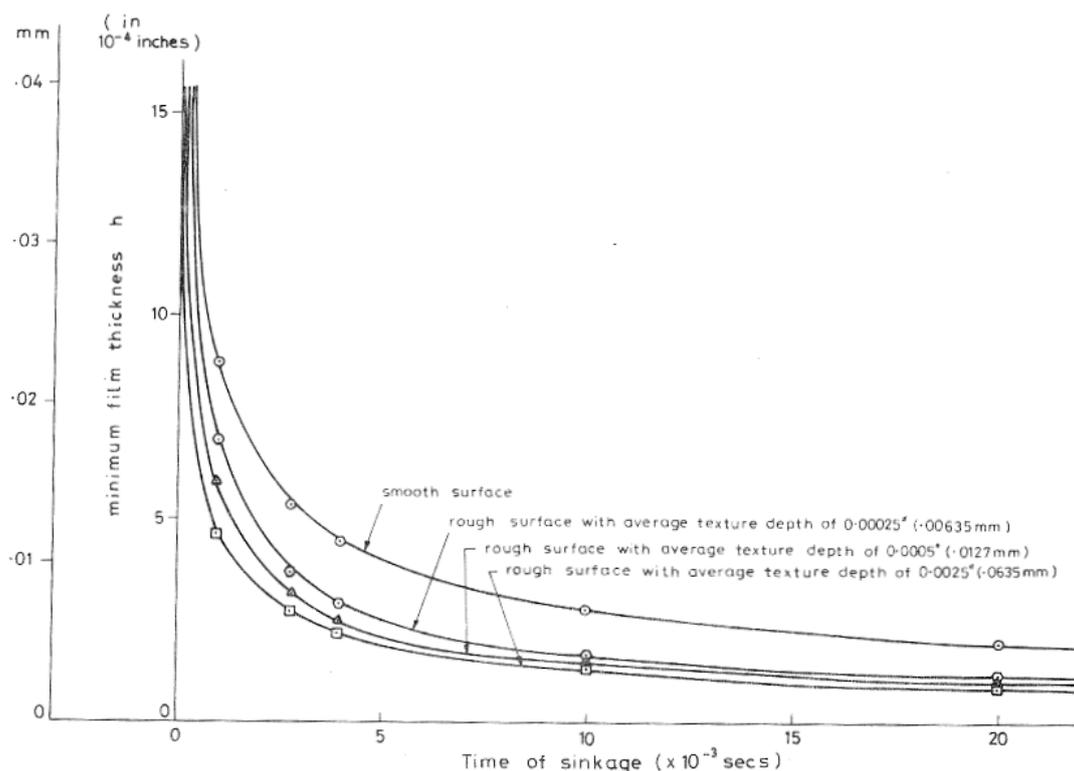


Figure 1.34 — Influence de la microtexture sur l'évolution de l'épaisseur de film d'eau en fonction du temps. (Taneerananon et Yandell, 1981)

film d'eau sur la longueur de drainage considérée ainsi que l'homogénéité des rugosités considérées par rapport à ce que l'on peut trouver sur un profil réel de chaussée.

Rhode avait également obtenu des résultats similaires (Rhode, 1976) lors d'une étude sur le calcul de l'épaisseur minimale de film d'eau \bar{h}_{min} en fonction de l'amplitude des rugosités ε . La réduction du temps d'évacuation de l'eau (représentée par le facteur $\frac{4wh_{\infty}^2 \Delta t}{3\pi\mu R_1^4}$) en fonction de l'amplitude des microrugosités y est mise en évidence (figure 1.35).

Savkoor a introduit le rapport Λ_m comme paramètre important à l'existence ou non d'un mince film d'eau sur une grande partie de la surface de contact entre un pneumatique et la chaussée (Savkoor, 1991). Ce rapport est donné par :

$$\Lambda_m = \frac{h_m}{\sigma} \tag{1.9}$$

où h_m est l'épaisseur minimale de film d'eau calculée sur la base d'un profil lisse et σ la moyenne quadratique des hauteurs des microrugosités du profil (en ignorant les grandes ondulations).

Il conclut qu'afin d'empêcher la création d'un film d'eau continu sur la surface, il est préférable d'avoir $\Lambda_m < 1$.

1.2.3 Viscoplanage

L'influence de la vitesse de glissement de la gomme est également un domaine qui a été exploré. Une étude de Moore démontre l'existence d'une vitesse critique à partir de

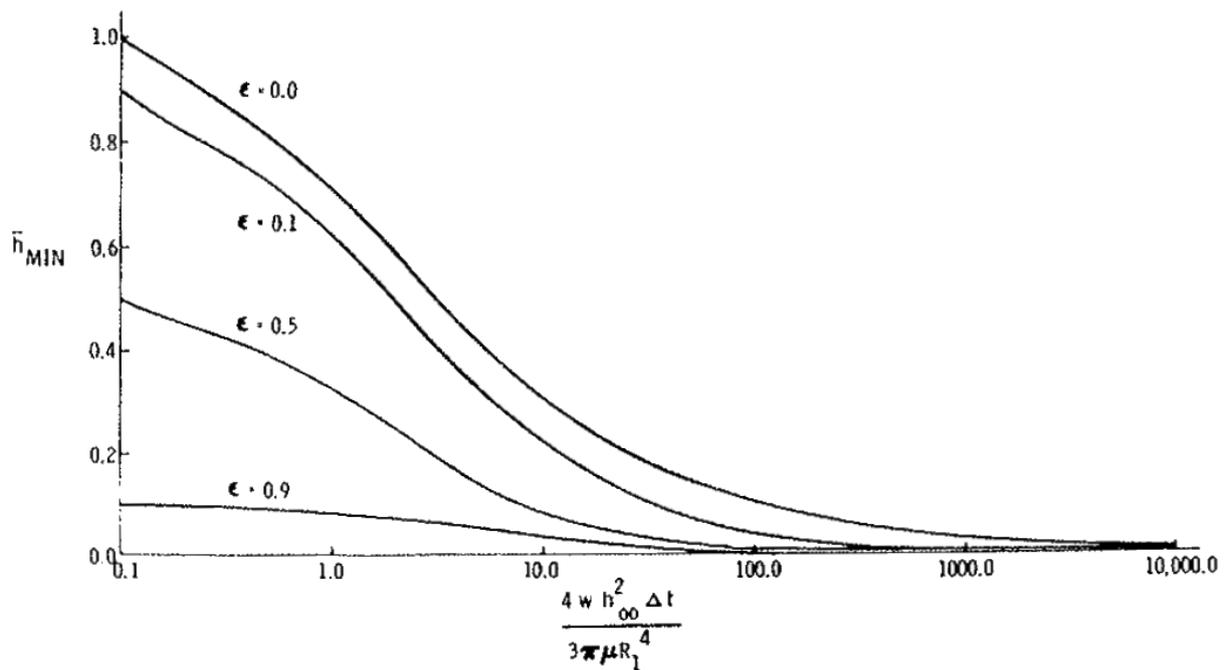


Figure 1.35 — Évolution de l'épaisseur minimale de film d'eau en fonction d'une variable du temps, charge constante, texture triangulaire. (Rhode, 1976)

laquelle une microtexture d'amplitude trop faible ne permet pas de percer le film d'eau entre deux surfaces (Moore, 1975). Au dessus de cette vitesse critique, l'adhérence chute brutalement si l'amplitude de la microtexture n'est pas suffisante (figure 1.36).

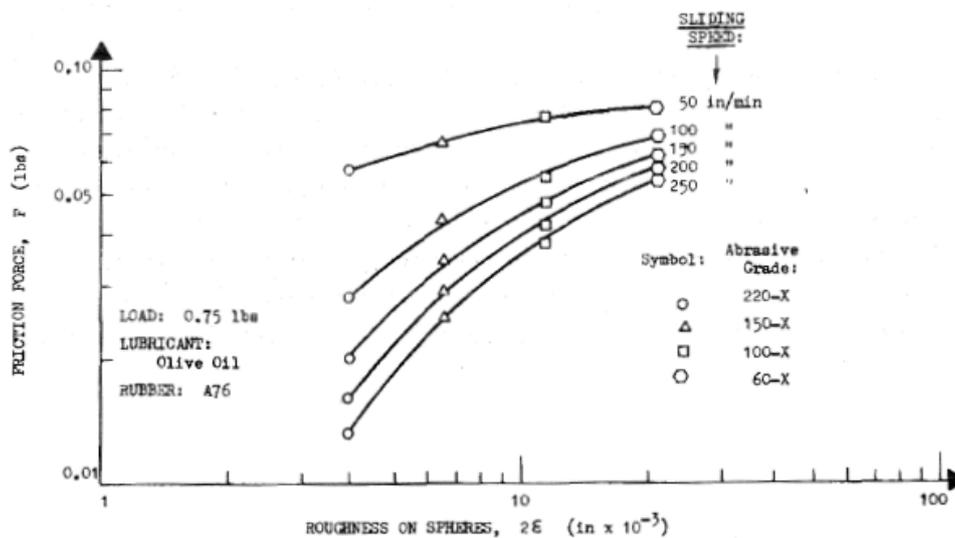


Figure 1.36 — Évolution de la force de frottement en fonction de la microtexture sur des sphères rugueuses pour différentes vitesses de glissement. (Moore, 1975)

Afin de calculer la hauteur d'eau dans l'aire de contact, Savkoor a utilisé une formule de calcul donnant l'épaisseur minimale de film d'eau dans l'aire de contact pneu/chaussée (Savkoor *et al.*, 2004). Pour l'obtenir, un ajustement analytique a été effectué sur des

solutions numériques au problème de lubrification élasto-hydrodynamique entre le pneu et la chaussée. Des ajustements de courbes à partir de toutes les variations possibles des paramètres du modèle ont permis d'arriver à une relation mathématique dont les paramètres adimensionnels dépendent de paramètres physiques. Cette relation de Hamrock cité par Savkoor est la suivante :

$$\frac{h_{min}}{R_x} = 7.43 U^{0.65} W^{-0.21} (1 - 0.85 e^{-0.31k}) \quad (1.10)$$

Les paramètres adimensionnels sont :

$$U = \frac{\eta(V + \omega R_x)}{E_{eff} R_x}, \quad W = \frac{F_z}{E_{eff} R_x^2} \quad \text{et} \quad k = \frac{b}{a} \quad (1.11)$$

- R_x et R_y sont respectivement les rayons de courbures effectifs du pneu dans les directions longitudinales et transversales,
- k est le paramètre d'ellipticité. Dans les conditions du contact hertzien décrit ci-dessus, le rapport $\frac{b}{a} = \left(\frac{R_y}{R_x}\right)^{2/3}$,
- η est la viscosité du fluide à température ambiante,
- E_{eff} est le module d'élasticité effectif du modèle de gomme. Ici, $E_{eff} = 1,67 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$.

Au final, Savkoor a montré à partir de cette relation que pour une vitesse du véhicule variant entre 0 et 100 km/h, l'épaisseur minimale du film d'eau dans l'aire de contact évolue quasi linéairement entre 0 et 25 μm .

Si la formule permet d'avoir une idée de l'amplitude des hauteurs d'eau dans l'aire de contact, elle ne prend pas en compte les rugosités de surface.

Moore a développé un modèle plus local de calcul de hauteur d'eau au sommet d'une aspérité circulaire lisse (Moore, 1967). A partir de la hauteur d'eau présente à la base de l'aspérité et de la géométrie de l'aspérité, un calcul d'équilibre de la charge appliquée par la gomme glissant par dessus l'aspérité avec la pression hydrodynamique est réalisé. Cela permet de trouver la hauteur d'eau h^* au sommet de l'aspérité. La figure 1.37 présente la géométrie du problème.

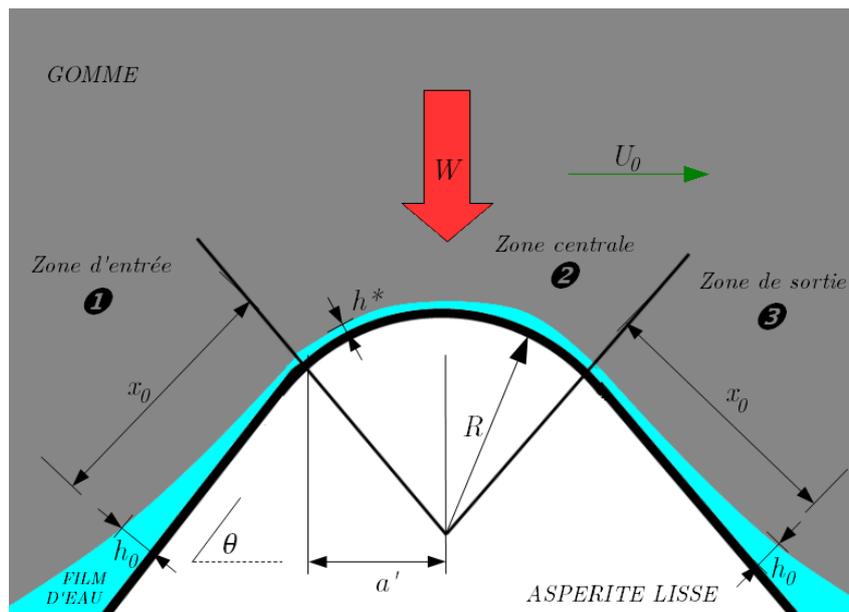


Figure 1.37 — Géométrie du modèle de Moore.

1.3 Objectifs et démarche

1.3.1 Objectifs de la thèse

Comme l'étude bibliographique l'a montré, l'étude de l'adhérence en présence d'eau sur la chaussée est très complexe avec un grand nombre de facteurs d'influence. En particulier, l'eau dégrade l'adhérence et le seul indicateur dont nous disposons est son épaisseur sur la chaussée. Outre le fait que la définition et la mesure d'une telle épaisseur ne sont pas acquises (surtout lorsque la hauteur d'eau est très faible), cet indicateur ne tient pas compte des conditions de contact entre le pneumatique et la surface de chaussée. La thèse cherche donc à :

- définir un indicateur plus pertinent que la hauteur d'eau, qui tienne compte des paramètres du contact, comme la texture de la chaussée et la vitesse de glissement de la gomme entre autres,
- analyser les variations du frottement en fonction de la hauteur d'eau dans différentes conditions,
- modéliser la relation entre hauteur d'eau et adhérence en prenant en compte les paramètres du contact,
- déterminer des hauteurs d'eau critiques vis-à-vis de l'adhérence mettant en évidence le danger provoqué par les très faibles films d'eau.

1.3.2 Méthodologie

Les recherches bibliographiques ont montré qu'il existe peu d'études sur l'adhérence des chaussées faiblement mouillées. Par conséquent, la quantité de données issues d'expérimentations est elle aussi limitée. C'est pourquoi cette thèse débute par un vaste plan d'expérience.

L'objectif de ce plan d'expérience est d'observer, puis d'analyser, les effets des deux échelles de texture sur l'adhérence qu'offre une surface en présence d'un film d'eau très mince. Ceci soulève deux enjeux métrologiques qui vont être traités : la mesure de faibles hauteurs d'eau d'une part et la mesure de frottement sur surface faiblement mouillée d'autre part. Tout d'abord, les essais devant être réalisés sur une surface faiblement mouillée, loin des conditions standards d'essais, des protocoles d'essais particuliers sont développés. Ensuite, afin d'observer séparément les effets de la macrotexture et la microtexture, des surfaces spécifiques, des mosaïques de graviers roulés, sont créées en laboratoire. De plus, des surfaces routières correspondant à différents types de revêtements usuels sur le réseau français ont également été utilisées afin de se rapprocher du cas réel du contact pneu/chaussée.

Deux appareils de mesure du frottement couramment utilisés dans le domaine de la route et très bien corrélés ont été choisis : le DFT pour les essais en laboratoire et l'ADHERA pour les mesures *in situ*.

Les résultats des essais sont tout d'abord observés en faisant le lien avec les travaux de la littérature afin de déterminer les outils à utiliser pour les analyses. Dans un premier temps, ces observations sont réalisées à la fois sur les mosaïques et les enrobés (en laboratoire). Dans un second temps, les essais *in situ* sont exploités afin de s'assurer de la possibilité d'extrapoler les résultats obtenus en laboratoire au cas réel d'un pneu circulant sur une chaussée faiblement mouillée.

Les courbes de frottement en fonction de la hauteur d'eau sont étudiées afin d'apprécier les effets de la texture et de la vitesse en dégagant des tendances. Ensuite, une analogie avec les régimes de lubrification permet de proposer une première explication aux phénomènes observés et ainsi amorcer une caractérisation mathématique.

Cette étude permet de définir un indicateur, appelé *hauteur d'eau critique*. Elle est définie comme la hauteur d'eau à la frontière entre le régime de lubrification limite et le régime mixte, à l'endroit où la chute d'adhérence est la plus prononcée.

De plus, une méthode est développée pour extraire et caractériser uniquement la microtexture des échantillons en mosaïque afin de s'affranchir des effets de la macrotexture.

Ainsi, les influences relatives de la vitesse et des paramètres de microtexture sur la variation du frottement sont quantifiées.

Cela permet de discriminer les paramètres essentiels à la modélisation physique du frottement sur une surface faiblement mouillée.

Les données d'entrées du modèle sont la hauteur d'eau au sommet des granulats et la vitesse de glissement de la gomme sur la surface. Le modèle est appliqué sur plusieurs profils de microtexture. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats des essais réalisés en laboratoire.

La hauteur d'eau présente au sommet de chaque granulat n'étant pas *a priori* connue, un moyen de la calculer est recherché. Ce calcul se découpe en deux phases : calcul de la hauteur d'eau le long du profil "libre" c'est-à-dire sans considérer l'effet de l'entraînement dû à la gomme, puis une phase de calcul des hauteurs d'eau aux sommets de chaque granulat.

Enfin, le modèle global d'estimation du frottement gomme/chaussée s'appuie sur un principe de sommation des effets des différents phénomènes intervenant dans le mécanisme

d'adhérence. Ces trois contributions sont : la déformation de la gomme, l'adhésion et l'effet hydrodynamique. L'impact de ces trois contributions sur le niveau d'adhérence global est quantifié afin de déterminer le coefficient de frottement correspondant à différentes conditions de mouillage et de vitesse.

Chapitre 2

Programme expérimental

Plan du chapitre

2.1	Échantillons	38
2.1.1	Échantillons de laboratoire	38
2.1.1.1	Échantillons en mosaïque de graviers roulés	38
2.1.1.2	Échantillons en enrobés bitumineux	42
2.1.2	Surfaces de la piste d'essai	44
2.2	Appareils et protocoles de mesure	47
2.2.1	Mesurages de la texture	47
2.2.2	Protocole de mouillage des surfaces	48
2.2.2.1	En laboratoire	48
2.2.2.2	<i>In situ</i>	50
2.2.3	Protocoles de mesures du frottement	50
2.2.3.1	En laboratoire	50
2.2.3.2	<i>In situ</i>	52

Les recherches bibliographiques ont montré qu'il existe peu d'études de l'adhérence sur chaussée faiblement mouillée. Par conséquent, la quantité de données issues d'expérimentation est elle aussi limitée. C'est pourquoi cette thèse débute par un vaste plan d'expérience.

L'objectif de ce plan d'expérience est d'observer, puis d'analyser, les effets des deux échelles de texture sur l'adhérence qu'offre une surface en présence d'un film d'eau très mince. Ceci soulève deux enjeux métrologiques qui vont être traités : la mesure de faibles hauteurs d'eau d'une part et la mesure de frottement sur surface faiblement mouillée d'autre part. Tout d'abord, les essais devant être réalisés sur une surface faiblement mouillée, loin des conditions standards d'essai, des protocoles d'essais particuliers sont développés. Ensuite, afin d'observer séparément les effets de la macrotecture et la micro-tecture, des surfaces spécifiques sont créées en laboratoire. De plus, des surfaces routières correspondant à différents types de revêtements usuels sur le réseau français ont également été utilisées afin de se rapprocher du cas appliqué du contact pneu/chaussée.

Deux appareils de mesure du frottement couramment utilisés dans le domaine de la route et très bien corrélés ont été choisis : le DFT pour les essais en laboratoire et l'ADHERA pour les mesures *in situ*.

Ce chapitre présente dans un premier temps les surfaces étudiées puis dans un second temps, le détail des protocoles mis en place.

2.1 Échantillons

2.1.1 Échantillons de laboratoire

2.1.1.1 Échantillons en mosaïque de graviers roulés

Trois mosaïques carrées de 400 mm de côté composées de graviers roulés sont fabriquées. Ces mosaïques sont sablées afin de créer une microtexture artificielle et contrôlable.

Matériaux

Les mêmes graviers roulés sont utilisés pour toutes les mosaïques. Il s'agit de graviers lisses récupérés en fond de rivière dont la taille est comprise entre 6,3 et 12 mm.

Fabrication

Les mosaïques sont fabriquées suivant les étapes présentées ci-dessous :

- En premier lieu, une couche d'huile est appliquée sur le fond d'un moule afin d'éviter un collage au cours de la procédure (figure 2.1a) ;
- Les graviers sont placés manuellement avec leur face la plus plane contre le fond du moule (figure 2.1b). Cela permet d'avoir la surface de la mosaïque la plus plane possible. Un autre objectif du placement manuel est également d'avoir le minimum de vide entre les graviers roulés ;
- Du sable est versé dans les espaces entre les graviers roulés afin d'éviter la pénétration de la résine à la surface (figure 2.1c) ;
- Un mélange de résine et de sable est déversé pour remplir le moule (figure 2.1d) ;
- Une fois le mélange sec, la mosaïque est démoulée (figure 2.1e).

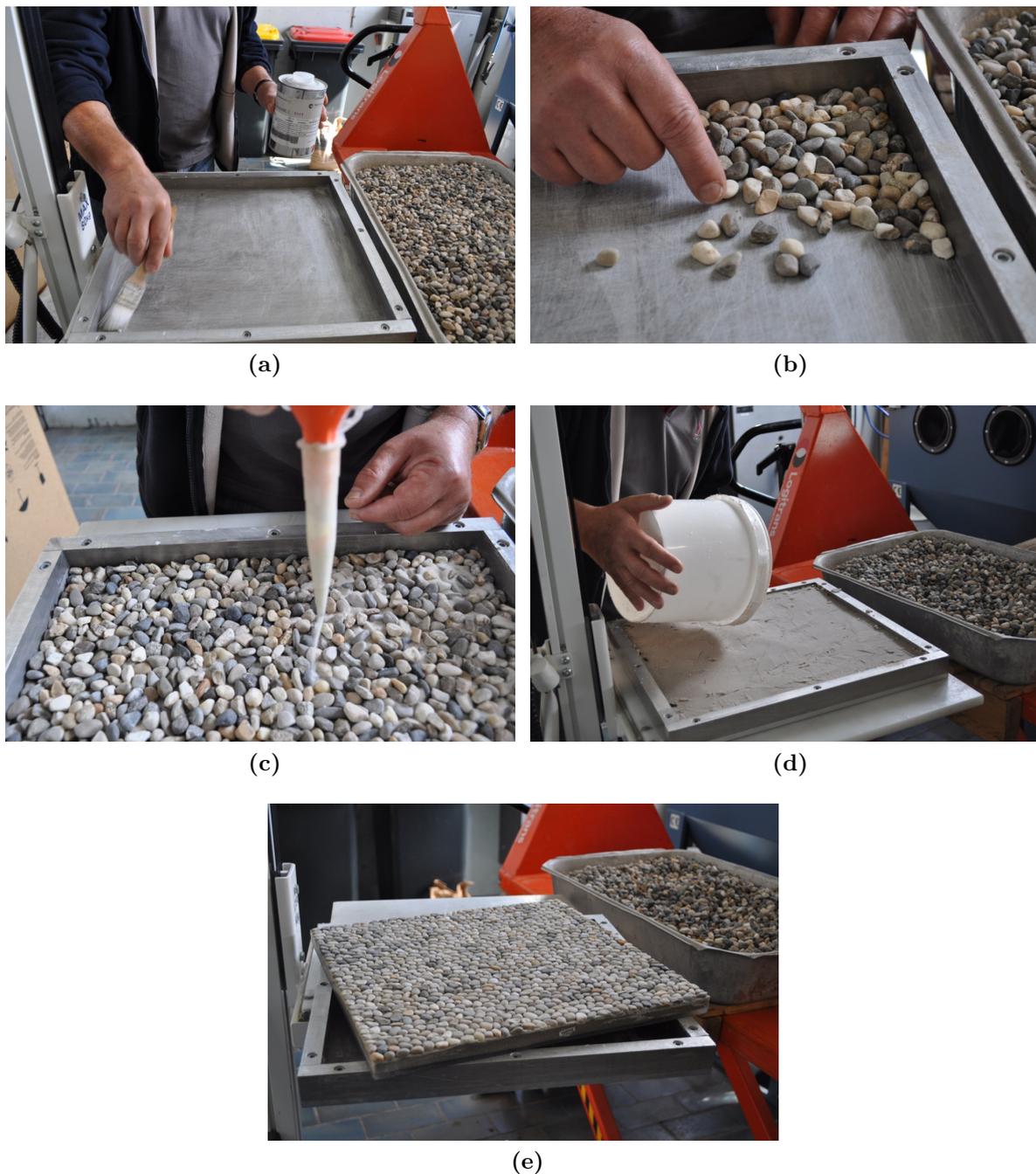


Figure 2.1 — *Fabrication des mosaïques.*

Création artificielle de la microtexture

A l'origine, la surface des graviers roulés est lisse. Un protocole est mis en place afin de modifier leur microtexture. Ce protocole doit également permettre de ne pas modifier la macrotexture des mosaïques. Pour cela, les mosaïques sont sablées dans une cabine à manches (figure 2.2). Chaque mosaïque est traitée avec un abrasif différent.

Les abrasifs utilisés sont les suivants :

- Sable corindon brun de diamètre 420 micromètres. Le corindon brun est un oxyde

- d'aluminium cristallisé électrofondu, élaboré à partir de bauxite calcinée. Sa teneur élevée en bioxyde de titane lui confère une grande solidité ;
- Sable corindon brun de diamètre 590 micromètres ;
 - Grenaille d'acier FERROBLAST de diamètre 800 micromètres. Sa microstructure métallurgique, martensite fine et homogène, donne aux particules une forte solidité.



Figure 2.2 — *Cabine à manche ouverte.*

Le calibre du sable corindon a été donné par le fournisseur. Cependant, la donnée est absente pour la grenaille FERROBLAST. Une granulométrie de la grenaille est alors réalisée pour obtenir son calibre. La granulométrie consiste à faire passer l'abrasif dans des tamis successifs, dont le maillage est de plus en plus fin. Le nombre retenu correspond au passant qui a retenu le plus de matière. La figure 2.3 montre que la plus grande pente de la courbe granulométrique a lieu avec le tamis de taille de maillage 800 micromètres.

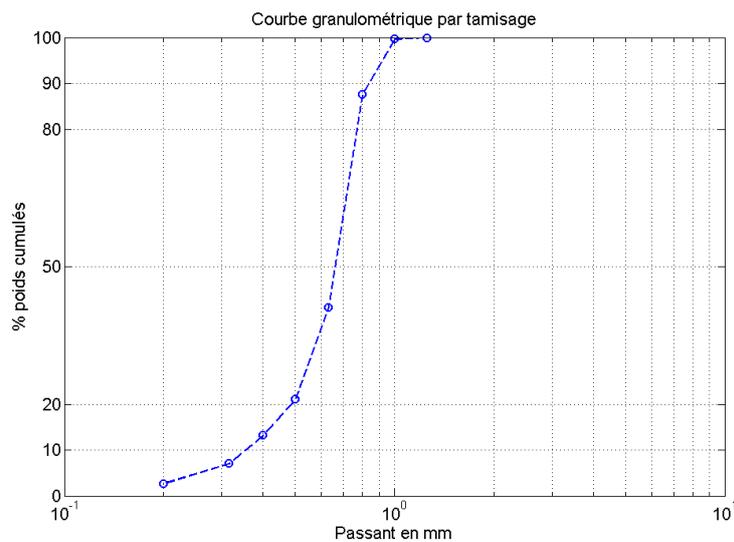


Figure 2.3 — *Granulométrie de la grenaille FERROBLAST.*

Le sablage est réalisé par allers-retours successifs comme présenté figure 2.4. On appelle *un sablage* le passage de la buse sur toute la surface dans le sens horizontal et dans le sens vertical.

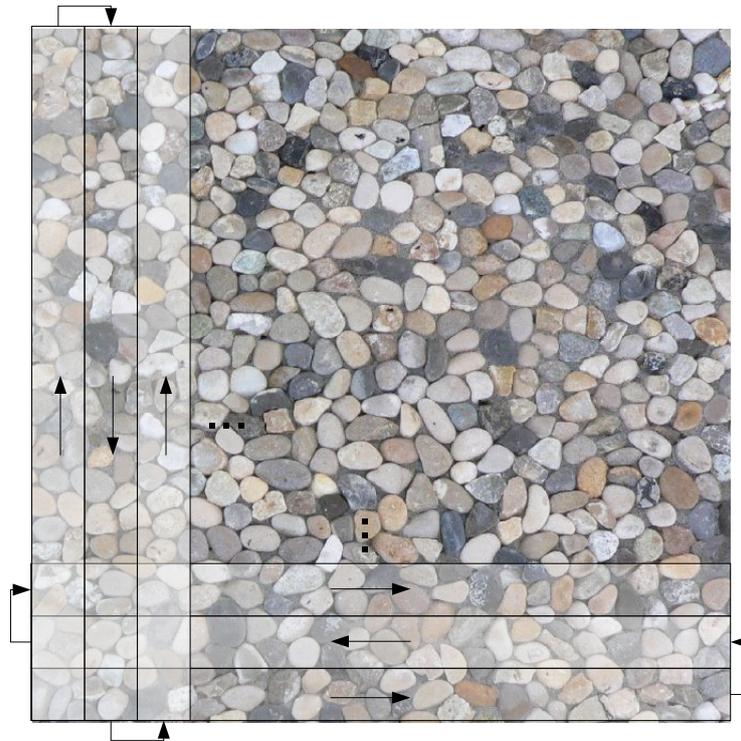


Figure 2.4 — Schéma du protocole de sablage.

De plus, afin de pouvoir étudier la microtexture avec l'appareil de cartographie Alicona, des mosaïques de taille plus réduites sont fabriquées avec les mêmes graviers roulés. Contrairement aux grandes plaques qui ont été sablées au fur et à mesure jusqu'à atteindre le niveau 3 sablages, les petites mosaïques sont conservées dans chaque état de sablage, ce qui permet de refaire des mesures pour les états de sablage intermédiaires.

Les échantillons sont désignés par un nom de code donnant le type d'abrasif utilisé et le nombre de passes effectuées selon le tableau 2.1.

Tableau 2.1 — Nomenclature des échantillons utilisés.

	Type d'abrasif		
	Sable Corindon 420	Sable Corindon 590	Grenaille FERROBLAST 800
État initial	S420-E0	S590-E0	G800-E0
1 sablage	S420-E1	S590-E1	G800-E1
2 sablages	S420-E2	S590-E2	G800-E2
3 sablages	S420-E3	S590-E3	G800-E3

2.1.1.2 Échantillons en enrobés bitumineux

Trois échantillons en enrobés bitumineux sont également fabriqués. Les revêtements sont choisis en faisant un compromis entre leur représentativité par rapport aux enrobés des routes françaises et leur aspect de surface. Sont retenus :

- Un BBTM¹ 0/10 (figure 2.5) ;
- Un BBSG² 0/10 (figure 2.6) ;
- Un ECF³ fibre 26/11 (figure 2.7).

Les revêtements BBTM et BBSG représentent plus de 40% des formulations utilisées sur les routes nationales et autoroutes françaises (SETRA, 2000) tandis que l'ECF est une technique éprouvée de renouvellement de la couche de roulement. Le BBTM est l'enrobé le plus drainant tandis que l'ECF a la surface qui présente le moins d'espace de stockage de l'eau.

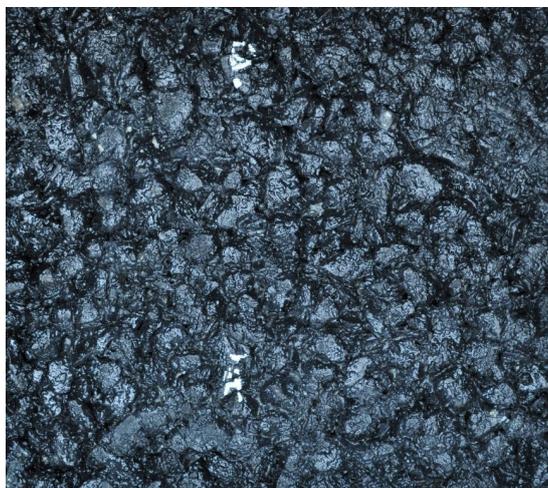


Figure 2.5 — Échantillon de BBTM.

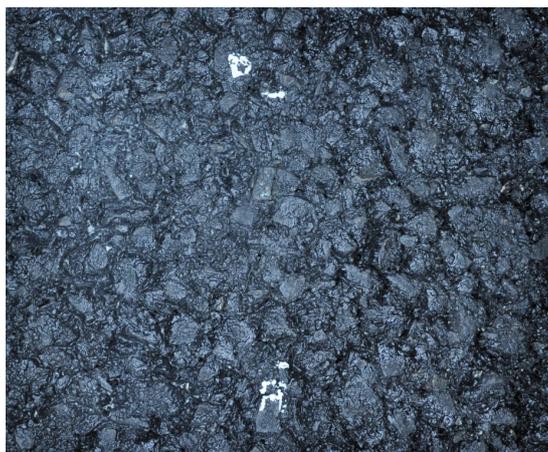


Figure 2.6 — Échantillon de BBSG.

-
1. Béton bitumineux très mince.
 2. Béton bitumineux semi-grenu.
 3. Enrobé coulé à froid.

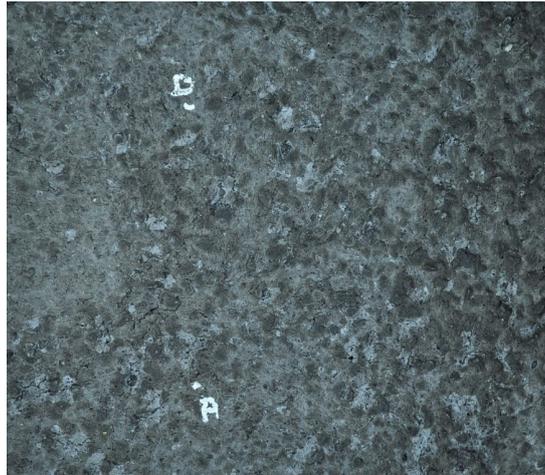


Figure 2.7 — *Échantillon d'ECF.*

Matériaux

Pour tous les enrobés, les caractéristiques des granulats sont les suivantes :

- Carrière : Noubleau ;
- Coefficient de polissage accéléré : Polished stone value - PSV = 52 ;
- Résistance à l'usure : Micro-Deval - MDE = 12 ;
- Résistance à la fragmentation : Los Angeles - LA = 12 ;

La norme (AFNOR NF P18-545) précise les spécifications des granulats utilisés dans les chaussées en enrobés. Les valeurs sont répertoriées dans la tableau suivant :

Tableau 2.2 — *Caractéristiques intrinsèques des granulats pour chaussées : couche de roulement utilisant des liants hydrocarbonés (AFNOR NF P18-545).*

Code non compensé	Catégorie des normes NF EN		
	LA	MDE	PSV
A	20	15	56
B	20	15	50
C	25	20	50

Ainsi, les valeurs mesurées de résistance à l'usure et à la fragmentation sont plutôt faibles pour les granulats utilisés. Cependant, le coefficient de polissage accéléré a une valeur correcte ce qui est un résultat positif puisque un essai de frottement DFT est similaire à un essai de polissage accéléré (frottement d'un patin de gomme répété sur la même trajectoire circulaire). On peut donc en déduire que la qualité des échantillons en enrobés n'est pas dégradée au fur et à mesure des essais.

Fabrication

La fabrication des revêtements est réalisée en laboratoire à l'aide d'un compacteur (figure 2.8). Les échantillons sont des plaques carrées d'épaisseur 80 mm et de côtés 400 mm. Ces plaques sont entreposées en extérieur pendant un mois pour enlever la couche grasse de surface caractéristique des revêtements neufs. Tous les côtés, exceptée la face supérieure de l'échantillon, sont isolés afin d'empêcher l'écoulement de l'eau au cours des

essais. Les figures 2.5 à 2.7 montrent l'aspect de surface de ces revêtements et le tableau 2.3 donne les résultats de la mesure de la PMT sur les échantillons.



Figure 2.8 — Compacteur Ifsttar.

Tableau 2.3 — Caractéristiques de texture des échantillons en enrobés bitumineux.

Échantillon	PMT (mm)	VEP
BBTM	2,90	66
BBSG	1,42	64
ECF	1,10	89

Les valeurs de PMT des échantillons en enrobés montrent qu'ils possèdent une bonne macrotecture (valeurs supérieures à 0,8). Les échantillons en ECF et en BBSG présentent une macrotecture proche alors que l'échantillon en BBTM a une macrotecture bien supérieure aux deux autres.

Les valeurs de VEP montrent que l'ECF possède une meilleure microtexture que les deux autres échantillons en enrobés dont la valeur VEP est proche.

2.1.2 Surfaces de la piste d'essai

Afin de valider les observations faites en laboratoire, des essais sont également réalisés *in situ* sur la piste de référence de l'Ifsttar (annexe B).

La piste est composée de plusieurs *planches* constituées de revêtements différents. On appelle planche une partie de la chaussée recouverte d'un même revêtement. Les planches sont repérées par une lettre ou une lettre et un chiffre. Le tableau 2.4 présente les caractéristiques des revêtements testés.

Tableau 2.4 — Caractéristiques des revêtements de la piste de référence de l'Ifsttar.

Nom	Revêtement	PMT (mm)	CFL 40	CFL 60	CFL 90	VEP	Photographie
A	Béton bitumineux drainant (BBdr) 0/6	2,27	0,52	0,50	0,47	60	
C	Enduit superficiel (ES) 0,8/1,5	0,87	0,69	0,49	0,27	77,3	
E1	Béton bitumineux semi-grenu (BBSG) 0/10	1,02	0,52	0,44	0,30	59,5	
E2	Béton bitumineux semi-grenu (BBSG) 0/10	1,24	0,48	0,40	0,28	55,5	
M1	Béton bitumineux très mince (BBTM) 0/10	1,74	0,57	0,49	0,36	70,5	

M2	Béton bitumineux très mince (BBTM) 0/6	1,56	0,48	0,46	0,41	61,1	
----	--	------	------	------	------	------	---

Afin d'étudier différents niveaux de microtexture de la même façon qu'en laboratoire, les planches G de la piste de référence de l'Ifsttar sont utilisées. Les planches G sont composées d'un même revêtement mais celui-ci a été recouvert de plusieurs types de peinture afin d'en modifier sa microtexture. Tout d'abord, une grande partie de microtexture est masquée par l'ajout de peinture routière seule, ce qui permet d'obtenir une surface bien plus lisse qu'à l'origine (G1). Ensuite, la planche G2 est obtenue par l'ajout de micro-billes dans la peinture. La peinture de la planche G3 est mélangée à des micro-billes et des grains de verre. L'ajout de ces matériaux dans la peinture permet de recréer une microtexture par-dessus la macrotexture existante. Le tableau 2.5 présente les caractéristiques des planches G.

Tableau 2.5 — *Caractéristiques des planches G.*

Nom	Revêtement	PMT (mm)	CFL 40	CFL 60	CFL 90	VEP	Photographie
G0	Béton bitumineux souple (BBS) 0/10	0,91	0,56	0,43	0,29	63,3	
G1	BBS 0/10 et peinture routière	0,68	0,31	0,24	0,14	44,2	

G2	BBS 0/10, peinture routière et micro-billes	0,75	0,53	0,38	0,24	67,1	
G3	BBS 0/10, peinture routière, micro-billes et grains de verre	0,61	0,47	0,37	0,19	–	

2.2 Appareils et protocoles de mesure

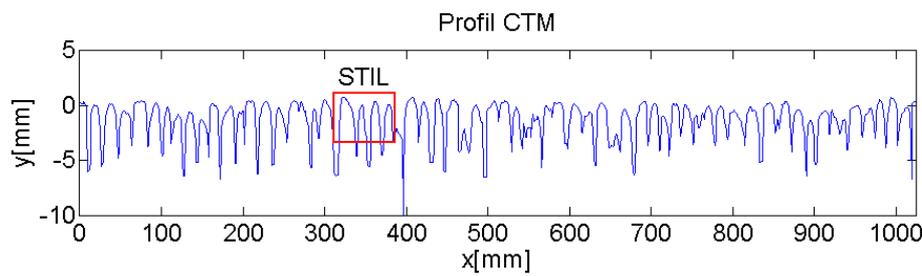
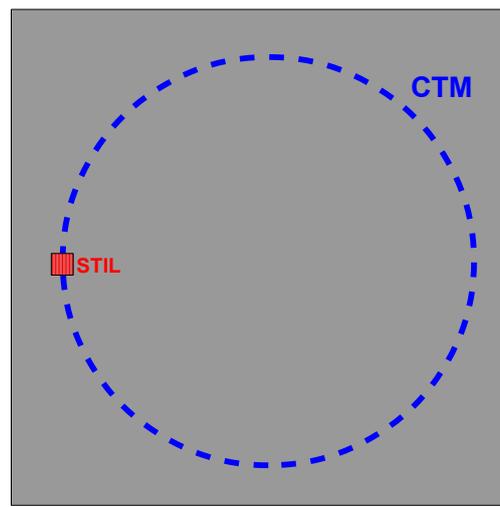
2.2.1 Mesurages de la texture

Pour la mesure de la macrotecture, une mesure CTM est réalisée au centre de l'échantillon. Le rayon du bras de mesure du CTM est le même que la distance séparant un patin de gomme du DFT du centre de rotation de l'appareil. Cela permet donc de récupérer le profil de macrotecture sur lequel a été effectuée la mesure de frottement avec le DFT.

La mesure de microtexture est quant à elle réalisée avec le capteur optique STIL. Les paramètres de mesure sont définis afin d'obtenir le maximum de précision possible de la part de l'appareil :

- nombre de profils : 15 ;
- longueur du profil : 76 mm ;
- pas de mesure : 10 μm ;
- espacement entre les profils : 500 μm .

Les profils STIL sont, comme pour les profils CTM, relevés dans la trace du passage des patins DFT. La figure 2.9 illustre le rapport d'échelle existant entre les profils obtenus avec les deux appareils.

(a) *Vue de profil*(b) *Vue de dessus***Figure 2.9** — *Comparaison des échelles STIL et CTM.*

2.2.2 Protocole de mouillage des surfaces

2.2.2.1 En laboratoire

Un protocole est mis au point afin d'obtenir plusieurs hauteurs d'eau dont les valeurs sont inférieures à 1 mm. Les appareils de mesure ponctuelle et optique de la hauteur d'eau n'étant pas adaptés aux mesures souhaitées, une méthode plus indirecte est utilisée pour évaluer la hauteur d'eau présente sur la surface. La face supérieure des mosaïques est recouverte d'un cache dans lequel un disque de 345 mm de diamètre a été découpé afin de définir la zone à mouiller (figure 2.10). Un pulvérisateur manuel est utilisé pour mouiller la surface (figure 2.11). Avant et après chaque utilisation du pulvérisateur, celui-ci est pesé afin de connaître la quantité d'eau déposée sur la surface (figure 2.12). Afin de proposer une mesure de hauteur d'eau exprimée en millimètres, le volume d'eau pulvérisé est divisé par l'aire de la surface humidifiée. La valeur ainsi calculée est appelée *hauteur d'eau moyenne équivalente initiale* et représente la hauteur d'eau théorique obtenue sur une surface parfaitement lisse de même aire. Le terme *initiale* précise que cette valeur peut être modifiée lorsqu'un essai de frottement est effectué sur la surface. La *hauteur d'eau moyenne équivalente initiale* sera également appelée par la suite *hauteur d'eau* par

souci de simplicité.



Figure 2.10 — Échantillon de mosaïque préparé pour les essais.



Figure 2.11 — Pulvérisation de l'eau sur un échantillon.



Figure 2.12 — *Pesée du pulvérisateur avec une balance de précision.*

La précision de la balance est de 0,01 g ce qui correspond à 0,11 μm de hauteur d'eau sur la surface.

2.2.2.2 *In situ*

Sur la piste de l'Ifsttar, le mouillage des revêtements a été réalisé à l'aide du dispositif de mouillage de la chaussée intégré à l'ADHERA. La hauteur d'eau est définie par le réglage du débit du système. La vitesse du véhicule a été fixée à 90 km/h afin de pouvoir obtenir de très faibles hauteurs d'eau avec le débit le plus faible disponible. Les valeurs utilisées sont décrites dans le tableau suivant :

Tableau 2.6 — *Correspondance entre les débits et les hauteurs d'eau à 90 km/h.*

Débit [L/s]	Hauteur d'eau théorique [mm]
0,6	0,1
1,4	0,25
2,4	0,5
3,7	0,75
5	1
7,4	1,5

2.2.3 Protocoles de mesures du frottement

2.2.3.1 En laboratoire

Sur les échantillons de laboratoire, un appareil de mesure de frottement local est nécessaire. Afin de pouvoir étudier l'influence de la vitesse, l'appareil DFT est choisi. En fixant la vitesse de consigne à 80 km/h, cela permet d'analyser les courbes entre 20 et 60 km/h dans une plage de mesure stable. En effet, lorsque le disque du DFT entre en

contact avec la surface, il se produit des rebonds qui peuvent fausser les premières mesures (mesures à hautes vitesses). De plus, vers la fin du freinage, un phénomène de *stick-slip* apparaît. Ce phénomène crée un mouvement saccadé des patins de gomme à basse vitesse créant les oscillations illustrées figure 2.13. Sur cette figure, les résultats sont présentés avec une vitesse décroissante i.e. dans l'ordre chronologique de mesure de l'appareil DFT. La plage de mesure stable est cependant suffisante pour balayer des vitesses à la fois sensibles à la microtexture et à la macrotexture.

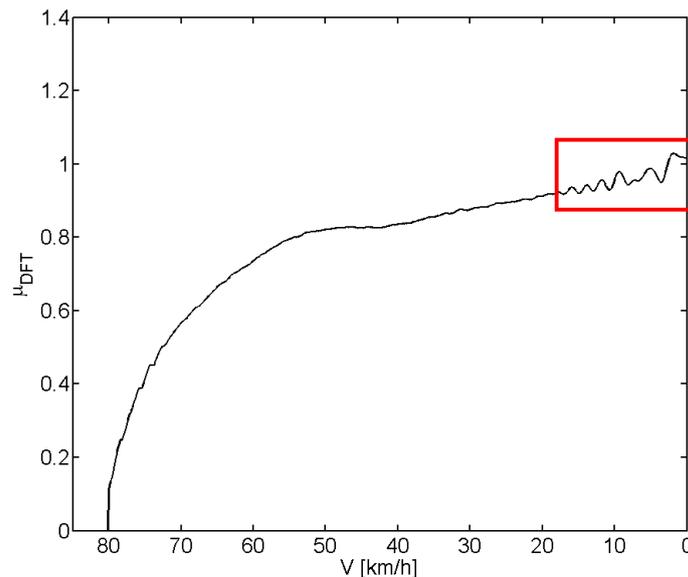


Figure 2.13 — Mise en évidence du phénomène de *stick-slip* sur une mesure DFT.

La procédure à respecter pour un échantillon est la suivante :

1. Montage de patins neufs ;
2. Mesure DFT sur une surface parfaitement sèche ;
3. Pesée initiale du pulvérisateur ;
4. Mouillage de la surface selon la figure 2.14 ;
5. Mesure de frottement avec la machine DFT ;
6. Pesée du pulvérisateur après mesure ;
7. Recommencer les étapes 4 à 6 (jusqu'à l'obtention de 12 valeurs de hauteurs d'eau) ;
8. Mesure DFT standard selon la norme ASTM.

Les pulvérisations sont réparties sur toute la surface (figure 2.14) afin d'obtenir un mouillage le plus uniforme possible. En répétant cette procédure de mouillage, 12 hauteurs d'eau bien réparties dont le maximum est d'environ 1 mm sont obtenues. Une partie de l'eau est parfois projetée sur la plaque de protection, en dehors de l'aire de mesure. Néanmoins, cette erreur est négligeable. En effet, dans le cas où 10% de la quantité d'eau des neuf pulvérisations est pulvérisé en dehors de la zone de mesure, l'erreur induite sur la hauteur d'eau est seulement de 7 μm .

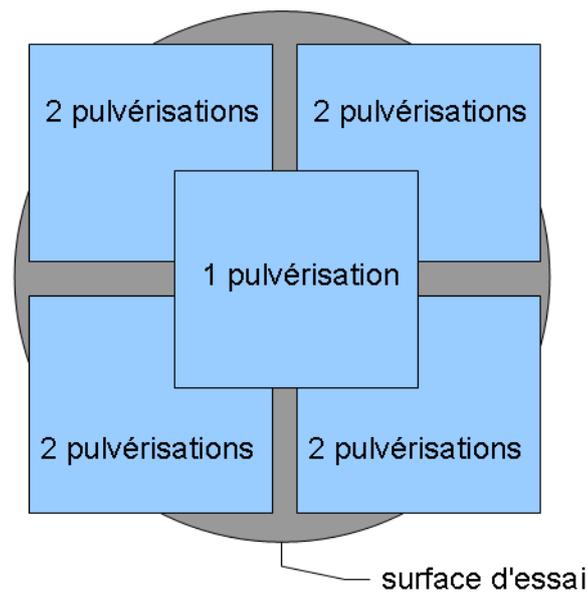


Figure 2.14 — Répartition schématique des zones pulvérisations sur la surface d'essai.

2.2.3.2 *In situ*

Une campagne expérimentale a été réalisée sur les pistes de l'Ifsttar (annexe B) à l'aide de l'ADHERA (figure 1.16).

Cet appareil est couramment utilisé pour la réception et le suivi des couches de roulement des chaussées. Il constitue une valeur standard de référence.

Les mesures ont été réalisées à 90 km/h. La roue de mesure est équipée d'un pneu lisse standard AIPCR.

Chapitre 3

Observations

Plan du chapitre

3.1	Variation du frottement en fonction de la hauteur d'eau . . .	54
3.1.1	Allure de la courbe frottement-hauteur d'eau	54
3.1.2	Influence de la microtexture	55
3.1.3	Influence de la macrotexture	55
3.1.4	Influence de la vitesse	57
3.2	Représentativité des résultats	59
3.3	Régimes de lubrification	60

Ce chapitre est consacré à l'observation de l'ensemble des résultats obtenus au cours des essais décrits au chapitre précédent. Ces observations permettent de faire le lien avec les travaux de la littérature afin de déterminer les outils à utiliser pour les analyses. Dans un premier temps, celles-ci sont réalisées à la fois sur les mosaïques et les enrobés (en laboratoire). Dans un second temps, les essais *in situ* sont exploités afin de s'assurer de la possibilité d'extrapoler les résultats obtenus en laboratoire au cas réel d'un pneu circulant sur une chaussée faiblement mouillée.

Les courbes de frottement en fonction de la hauteur d'eau sont étudiées afin d'apprécier les effets de la texture et de la vitesse, en dégagant des tendances. Ensuite, une analogie avec les régimes de lubrification permet de proposer une première explication aux phénomènes observés et ainsi amorcer une caractérisation mathématique qui sera développée au chapitre suivant.

3.1 Variation du frottement en fonction de la hauteur d'eau

3.1.1 Allure de la courbe frottement-hauteur d'eau

La variation du frottement en fonction de la hauteur d'eau montre trois phases (figure 3.1) :

- dans la phase 1, le frottement varie très peu par rapport à sa valeur sur surface sèche ;
- la phase 2 présente une grande décroissance de la valeur du coefficient de frottement ;
- dans la phase 3, le coefficient de frottement se stabilise autour de la valeur minimale de la phase précédente.

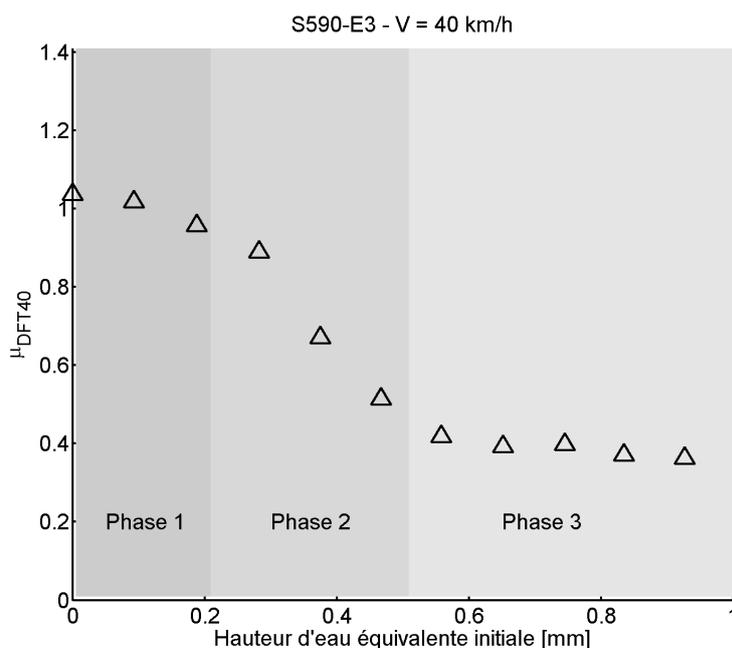


Figure 3.1 — Les trois phases du frottement faiblement lubrifié.

Cette évolution diffère des variations décrites dans la littérature où la phase 1 n'a pas été observée (Veith, 1983; Kulakowski et Harwood, 1990). La procédure adoptée dans le cadre de cette thèse a permis d'obtenir des hauteurs d'eau très faibles. La différence observée entre les résultats présentés ici et les résultats précédemment publiés peut être attribuée à cette procédure d'essai inédite. En effet, si trop d'eau est présente sur la surface, la phase 1 ne peut être observée et la décroissance est simplement exponentielle.

3.1.2 Influence de la microtexture

La figure 3.2 montre l'effet des sablages sur la courbe frottement/hauteur d'eau.

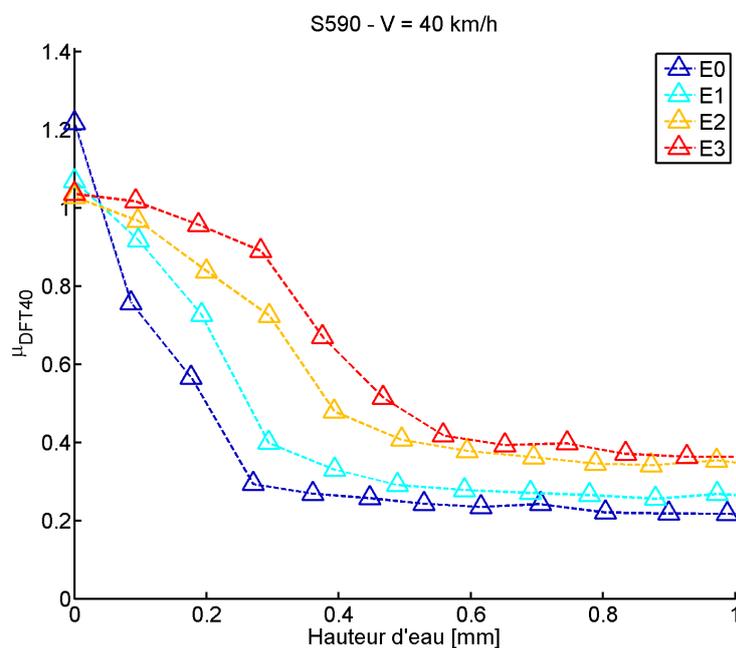


Figure 3.2 — Effet de l'abrasif de calibre 590 micromètres.

En l'absence d'eau sur la surface, la mosaïque non sablée (E0) présente un frottement plus élevé que les autres. La surface de la mosaïque étant plus lisse, l'aire réelle de contact entre le patin de gomme et les graviers est plus grande et favorise ainsi l'adhésion. Si l'apparition de microtexture diminue la valeur du coefficient de frottement sur surface sèche, le classement des coefficients est inversé dès la première série de pulvérisations, montrant l'importance de la microtexture sur le frottement faiblement lubrifié. De plus, lorsque la mosaïque n'est pas sablée, elle ne présente pas de phase 1. Celle-ci apparaît progressivement avec la création de microtexture.

3.1.3 Influence de la macrotexture

Les figures 3.3 à 3.5 présentent les résultats des essais de frottement DFT respectivement à 20, 40 et 60 km/h.

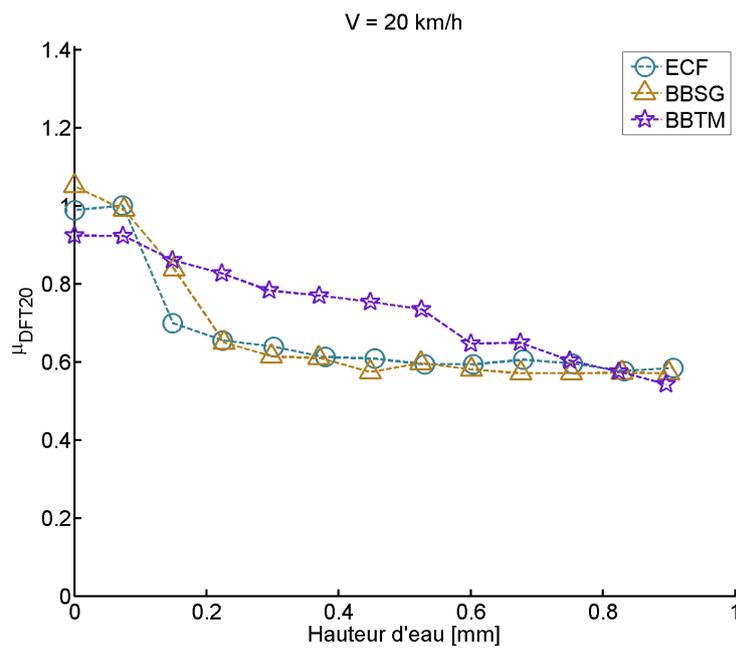


Figure 3.3 — Evolution du frottement *DFT* en fonction de la hauteur d'eau sur les échantillons en enrobés à 20 km/h.

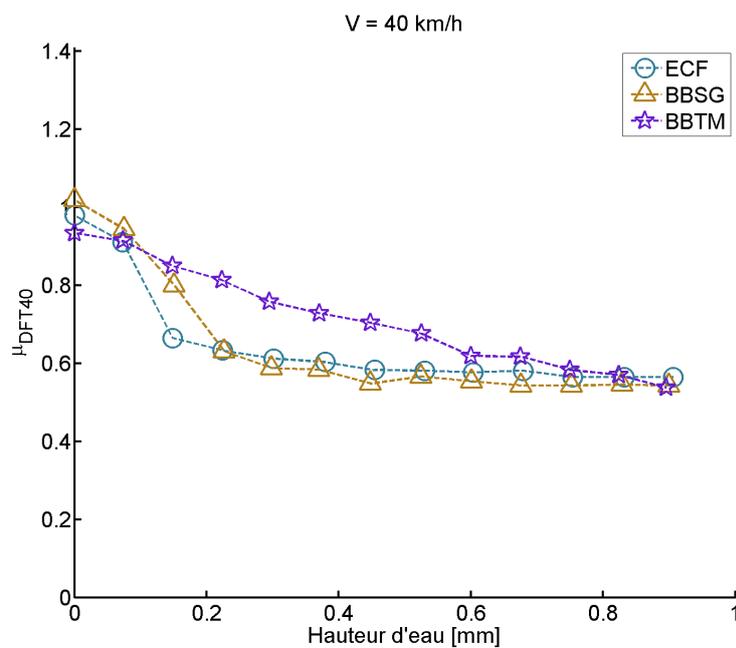


Figure 3.4 — Evolution du frottement *DFT* en fonction de la hauteur d'eau sur les échantillons en enrobés à 40 km/h.

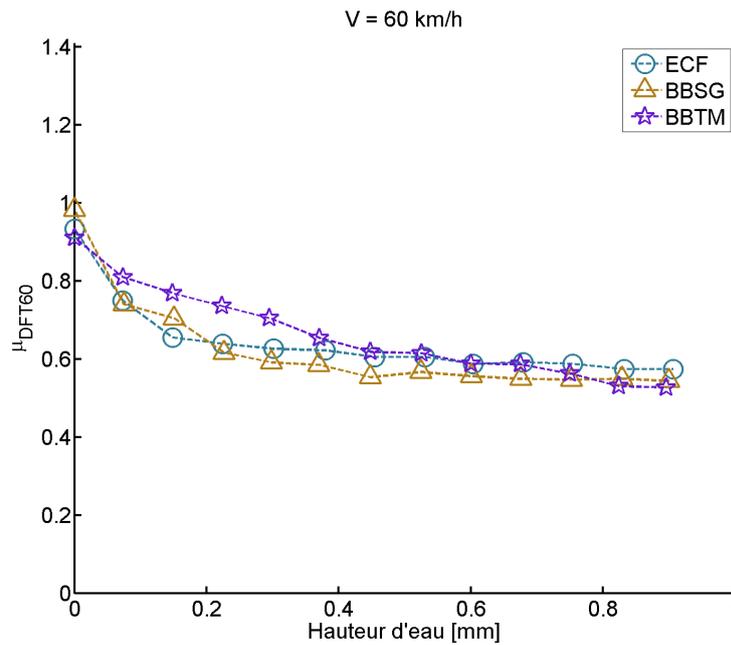


Figure 3.5 — Evolution du frottement DFT en fonction de la hauteur d'eau sur les échantillons en enrobés à 60 km/h.

Les résultats sont similaires pour les échantillons en BBSG et en ECF. L'échantillon en BBTM, qui a la plus grande macrotexture, est celui dont la vitesse de décroissance du frottement en fonction de la hauteur d'eau est la plus faible. Ce comportement est logique puisqu'il s'agit de l'échantillon dont la texture de la surface facilite le plus l'évacuation de l'eau. Si les courbes à 20 et 40 km/h ont un palier à l'origine, ce n'est pas le cas de la courbe à 60 km/h. A cette vitesse, le frottement décroît dès que la première quantité d'eau est pulvérisée à la surface.

3.1.4 Influence de la vitesse

A l'état initial, la courbe de variation du frottement en fonction de la hauteur d'eau ne présente pas de phase 1 quelle que soit la vitesse (figure 3.6). La variation du coefficient de frottement avec la vitesse est négligeable au-dessus de 0,3 mm de hauteur d'eau. Cependant, pour des hauteurs d'eau plus faibles, si les valeurs sont à peu près les mêmes à 20 et 40 km/h, la décroissance est plus forte à 60 km/h.

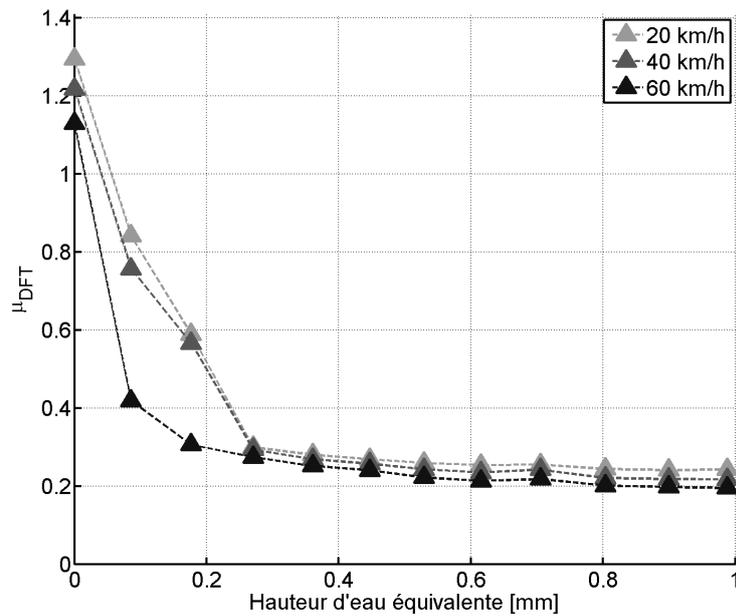


Figure 3.6 — *Effet de la vitesse sur la variation du frottement pour la mosaïque S590-E0.*

Lorsque la mosaïque est sablée, la phase 1 apparaît mais les résultats restent semblables (figure 3.7). Les mesures sont proches à 20 et 40 km/h mais le coefficient de frottement est sensiblement plus faible à 60 km/h.

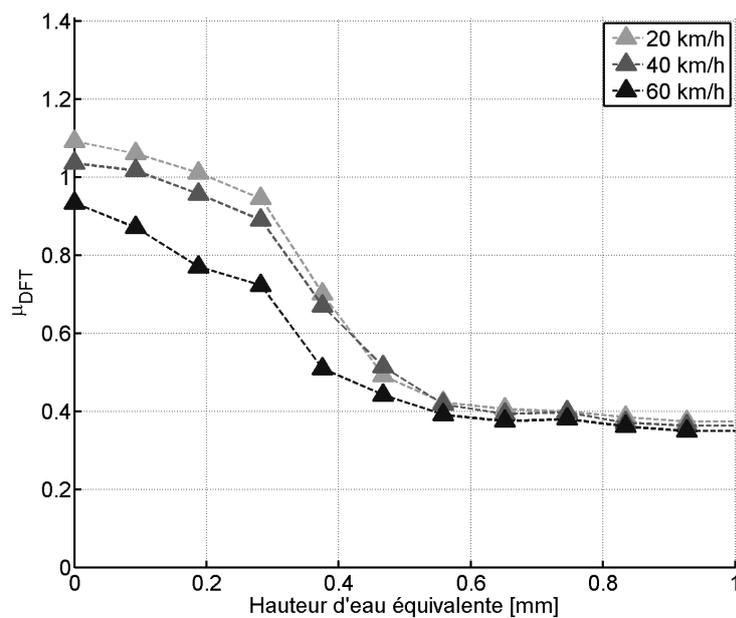


Figure 3.7 — *Effet de la vitesse sur la variation du frottement pour la mosaïque S590-E3.*

3.2 Représentativité des résultats

Afin de savoir si les observations faites en laboratoire sont également vraies dans des conditions réelles, les résultats des essais ADHERA sont également observés, le comportement de la remorque de l'ADHERA étant proche de celui d'un quart de véhicule. La figure 3.8 présente les résultats obtenus sur les planches en enrobés de la piste.

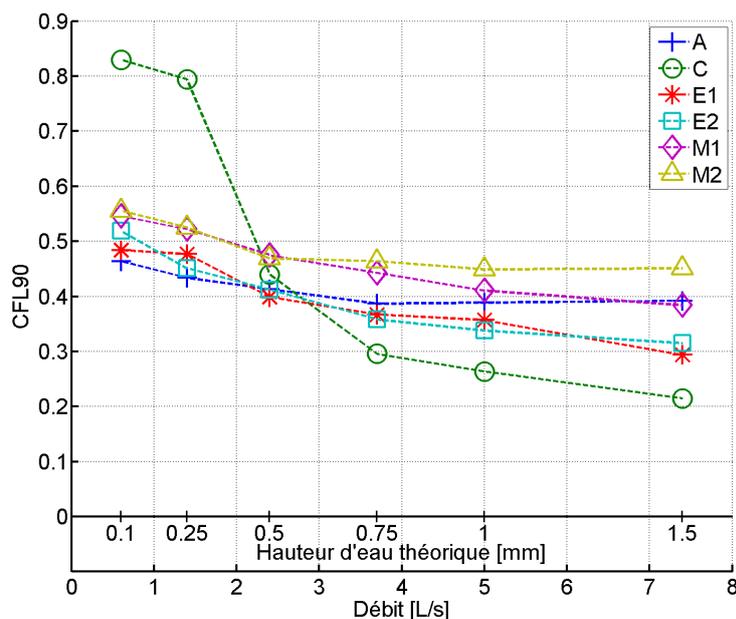


Figure 3.8 — Evolution du CFL en fonction de la hauteur d'eau sur les enrobés bitumineux de la piste à 90 km/h.

Il est très difficile de retrouver les trois phases observées en laboratoire dans les conditions d'essais en extérieur. Deux courbes seulement présentent une phase 1 : la C, essais réalisés sur un enduit superficiel et la E1, BBSG.

Il est intéressant de noter que la courbe de l'enduit superficiel présente la plus grande variation de frottement avec la hauteur d'eau et qu'il s'agit du revêtement possédant la plus faible PMT, faible macrotexture, mais également la VEP la plus élevée, forte microtexture.

La figure 3.9 présente les essais ADHERA réalisés sur les planches G. La figure montre une forte décroissance du frottement avec l'ajout de peinture routière sur la surface de la chaussée (courbes G0 et G1). L'ajout de microbilles et de grains de verre (G2 et G3) réduit la décroissance du frottement entre 0,1 et 0,25 mm de hauteur d'eau théorique, créant l'apparition de la phase 1.

Les observations sur piste viennent confirmer ce qui a été observé en laboratoire sur les sablages de la mosaïque (figure 3.2) : l'apparition de la phase 1 de la courbe frottement-hauteur d'eau nécessite une certaine quantité de microtexture.

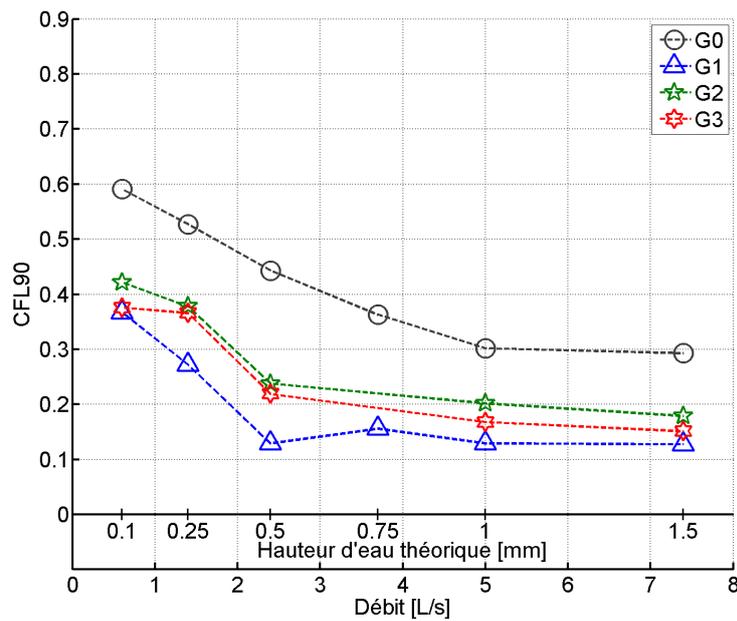


Figure 3.9 — Evolution du CFL en fonction de la hauteur d'eau sur les planches G de la piste à 90 km/h.

3.3 Régimes de lubrification

Les trois phases et la forme en "S inversé" des courbes obtenues rappellent fortement la courbe de Stribeck (Schipper, 1955) qui explique le frottement de deux surfaces en contact séparées par un film de lubrifiant (figure 3.10). Cette courbe relie la vitesse de glissement V , la viscosité du fluide η et la pression de contact p , en utilisant le nombre $\frac{V\eta}{p}$ au coefficient de frottement.

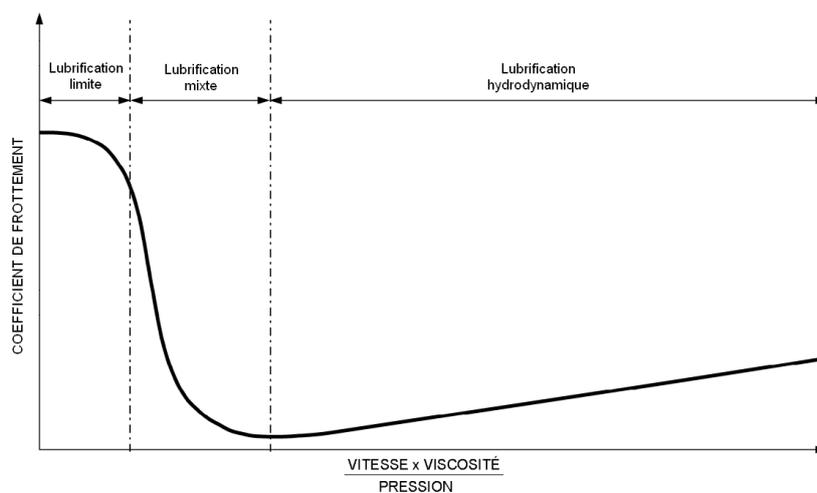


Figure 3.10 — La courbe de Stribeck.

En s'appuyant sur les analyses de Stribeck, trois régimes de lubrification peuvent être

identifiés : lubrification limite, lubrification mixte et lubrification hydrodynamique.

- Dans le premier régime, le contact est direct entre les deux corps sur la majorité de l'aire de contact mais, par la présence du lubrifiant même à très faible épaisseur, des liaisons moléculaires ne sont pas développées. Les deux sont en contact par les microrugosités de leurs surfaces et les effets hydrodynamiques du lubrifiant n'influencent pas significativement les caractéristiques du contact.
- En lubrification hydrodynamique, le lubrifiant sépare complètement les deux corps et seules les propriétés du fluide déterminent le coefficient de frottement.
- Le régime de transition, appelé régime de lubrification mixte, est un mélange des deux autres régimes. Une partie du contact entre les deux surfaces est directe et l'autre partie est supportée par le lubrifiant.

Dans le cas des essais réalisés, la vitesse de glissement et la charge verticale appliquée aux patins de gomme ainsi que la viscosité de l'eau ne permettent pas la lubrification hydrodynamique. On retrouve cependant les deux premiers régimes.

Chapitre 4

Analyse des courbes frottement-hauteur d'eau

Plan du chapitre

4.1	Caractérisation mathématique de la courbe frottement/hauteur d'eau	65
4.1.1	Proposition d'un modèle empirique	65
4.1.2	Correspondance avec le modèle de Kulakowski	65
4.1.3	Qualité de l'ajustement du modèle	65
4.1.4	Signification des coefficients du modèle	67
4.2	Définition de la hauteur d'eau critique	69
4.2.1	Calcul de la hauteur d'eau critique	69
4.2.2	Relation entre la hauteur d'eau critique et les coefficients du modèle	70
4.3	Analyse de l'influence des conditions de contact	72
4.3.1	Influence de la microtexture	72
4.3.1.1	Extraction de la microtexture à partir des profils relevés sur les échantillons	72
4.3.1.2	Caractérisation des profils de microtexture extraits	75
4.3.1.3	Analyse de l'influence de l'amplitude des rugosités	78
4.3.2	Influence de la vitesse	79
4.3.3	Influence combinée des paramètres d'indenteurs et de la vitesse	80

Le chapitre précédent a mis en lumière des tendances de variation des courbes frottement-hauteur d'eau et a permis l'observation de plusieurs régimes de lubrification.

Ce chapitre débute par une caractérisation mathématique des courbes afin de définir un indicateur relié à la hauteur d'eau et parfaitement adapté aux films minces sur chaussée. Cet indicateur sera appelé *hauteur d'eau critique* et sera défini comme la hauteur d'eau à la frontière entre le régime de lubrification limite et le régime mixte, à l'endroit où la chute d'adhérence est la plus prononcée.

Ensuite, une méthode est développée afin d'extraire et de caractériser uniquement la microtexture des échantillons en mosaïque afin de s'affranchir des effets de la macrotexture.

Finalement, les influences relatives de la vitesse et des paramètres de microtexture sur la variation du frottement sont quantifiées.

L'objectif de ce chapitre est la discrimination des paramètres essentiels à la modélisation physique du frottement sur une surface faiblement mouillée. Cette modélisation sera proposée au chapitre 5.

4.1 Caractérisation mathématique de la courbe frottement/hauteur d'eau

4.1.1 Proposition d'un modèle empirique

Les courbes d'évolution du frottement en fonction de la hauteur d'eau présentent toutes une forme similaire. Un modèle mathématique suivant la même évolution peut être ajusté sur ces courbes. La forme proposée est la suivante :

$$\mu = \Delta\mu \cdot e^{-\left(\frac{h}{h_0}\right)^a} + \mu_{EHL} \quad (4.1)$$

où :

- μ exprime le coefficient de frottement ;
- h représente la hauteur d'eau ;
- μ_{EHL} est la valeur finale du coefficient de frottement dans la phase 3 (EHL : *elastohydrodynamic lubrication*) ;
- $\Delta\mu$ est la différence entre la valeur du coefficient de frottement dans la phase 1 (μ_{BL} , BL : *boundary lubrication*) et sa valeur dans la phase 3 μ_{EHL} ;
- h_0 et a sont des constantes.

4.1.2 Correspondance avec le modèle de Kulakowski

Le modèle proposé par Kulakowski et Harwood (Kulakowski et Harwood, 1990) peut être retrouvé en attribuant la valeur unitaire à l'exposant a . D'autres valeurs de a permettent d'obtenir d'autres comportements qu'une décroissance exponentielle, reproduisant l'allure de la courbe lorsque des très faibles hauteurs d'eau sont prises en compte.

4.1.3 Qualité de l'ajustement du modèle

Le nouveau modèle empirique s'adapte globalement très bien aux résultats expérimentaux comme l'illustre la figure 4.1, et ceci, même lorsque la phase 1 n'apparaît pas comme le montre la figure 4.2. Ce résultat de qualité s'applique à toutes les séries de mesure sauf une : l'échantillon G800-E0, comme le montre le tableau 4.1. La forme de la courbe frottement/hauteur d'eau sur cet échantillon explique cela (figure 4.3). En effet, les oscillations de la courbe observées ne sont pas compatibles avec le modèle, qui est monotone. Ces oscillations peuvent être dues au phénomène de stick-slip se produisant en particulier entre des surfaces lisses faiblement lubrifiées lorsque la vitesse de glissement est faible.

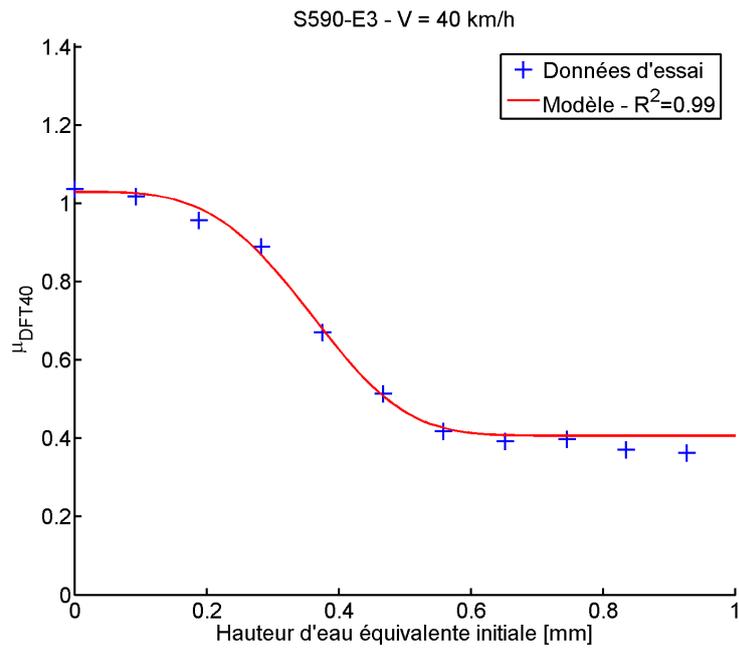


Figure 4.1 — Ajustement du modèle à l'évolution standard des données DFT.

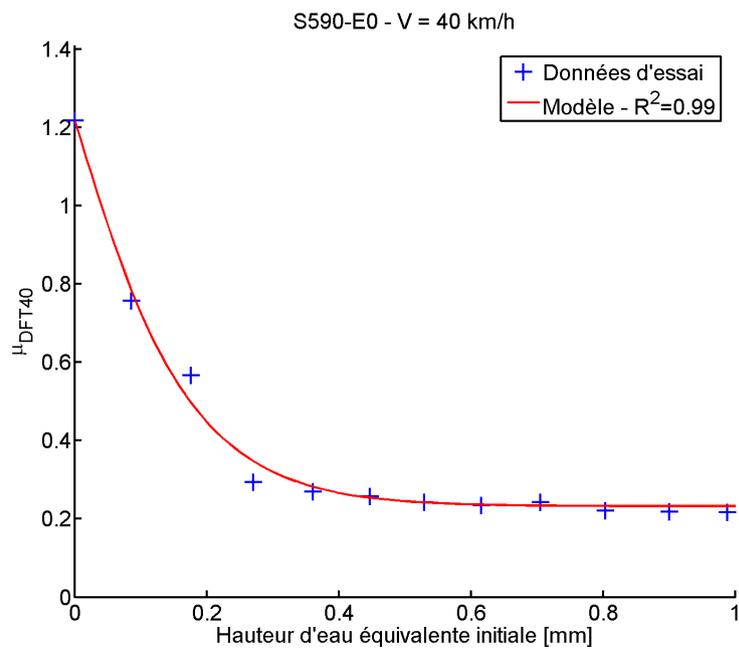


Figure 4.2 — Ajustement du modèle en l'absence de la phase 1.

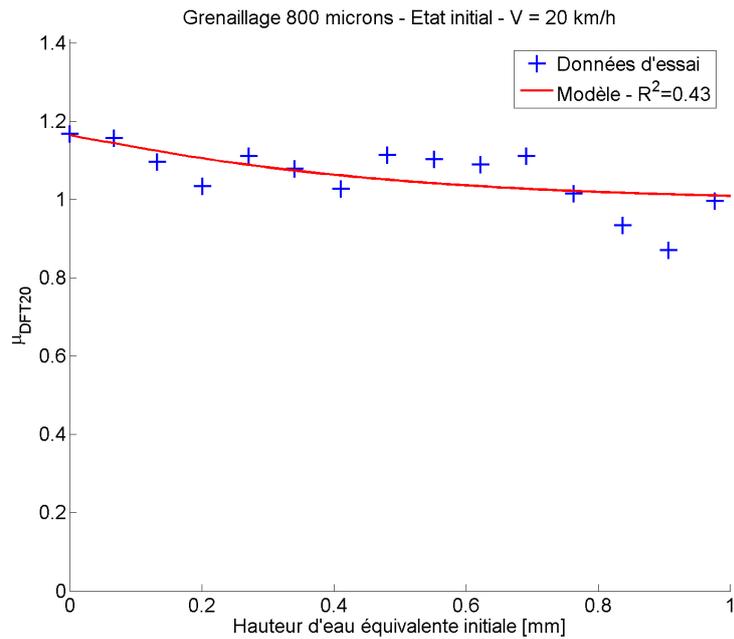


Figure 4.3 — Mise en évidence du problème d’ajustement du modèle sur l’échantillon G800-E0 à 20 km/h.

Tableau 4.1 — Coefficients de corrélation d’ajustement du modèle.

	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h
S400-E0	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97
S400-E1	0,87	0,82	0,88	0,91	0,92
S400-E2	0,76	0,81	0,90	0,93	0,96
S400-E3	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97
S590-E0	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
S590-E1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
S590-E2	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
S590-E3	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98
G800-E0	0,43	0,51	0,62	0,71	0,89
G800-E1	0,92	0,95	0,96	0,95	0,98
G800-E2	0,96	0,98	0,97	0,98	0,99
G800-E3	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98

4.1.4 Signification des coefficients du modèle

L’effet du paramètre a est illustré sur la figure 4.4. Lorsque $a = 1$ la décroissance du frottement est simplement exponentielle. Lorsque a augmente, la longueur de la phase 1 augmente et la vitesse de décroissance de la courbe augmente. Le paramètre h_0 influe sur la position du point d’inflexion de la courbe (figure 4.5). Lorsque h_0 augmente, la vitesse de décroissance du frottement diminue.

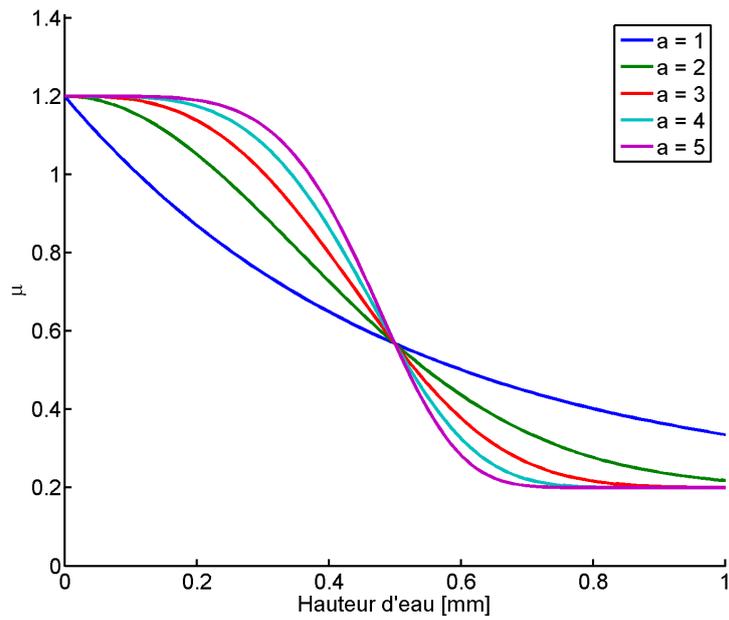


Figure 4.4 — Effet du paramètre a sur le modèle mathématique.

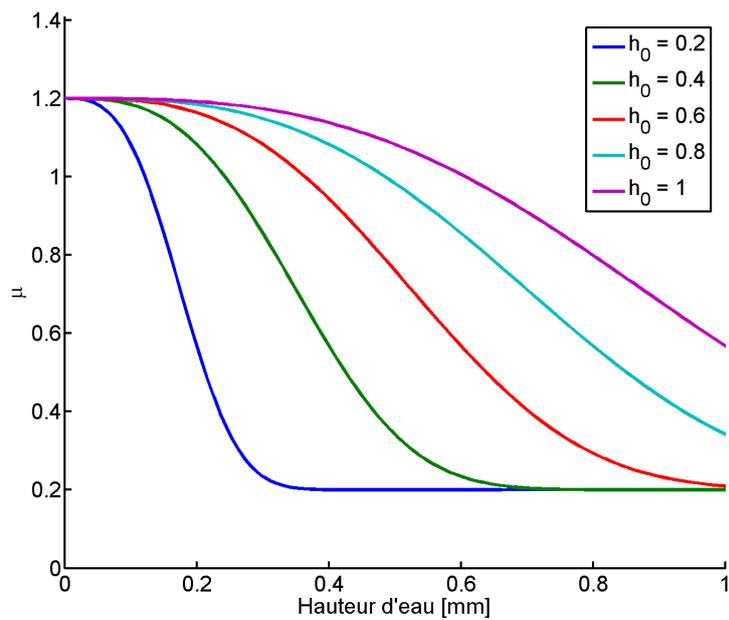


Figure 4.5 — Effet du paramètre h_0 sur le modèle mathématique.

4.2 Définition de la hauteur d'eau critique

4.2.1 Calcul de la hauteur d'eau critique

La courbe d'évolution du coefficient de frottement en fonction de la hauteur d'eau montre une chute importante dans sa seconde phase. La forme de cette courbe permet de définir une nouvelle grandeur caractérisant l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la hauteur qui sera appelée *hauteur d'eau critique*. Il s'agit de la hauteur d'eau à partir de laquelle le frottement décroît brutalement. Cette hauteur d'eau définit la limite entre la phase 1 et la phase 2. Cette hauteur d'eau est appelée *critique* car jusqu'à cette valeur, l'ajout d'eau sur la surface n'a que peu d'influence sur le frottement. Cependant, à partir de cette hauteur d'eau critique, la moindre quantité d'eau supplémentaire sur la surface fait chuter considérablement le niveau de frottement.

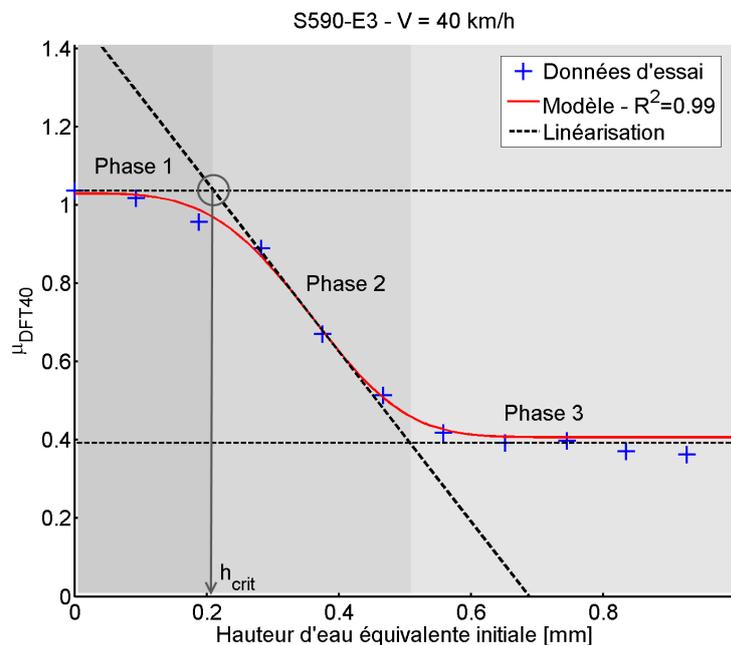


Figure 4.6 — Linéarisation du modèle et hauteur d'eau critique.

Pour calculer la hauteur d'eau critique, les trois phases du modèle sont linéarisées (figure 4.6) :

- la phase 1 où le niveau de frottement reste stable est représentée par une droite horizontale. Son ordonnée est la moyenne des points de la courbe ayant un écart relatif avec le coefficient de frottement sur surface sèche inférieur à la précision du DFT (0,04) ;
- la phase 2 est représentée par une droite oblique. Elle passe par le point d'inflexion (le point où s'opère le changement de concavité de la courbe) du modèle et son coefficient directeur est la valeur de la dérivée du modèle au point d'inflexion.
- la phase 3 est linéarisée par une droite horizontale d'une manière similaire à la phase 1. Son ordonnée est la moyenne des points de la courbe ayant un écart relatif avec le coefficient de frottement à hauteur d'eau maximale inférieur à la précision du DFT.

La hauteur d'eau critique est alors définie comme la hauteur d'eau du point d'intersection des phases 1 et 2.

4.2.2 Relation entre la hauteur d'eau critique et les coefficients du modèle

Cette hauteur d'eau critique est reliée à d'autres paramètres du modèle. Pour le montrer, le calcul du coefficient de corrélation de Spearman est utilisé.

Le **coefficient de corrélation de Spearman** est utilisé lorsque deux variables semblent corrélées sans que la relation entre elles soit affine. Le coefficient est calculé non pas entre les valeurs prises par les deux variables, mais entre les rangs de ces valeurs. Plus la valeur du coefficient de corrélation de Spearman est proche de 1 et plus la corrélation est forte.

La figure 4.7 montre que la valeur de la hauteur d'eau critique est fortement reliée à la hauteur d'eau du point d'inflexion de la courbe μ - h . Ceci explique que la vitesse de décroissance du frottement dans la zone 2 est plutôt constante.

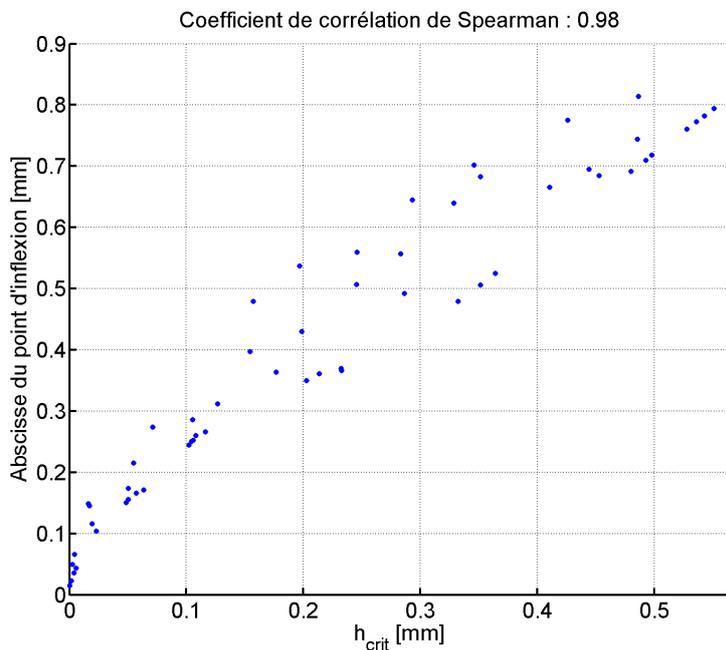


Figure 4.7 — Mise en évidence de la corrélation entre la hauteur d'eau critique et l'abscisse du point d'inflexion.

Il a été montré précédemment l'effet des deux paramètres mathématiques a et h_0 sur la hauteur d'eau critique. Les figures 4.8 et 4.9 confirment que ces valeurs sont très corrélées.

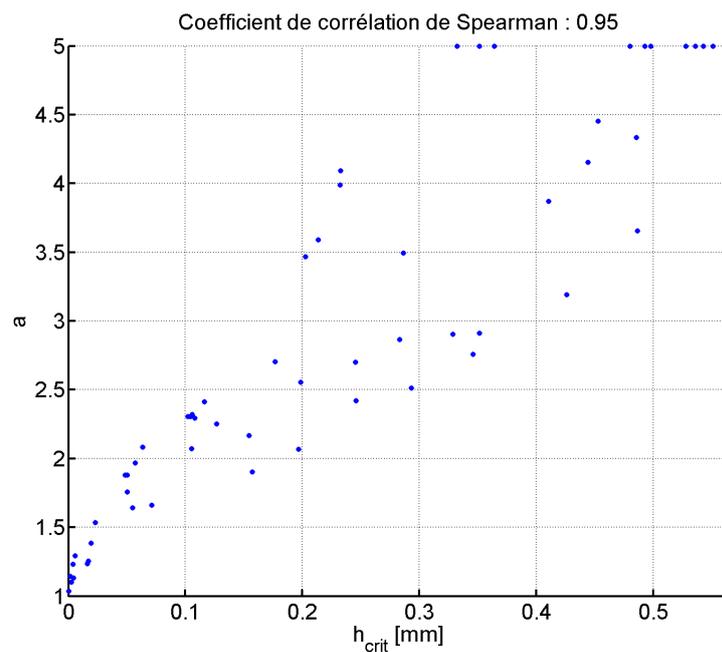


Figure 4.8 — Mise en évidence de la corrélation entre la hauteur d'eau critique et l'exposant a .

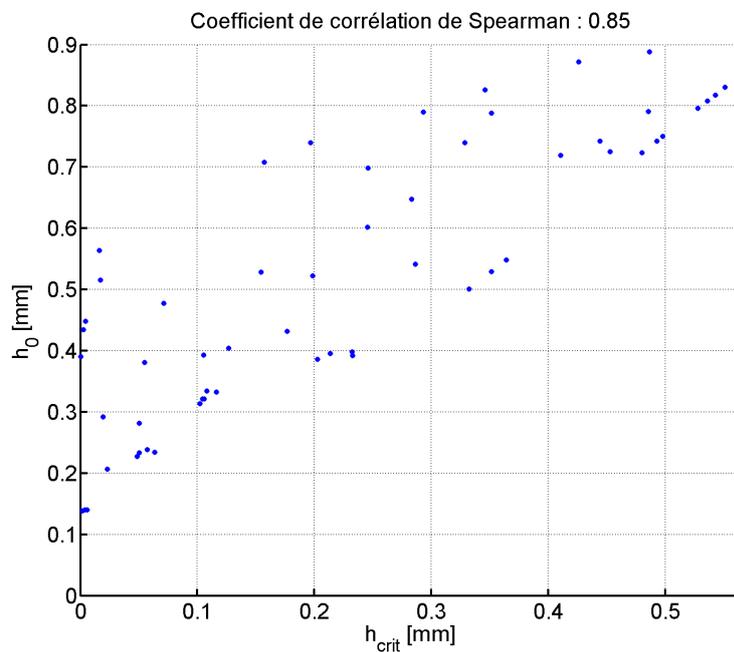


Figure 4.9 — Mise en évidence de la corrélation entre la hauteur d'eau critique et h_0 .

Ainsi, l'analyse des résultats d'essai présentée ci-après se concentre principalement sur les évolutions de la hauteur d'eau critique en fonction des différents paramètres du contact.

4.3 Analyse de l'influence des conditions de contact

4.3.1 Influence de la microtexture

4.3.1.1 Extraction de la microtexture à partir des profils relevés sur les échantillons

Deux méthodes ont été utilisées afin d'extraire la microtexture des profils STIL.

Première méthode. On extrait tout d'abord chaque granulat de chaque profil STIL. Le profil du granulat ainsi extrait est ensuite *lissé* par la méthode de la moyenne glissante. Pour chaque point x_k d'un profil, on remplace sa vraie amplitude sur le profil y_k par la valeur moyenne \bar{y}_k des amplitudes sur un échantillon de voisins proches. Le pas du STIL étant de 10 μm et celui du CTM 1 mm, soit un rapport de 100, on calcule la moyenne glissante à l'aide des amplitudes des 100 voisins par l'équation suivante :

$$\bar{y}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_{k-i} \quad (4.2)$$

où $N = 100$.

On obtient donc un profil *lissé* du granulat que l'on vient soustraire au profil réel pour obtenir le profil de microtexture présente sur le granulat. Les résultats de cette méthode ne seront pas présentés par la suite car le rapport d'échelle a été choisi approximativement, à partir des caractéristiques des appareils de mesure STIL et CTM. Une méthode prenant en compte les définitions des échelles de macrotexture et de microtexture a donc été utilisée.

Deuxième méthode. Afin d'analyser de quelle manière la microtexture a été modifiée par les sablages, les profils STIL sont analysés. Un profil STIL présente à la fois de la macrotexture et de la microtexture. De plus, selon les paramètres de précision de la mesure, les profils sont plus ou moins seuillés vers le bas ce qui ne rend pas absolu le zéro de la mesure. Le frottement des pains de gomme du DFT ayant essentiellement lieu aux sommets des granulats, une méthode d'extraction de la microtexture à ces endroits est proposée. Elle s'inspire des normes internationales sur les filtres à phase correcte utilisés pour le mesurage des profils de surface (AFNOR NF EN 11562). Un filtre de transmission de la composante du profil à longueur d'onde longue est utilisé pour *lisser*, d'une manière semblable à la première méthode, un profil STIL brut y . Le filtre est une fonction de pondération exponentielle utilisée sur la transformée de Fourier du profil $\mathcal{F}(y)$.

$$\bar{y} = \mathcal{F}^{-1} \left[\mathcal{F}(y) \times \left(1 - e^{-\frac{\alpha}{\lambda^2}} \right) \right] \quad (4.3)$$

où λ est la longueur d'onde et α un paramètre dépendant de la longueur d'onde de coupure λ_c du profil tel que :

$$\alpha = n^2 \ln(2) \quad (4.4)$$

avec :

$$n = \frac{\Delta x N}{\lambda_c} \quad (4.5)$$

où :

- Δx est le pas de mesure du profil STIL ;
- N est le nombre de point du profil ;
- λ_c est la fréquence de coupure du filtre.

L'équation 4.4 vient du fait que le filtre atténue de 50% la valeur de la transformée de Fourier pour $\lambda = \lambda_c$, c'est-à-dire :

$$1 - e^{-\frac{\alpha}{n^2}} = \frac{1}{2} \quad (4.6)$$

La figure 4.10 présente la caractéristique de transmission du filtre utilisé.

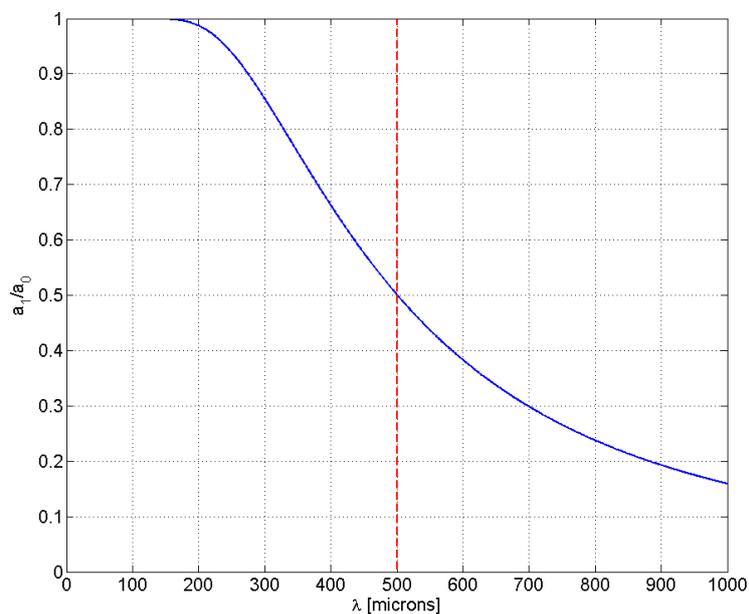


Figure 4.10 — *Caractéristique de transmission du filtre.*

Les figures 4.11 et 4.12 montrent un exemple de traitement de profil.

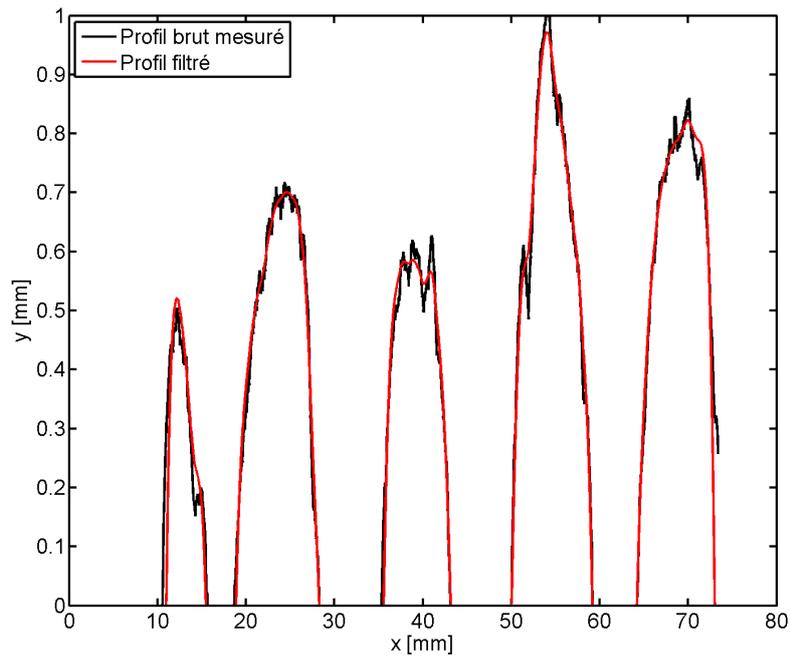


Figure 4.11 — Exemple de filtrage d'un profil STIL.

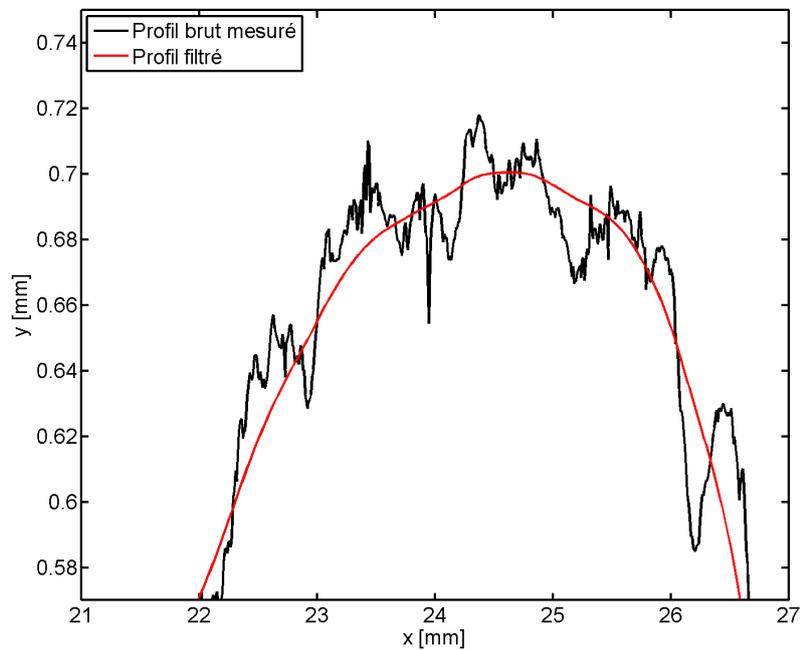


Figure 4.12 — Exemple de filtrage d'un profil STIL : zoom au sommet d'un granulat.

La microtexture est ensuite obtenue par différence entre le profil brut et le profil traité. La figure 4.13 montre un exemple de microtexture extraite. Elle est uniquement extraite au sommet des granulats pour éviter les effets de bord du filtrage. Pour chaque mosaïque,

quinze profils STIL ont été réalisés. Chacun de ces profils contient environ 5 granulats. Un profil de microtexture est alors extrait au sommet de chaque granulat.

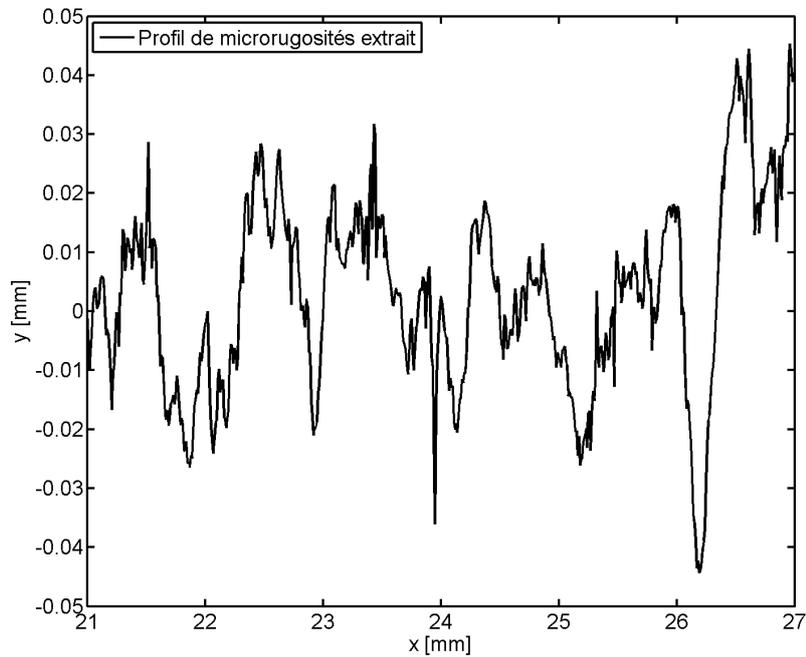


Figure 4.13 — Exemple de microtexture extraite d'un profil STIL.

4.3.1.2 Caractérisation des profils de microtexture extraits

Pour calculer les paramètres d'indenteurs, il est ensuite nécessaire de repérer les sommets et les vallées de chaque microaspérité du profil de microtexture. Au cours d'une première étape, tous les maxima et minima locaux du profil sont repérés. Un point est un maximum local si sa valeur est supérieure aux valeurs des points de son voisinage. Un sommet est défini comme étant un maximum local dont la différence de hauteur avec les deux minima locaux les plus proches ε est supérieure à un pas δ donné. Le même principe est appliqué aux minima locaux pour la définition d'une vallée. Ainsi, sur l'exemple de la figure 4.14, le premier maximum local n'est pas un sommet contrairement au second. Sur les profils STIL, le pas δ a été fixé à un dixième du pas longitudinal de mesure, c'est-à-dire, $1 \mu\text{m}$. La figure 4.15 montre un exemple de détection de sommets et de vallées.

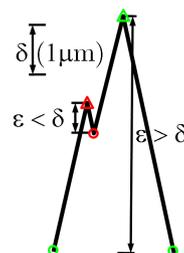


Figure 4.14 — Principe de recherche de sommets et de vallées.

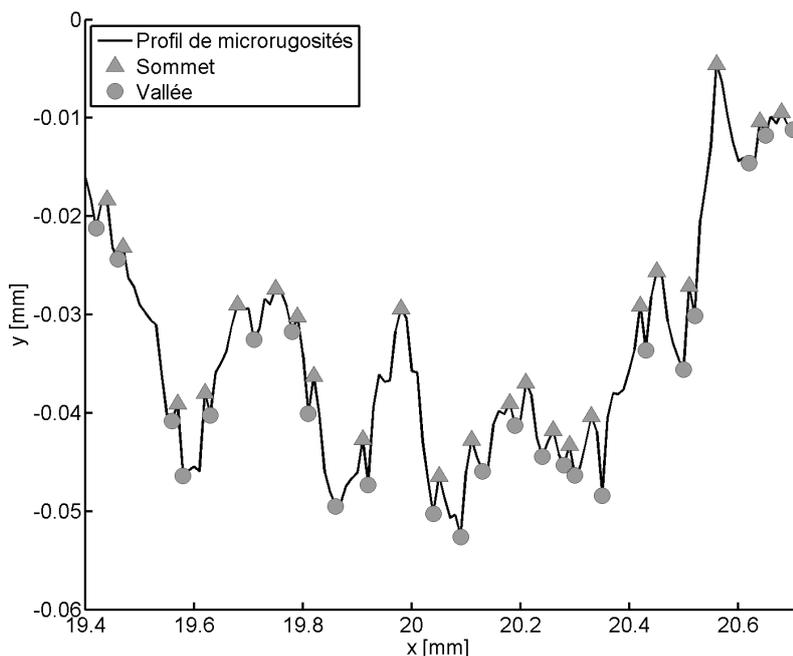


Figure 4.15 — Exemple de recherche de sommets et vallées.

Calcul des paramètres d'indenteurs

Une aspérité du profil est alors composée d'un sommet et de deux vallées adjacentes.

Les paramètres d'indenteurs présentés précédemment (section 1.1.3.3) sont calculés pour chaque mosaïque selon la deuxième méthode présentée et les résultats sont récapitulés dans le tableau 4.2. Il s'agit des valeurs moyennes calculées sur l'ensemble des indenteurs d'une mosaïque, détectées sur les profils de microrugosités extraits au sommet des granulats de l'échantillon.

Tableau 4.2 — Valeurs des paramètres d'indenteurs.

Mosaïque	R_q (μm)	α ($^\circ$)	$\cot(\alpha)$	θ ($^\circ$)	Densité (nb/mm)
S420-E0	4,34	76,08	1,28	3,99	17,82
S420-E1	5,58	75,24	1,30	4,44	15,66
S420-E2	5,90	74,24	1,32	4,88	16,56
S420-E3	5,63	74,88	1,31	4,73	16,52
S590-E0	4,22	74,30	1,32	4,57	19,46
S590-E1	5,33	75,82	1,28	4,63	16,01
S590-E2	5,93	75,56	1,29	4,87	14,96
S590-E3	6,01	76,04	1,28	4,83	14,41
G800-E0	3,52	75,42	1,29	3,65	19,89
G800-E1	5,96	73,98	1,33	5,45	17,21
G800-E2	6,39	73,96	1,33	5,49	16,51
G800-E3	6,40	74,56	1,31	5,31	15,98

On peut ainsi remarquer que l'évolution des valeurs n'est pas forcément monotone avec

le nombre de sablages, comme sur la mosaïque S420. De plus, l'amplitude de variation des paramètres reste faible.

Certains de ces paramètres sont fortement corrélés comme l'amplitude des microrugosités R_q avec le relief θ (figure 4.16) ainsi que la densité d'indenteurs (figure 4.17). Ces évolutions sont liées à la méthode de sablage permettant de faire évoluer la microtexture. Ainsi les chocs des particules d'abrasif avec les graviers de la mosaïque augmentent la taille des microrugosités mais également leur largeur, faisant diminuer par conséquent la densité d'indenteurs. De plus, la modification de la microtexture des granulats se produit de manière aléatoire augmentant ainsi le relief entre les sommets des microrugosités.

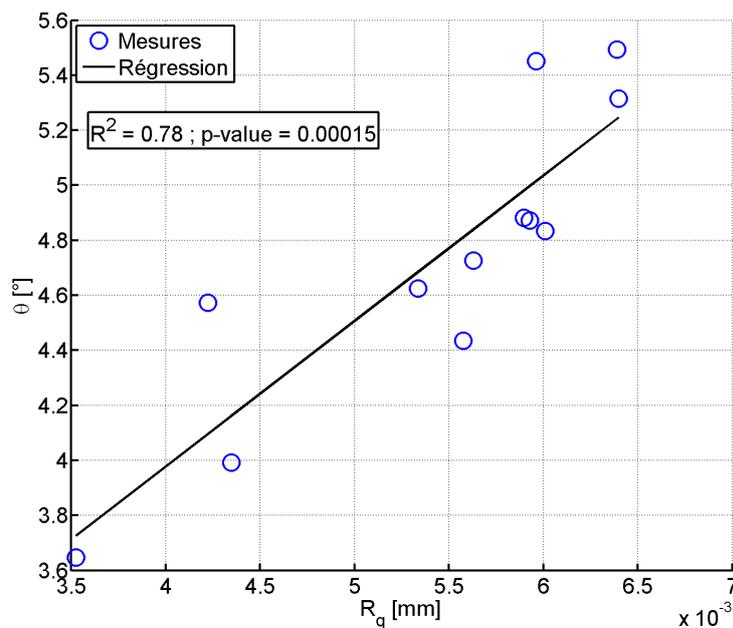


Figure 4.16 — Evolution du relief de microtexture en fonction de l'amplitude des indenteurs.

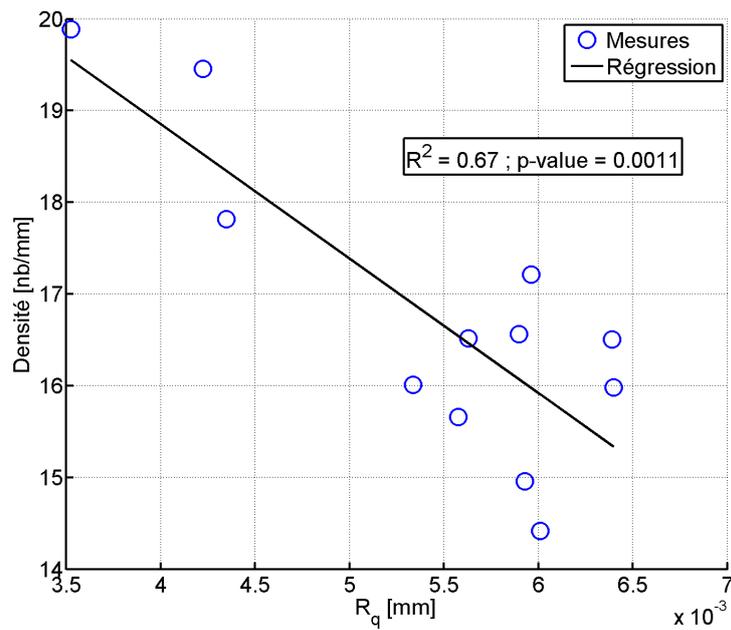


Figure 4.17 — Evolution du relief de microtexture en fonction de la densité d'indenteurs.

Dans les sections suivantes, les influences des paramètres de microtexture indépendants (R_q , α) sont étudiées. Les résultats concernant le relief et la densité d'indenteurs sont similaires à ceux obtenus avec l'étude de l'amplitude des rugosités, étant donné la relation existant entre eux.

4.3.1.3 Analyse de l'influence de l'amplitude des rugosités

La figure 4.18 met en évidence deux comportements très différents de l'évolution du coefficient de frottement en fonction de l'amplitude des rugosités R_q .

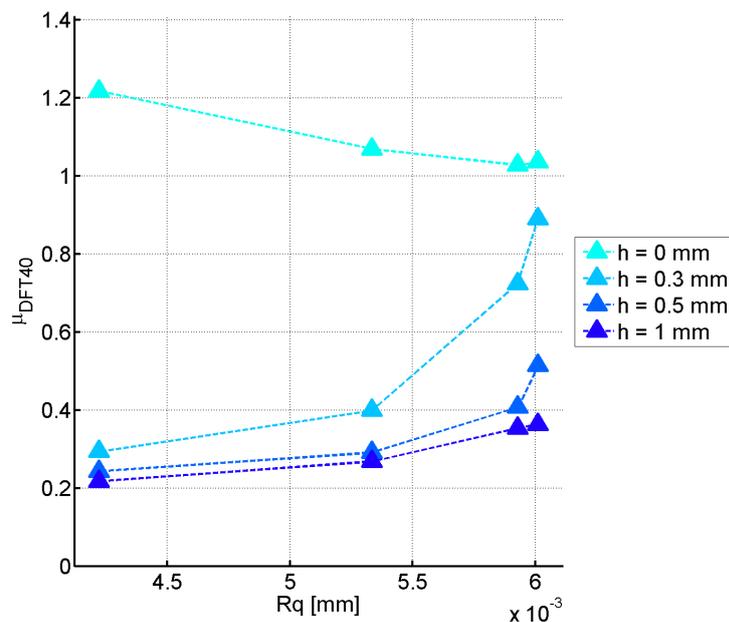


Figure 4.18 — Effet de la microtexture sur le frottement à 40 km/h sur l'échantillon S590.

Dans le cas d'un contact sec, le coefficient de frottement diminue lorsque R_q augmente. Ceci s'explique par la diminution de la surface de contact entre le patin et les granulats au fur et à mesure de l'évolution de la géométrie de ceux-ci. Ainsi, plus l'amplitude des microrugosités de la mosaïque est élevée plus la part de frottement due à l'adhésion est réduite et donc plus le coefficient de frottement global est faible.

Dans le cas d'un contact lubrifié, la figure 4.18 permet de faire plusieurs remarques. Tout d'abord, la valeur du coefficient de frottement est plus faible que dans le cas d'un contact sec, et ce, quelle que soit la valeur de R_q . Ensuite, l'augmentation de l'amplitude des rugosités n'a pas le même effet que précédemment sur le coefficient de frottement : celui-ci a tendance à augmenter avec R_q . Deux cas se dégagent alors : lorsque la quantité d'eau est importante (1 mm) et lorsque celle-ci est plus faible. Dans le premier cas, l'augmentation de l'amplitude des rugosités ne suffit pas à faire augmenter sensiblement le coefficient de frottement et celui-ci conserve une valeur relativement faible. En revanche, lorsque le film d'eau est très mince, une augmentation d'environ $2 \mu\text{m}$ de l'amplitude de la microtexture permet d'obtenir un coefficient de frottement 2 à 3 fois plus élevé dont la valeur se rapproche de celle sur surface sèche.

Ces observations permettent de confirmer l'hypothèse que la microtexture d'une chaussée a pour rôle de percer le film d'eau et ainsi d'empêcher la présence d'un film continu à l'interface. Cela permet de retrouver un contact sec à petite échelle et ainsi d'augmenter significativement le coefficient de frottement.

4.3.2 Influence de la vitesse

Au cours des essais, les paramètres du contact sont fixés, sauf la vitesse.

La figure 4.19 présente l'évolution du frottement DFT en fonction de la vitesse et de la

hauteur d'eau sur la mosaïque S590-E3. Cette figure montre une évolution typique de cette courbe. On observe que plus la hauteur d'eau augmente, moins la vitesse a d'importance. En effet, dans la phase 1 et 2, le frottement décroît avec la vitesse alors qu'il ne varie que très peu dans la phase 3. Ce phénomène est confirmé par les valeurs de μ_F . En ce qui concerne la hauteur d'eau critique, sa valeur ne décroît pas avant que la vitesse ne soit supérieure à 50 km/h.

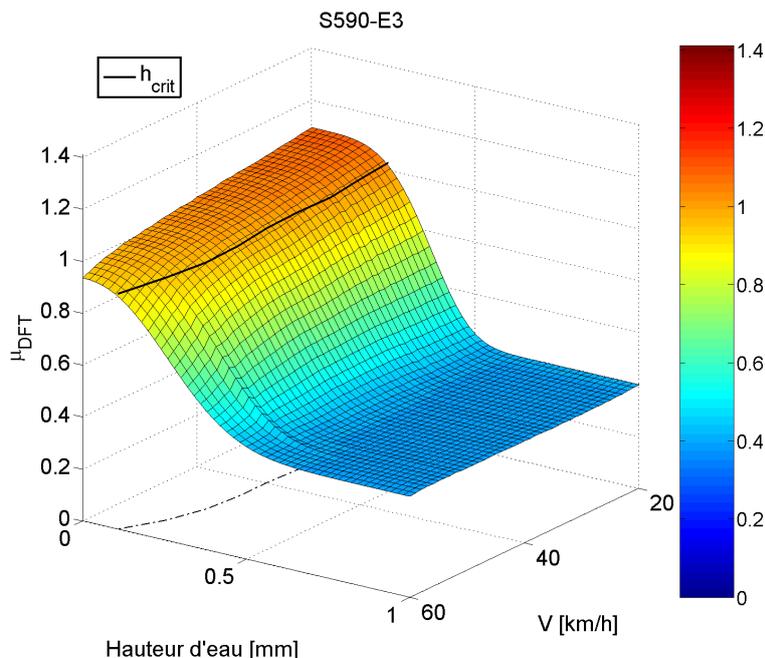


Figure 4.19 — Evolution du frottement *DFT* en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la mosaïque S590-E3.

	$\Delta\mu$	μ_F	h_0	a	h_{crit}
S590-E3 - 20 km/h	0,7	0,4	0,39	4,09	4,09
S590-E3 - 30 km/h	0,67	0,39	0,4	3,99	3,99
S590-E3 - 40 km/h	0,64	0,39	0,4	3,59	3,59
S590-E3 - 50 km/h	0,61	0,39	0,39	3,47	3,47
S590-E3 - 60 km/h	0,55	0,39	0,33	2,29	2,29

Tableau 4.3 — Valeurs des coefficients du modèle. Echantillon : S590-E3.

Les autres résultats sont présentés en annexe.

4.3.3 Influence combinée des paramètres d'indenteurs et de la vitesse

L'influence de l'amplitude des indenteurs R_q sur la hauteur d'eau critique est représentée figure 4.20 à 60 km/h et figure 4.21 à 40 km/h.

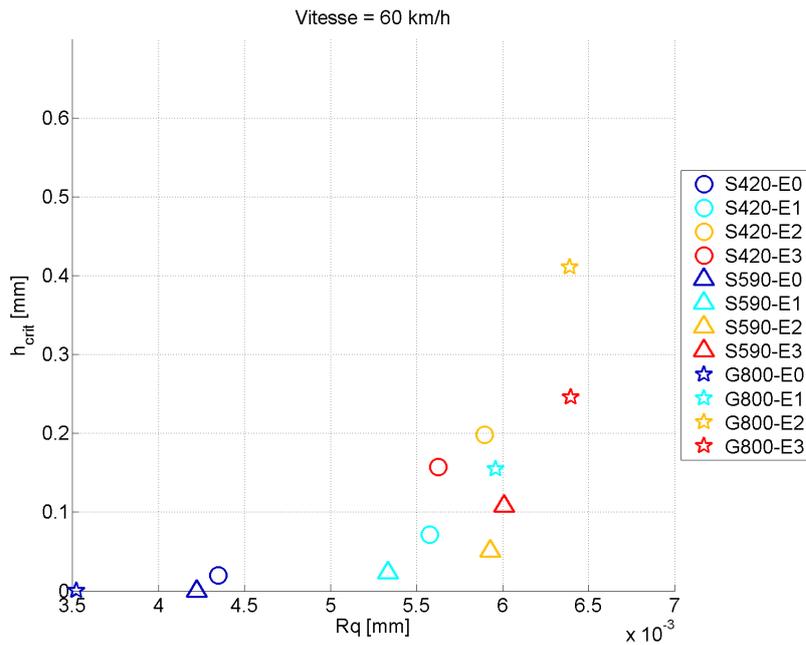


Figure 4.20 — Evolution de la hauteur d'eau critique en fonction de l'amplitude des indenteurs à 60 km/h.

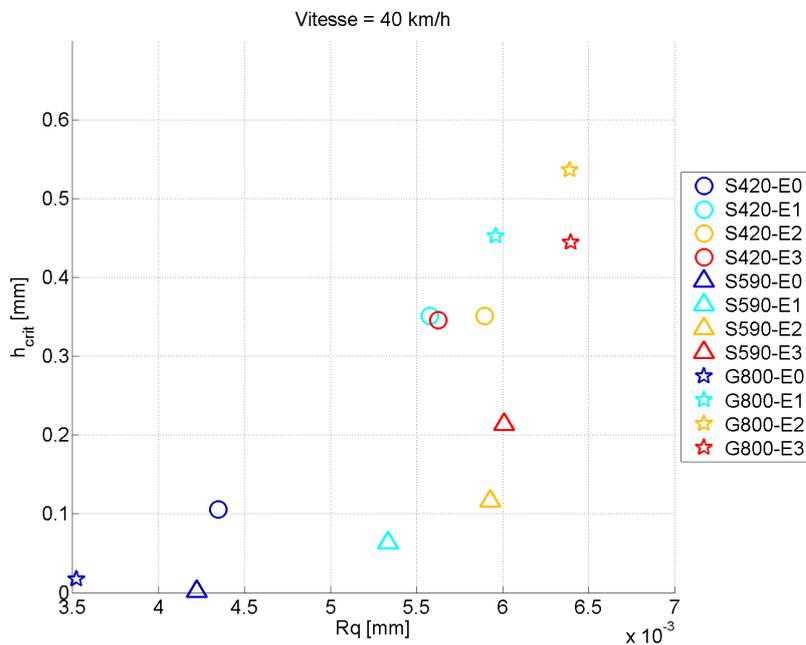


Figure 4.21 — Evolution de la hauteur d'eau critique en fonction de l'amplitude des indenteurs à 40 km/h.

Malgré la dispersion des données due aux conditions d'essai et aux très faibles valeurs des paramètres mesurés, des tendances d'évolution se dégagent : la hauteur d'eau critique augmente avec l'amplitude des microrugosités et diminue avec la vitesse. Afin de

la quantifier, l'évolution de la hauteur d'eau critique en fonction de la vitesse et de R_q est modélisée de la manière suivante :

$$h_{crit} = C_{R_q} R_q^\gamma V^\delta \quad (4.7)$$

Les valeurs de γ et δ permettent d'estimer l'importance de R_q et de V vis-à-vis de la hauteur d'eau critique. A vitesse constante, la relation précédente devient :

$$h_{crit} = C_{R_q} R_q^\gamma \quad (4.8)$$

Une régression linéaire des valeurs étudiées permet de trouver γ qui est alors le coefficient directeur de la régression :

$$\ln(h_{crit}) = \gamma \ln(R_q) + K_{R_q} \quad (4.9)$$

Une régression robuste a été utilisée afin de ne pas prendre en compte de valeurs aberrantes. Un exemple d'ajustement, pour une vitesse d'essai de 60 km/h, est montré ci-après.

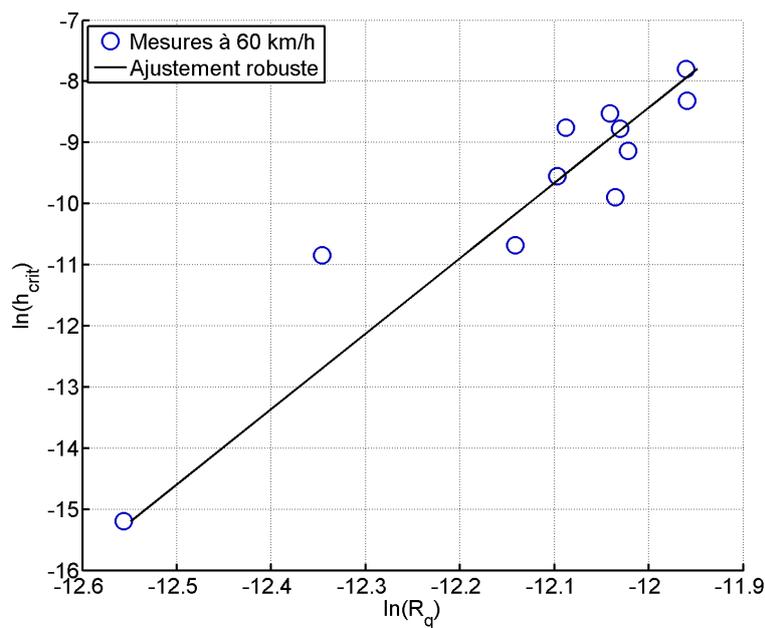


Figure 4.22 — Régression linéaire robuste entre l'amplitude des rugosités et la hauteur d'eau critique.

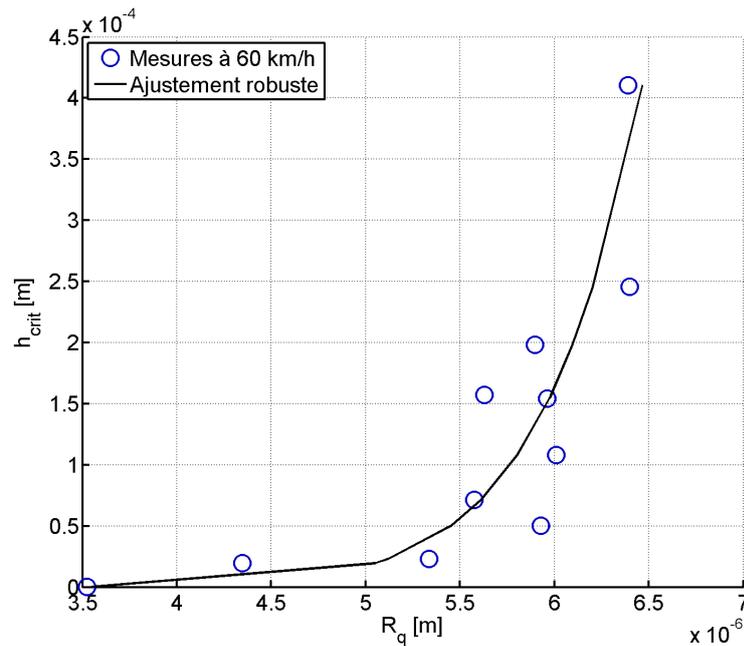


Figure 4.23 — Mise en évidence de la tendance d'évolution de la hauteur d'eau critique en fonction de l'amplitude des rugosités.

L'amplitude de variation des données est très faible et on ne peut pas considérer que la régression représente parfaitement le comportement observé. Néanmoins, les valeurs de γ obtenues permettent de connaître le poids exercé par l'amplitude de la microtexture sur l'évolution de la hauteur d'eau critique. Les résultats sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4.4 — Valeurs du paramètre γ .

V (km/h)	γ
20	11,47
30	10,93
40	15,53
50	6,33
60	12,34

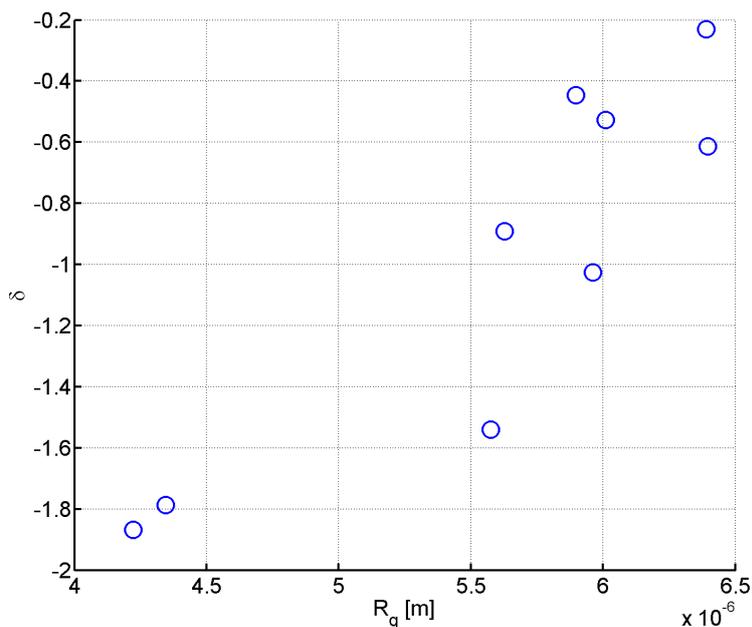
La même analyse a été effectuée pour δ . L'ajustement étant plus délicat, seuls les résultats dont le carré du coefficient de corrélation est supérieur à 0,3 sont retenus pour le tableau suivant.

Tableau 4.5 — Valeurs du paramètre δ .

R_q (μm)	δ
4,22	-1,87
4,35	-1,79
5,58	-1,54
5,63	-0,89
5,90	-0,45
5,96	-1,03
6,01	-0,53
6,39	-0,23
6,40	-0,61

Ainsi, ces résultats montrent que l'amplitude des microrugosités a une bien plus grande influence sur la valeur de la hauteur d'eau critique que la vitesse car la valeur de γ est largement supérieure à celle de δ .

De plus, la figure 4.24 montre qu'avec l'augmentation de l'amplitude de la microtexture la vitesse a de moins en moins d'effet sur la valeur de la hauteur d'eau critique.

Figure 4.24 — Evolution du paramètre δ en fonction de l'amplitude des rugosités.

La même étude a été réalisée sur l'évolution de la hauteur d'eau critique en fonction de la vitesse et du paramètre de forme des indenteurs α .

Un modèle similaire est proposé :

$$h_{crit} = C_{\alpha} \alpha^{\varepsilon} V^{\delta} \quad (4.10)$$

Les courbes suivantes montrent un exemple d'ajustement et les résultats sont récapitulés dans le tableau 4.6.

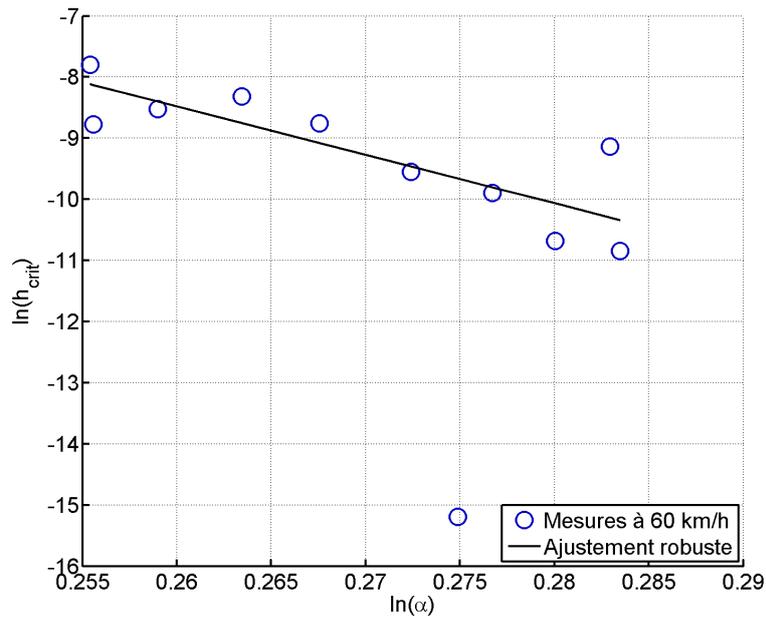


Figure 4.25 — Régression linéaire robuste entre la forme des rugosités et la hauteur d'eau critique.

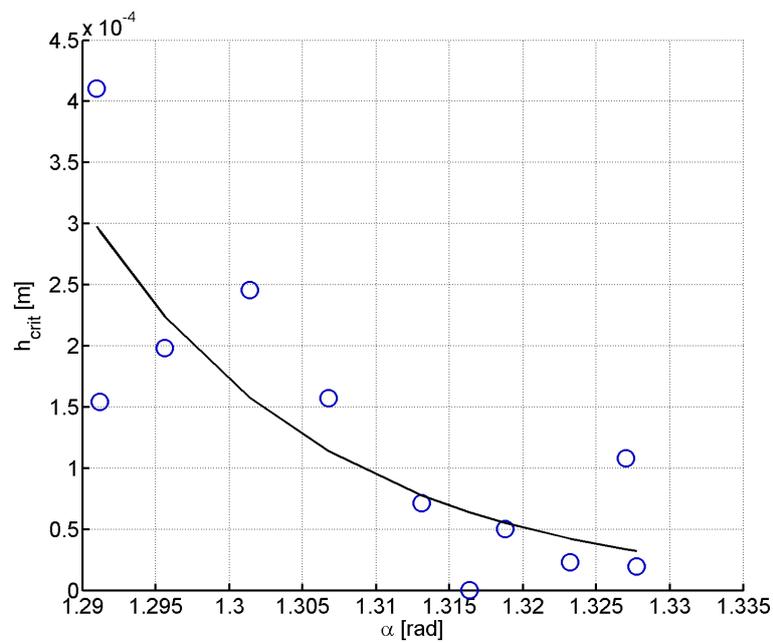
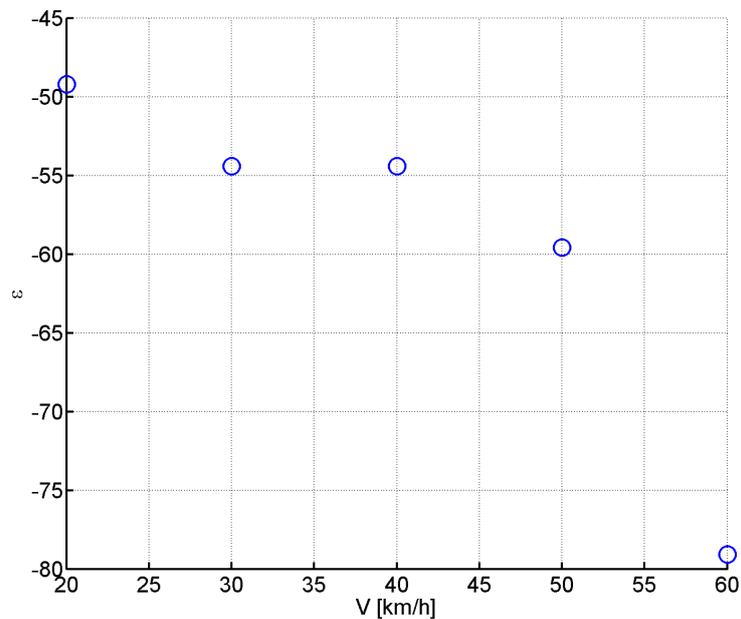


Figure 4.26 — Mise en évidence de la tendance d'évolution de la hauteur d'eau critique en fonction de la forme des indenteurs.

Tableau 4.6 — Valeurs du paramètre ε .

V (km/h)	ε
20	-49,21
30	-54,40
40	-54,40
50	-59,57
60	-79,08

Figure 4.27 — Evolution du paramètre ε en fonction de la vitesse.

Les valeurs de ε sont négatives car le frottement décroît lorsque α augmente, c'est-à-dire, la pente de l'indenteur diminue. Cependant, les valeurs de ε sont largement supérieures aux valeurs de δ , ce qui prouve que la forme de l'indenteur est prédominante sur la vitesse en ce qui concerne l'évolution de la hauteur d'eau critique.

Ainsi, les résultats indiquent que les paramètres de microtexture, l'amplitude et la forme des microrugosités, sont prépondérantes sur la vitesse en ce qui concerne la variation du frottement faiblement lubrifié.

Chapitre 5

Modélisation physique

Plan du chapitre

5.1	Introduction	88
5.2	Modélisation de la relation frottement/hauteur d'eau	88
5.2.1	Calcul du frottement	88
5.2.2	Prise en compte de l'eau dans le modèle	91
5.2.3	Prise en compte de l'adhésion dans le modèle	93
5.2.4	Prise en compte des effets hydrodynamiques	95
5.3	Calcul de la hauteur d'eau au sommet des granulats	100
5.3.1	Modèle de mouillage d'un profil de chaussée	100
5.3.2	Calcul de l'épaisseur du film d'eau entraînée au sommet d'un granulat	102

5.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est la mise en place d'un modèle permettant de calculer le frottement à partir des profils de texture d'un échantillon à l'échelle microscopique.

Les données d'entrées du modèle sont la hauteur d'eau au sommet des granulates et la vitesse de glissement de la gomme sur la surface. Les résultats obtenus seront comparés aux essais réalisés en laboratoire.

La hauteur d'eau présente au sommet de chaque granulat n'étant pas *a priori* connue, ce chapitre présente également un moyen de l'estimer. Ce calcul se découpe en deux phases : calcul de la hauteur d'eau le long du profil "libre" c'est-à-dire sans considérer l'effet de l'entraînement due à la gomme, puis un calcul des hauteurs d'eau aux sommets de chaque granulat. Les résultats fournis par ce modèle de calcul de hauteur d'eau sont ensuite discutés.

Le modèle global d'estimation du frottement gomme/chaussée s'appuie sur un principe de sommation des effets des différents phénomènes intervenant dans le mécanisme d'adhérence. Ces trois contributions sont : la déformation de la gomme, l'adhésion et l'effet hydrodynamique. L'impact de ces trois contributions sur le niveau d'adhérence global est quantifié afin de déterminer le coefficient de frottement correspondant à différentes conditions de mouillage et de vitesse.

5.2 Modélisation de la relation frottement/hauteur d'eau

5.2.1 Calcul du frottement

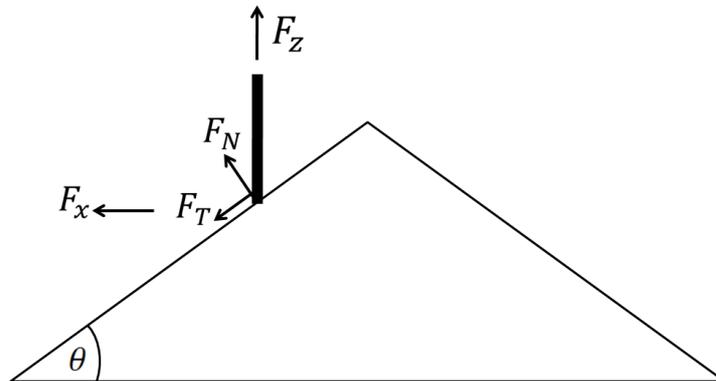


Figure 5.1 — *Modèle de Tabor.*

La situation considérée par le modèle de Tabor (Ford, 1993) est montrée figure 5.1. Un patin glisse sur une aspérité symétrique triangulaire. Il monte selon un angle θ par rapport à l'horizontale. La force de frottement locale s'opposant au mouvement est liée à la force normale locale par la relation $F_T = \mu_0 F_z$ où μ_0 est le coefficient de frottement sous-jacent dû à l'adhésion. Les composantes verticale F_z et horizontale F_x de la force s'appliquant sur le patin se calculent respectivement par :

$$F_z = F_N \cos \theta - F_T \sin \theta \quad (5.1)$$

$$F_x = F_N \sin \theta + F_T \cos \theta \quad (5.2)$$

Ainsi le coefficient de frottement lors de la montée du patin sur l'aspérité est :

$$\mu(\theta) = \frac{F_x}{F_z} = \frac{\mu_0 + \tan \theta}{1 - \mu_0 \tan \theta} \quad (5.3)$$

Pour considérer l'ensemble de l'aspérité, le coefficient de frottement est aussi calculé lors de la descente suivant l'angle $-\theta$. Ainsi, la valeur moyenne du coefficient de frottement le long de l'aspérité est :

$$\mu = \frac{1}{2} (\mu(\theta) + \mu(-\theta)) = \frac{\mu_0(1 + \tan^2 \theta)}{1 - \mu_0^2 \tan^2 \theta} \quad (5.4)$$

Néanmoins, ce modèle ne prend pas en compte le caractère viscoélastique de la gomme. Pour cela, on utilisera un modèle d'indentation développé dans le cadre d'une collaboration entre Michelin et le LCPC (Do, 2004).

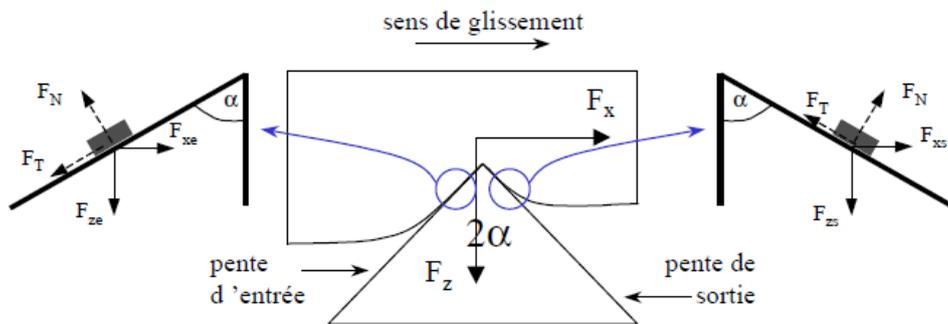


Figure 5.2 — Modèle de Michelin (Do, 2004).

Le problème est similaire à celui considéré par le modèle de Tabor mais prend en compte le caractère viscoélastique (figure 5.2). L'effort suivant x sur la pente ascendante F_{xe} est exprimé en fonction de l'effort F_{ze} suivant z sur la même pente :

$$F_{xe} = \frac{F_{ze}(\cos \alpha + \mu_0 \sin \alpha)}{\sin \alpha - \mu_0 \cos \alpha} \quad (5.5)$$

où $\mu_0 = \frac{F_T}{F_N}$ est le coefficient de frottement du patin sur les faces ascendante et descendante de l'aspérité, en considérant que les deux faces présentent le même coefficient de frottement. On suppose que le patin de gomme n'est pas seulement déformé par l'aspérité mais également par de plus petites aspérités non visibles situées sur ses deux faces. Ces petites aspérités sont à l'origine des forces de frottement qui engendrent le coefficient de frottement μ_0 . Le pas de mesure des profils STIL étant 0,01 mm et supposant que les échelles de rugosités séparées par un facteur 10 ne peuvent être vues ensemble, μ_0 est donc généré par des aspérités de moins de 10 μm d'amplitude. Les études précédentes (Do, 2004) ont montrées que la contribution au frottement d'aspérités inférieures à 10 μm d'amplitude est indépendante du type de granulat et égale à 0,3. Il s'agit donc de la valeur adoptée dans l'application du modèle à cette étude, c'est-à-dire $\mu_0 = 0,3$.

Sur la pente descendante, la relation entre l'effort F_{xs} suivant x et F_{zs} suivant z est :

$$F_{xs} = \frac{F_{zs}(\mu_0 \sin \alpha - \cos \alpha)}{\sin \alpha + \mu_0 \cos \alpha} \quad (5.6)$$

Par conséquent, on définit le coefficient de frottement sur la totalité du granulat :

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} = \frac{F_{xe} + F_{xs}}{F_z} = \tau \frac{\cos \alpha + \mu_0 \sin \alpha}{\sin \alpha - \mu_0 \cos \alpha} - (1 - \tau) \frac{\mu_0 \sin \alpha - \cos \alpha}{\sin \alpha + \mu_0 \cos \alpha} \quad (5.7)$$

où :

$$\begin{aligned} - \tau &= \frac{F_{ze}}{F_z} \\ - F_x &= F_{xe} + F_{xs} \\ - F_z &= F_{ze} + F_{zs} \end{aligned}$$

Le paramètre τ est alors défini comme un coefficient de partage de la charge appliquée sur l'aspérité. Avec un matériau élastique, τ doit prendre la valeur de 0,5 exprimant une déformation symétrique. Avec un matériau viscoélastique comme un pain de gomme, le déphasage entre la contrainte et la déformation implique une surcharge sur la pente d'entrée. Le paramètre τ peut alors être relié aux caractéristiques viscoélastiques de la gomme. Prenant un solide viscoélastique pour modéliser la gomme, la relation suivante, où δ est l'angle de déphasage entre la contrainte et la déformation sur un matériau viscoélastique est obtenue :

$$\tau = 0,5 + \frac{2\delta}{\pi} \quad (5.8)$$

Pour l'application du modèle, la valeur de τ est prise égale à la moyenne de la plage usuelle, soit $\tau = 0,83$ (Do, 2004).

Pour chaque échantillon de mosaïque de graviers roulés, le modèle est appliqué sur les profils de microtexture extraits avec le filtrage présenté section 4.3.1.1. La figure 5.3 présente un exemple des valeurs de μ obtenues sur chaque aspérité d'un échantillon.

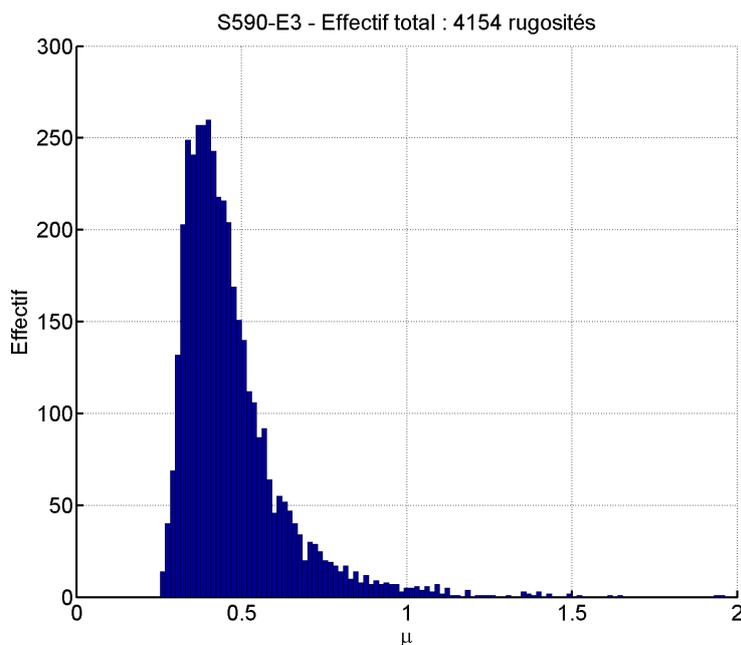


Figure 5.3 — Répartition des coefficients de frottement sur un échantillon.

5.2.2 Prise en compte de l'eau dans le modèle

La modélisation du masquage a été réalisée de manière très simple. Le film d'eau est représenté par une ligne horizontale qui s'élève lorsque la hauteur d'eau augmente, comme l'illustre la figure. La hauteur d'eau est définie par la différence de hauteur entre la ligne horizontale et la valeur moyenne du minimum de chaque profil extrait.

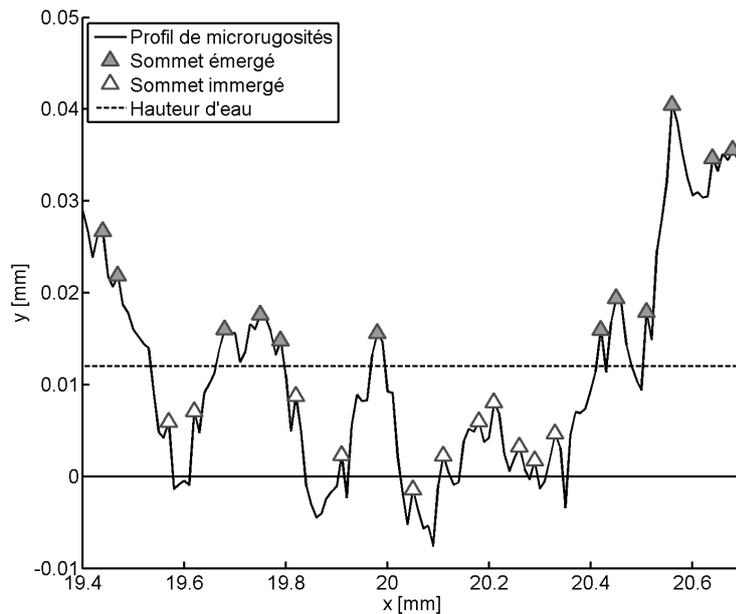


Figure 5.4 — *Masquage du profil par l'eau.*

Lorsque la hauteur d'eau augmente, la charge normale appliquée par le patin est supportée à la fois par les aspérités du profil et par le film d'eau (où les aspérités sont submergées). Ce phénomène est pris en compte dans le modèle même si celui-ci néglige la contrainte de cisaillement du film d'eau. Il est fait l'hypothèse que la charge verticale totale ($F_z = 11,8 \text{ N}$) se répartit uniformément sur les N aspérités d'un sommet de granulat de sorte que :

$$F_{zi} = \frac{F_z}{N} \quad (5.9)$$

La force de frottement totale due à la déformation de la gomme sur les aspérités $F_{x,def}$ est alors calculée comme suit :

$$F_{x,def} = \sum_{N_i} F_{xi,def} \quad (5.10)$$

$$= \sum_{N_i} \mu_i F_{zi} \quad (5.11)$$

$$= \frac{F_z}{N} \sum_{N_i} \mu_i \quad (5.12)$$

où μ_i est le coefficient de frottement calculé sur une aspérité avec l'équation (5.7) et N_i le nombre d'aspérités émergées ($N_i \leq N$). Le coefficient de frottement total μ_{def} est

alors :

$$\mu_{def} = \frac{F_{x,def}}{F_z} = \frac{1}{N} \sum_{N_i} \mu_i \quad (5.13)$$

Le modèle permet de montrer la très forte dépendance du coefficient de frottement au nombre d'aspérités en contact avec le patin de gomme. Lorsque la hauteur d'eau augmente, le nombre d'aspérités au dessus du film d'eau diminue ce qui fait décroître le coefficient de frottement. La figure 5.5 montre l'évolution du coefficient de frottement μ_{def} en fonction de la hauteur d'eau h^* . Cette hauteur d'eau est fonction de la quantité d'eau présente entre le patin de gomme et le sommet des granulats de la surface. Le calcul de cette hauteur d'eau à partir de l'eau pulvérisée sur la surface étant un problème complexe (section 5.3), des valeurs arbitraires de h^* de l'ordre de grandeur des valeurs présentées dans la littérature (Moore, 1975; Savkoor, 1991) sont tout d'abord choisies .

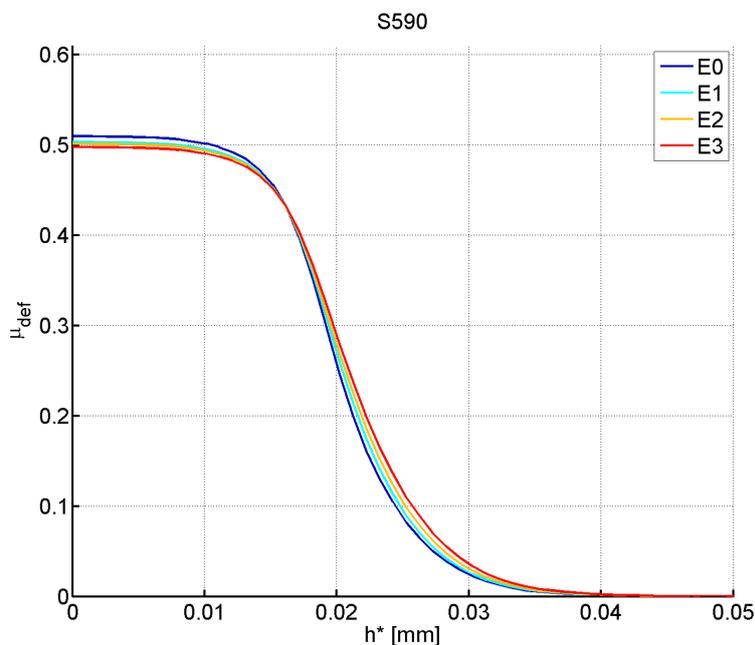


Figure 5.5 — Evolution du coefficient de frottement μ_{def} en fonction de la hauteur d'eau h^* sur la mosaïque S590.

La courbe obtenue présente la même forme que la courbe de Stribeck démontrant que l'hypothèse de la forte influence du nombre d'aspérités sur le frottement est appropriée. Cependant, tous les états de sablage présentent la phase 1 contrairement aux résultats des essais, où seules les surfaces sablées montrent cette phase (figure 3.2). De plus, le modèle tend obligatoirement vers 0 alors que la valeur minimale des résultats des essais n'est pas nulle, ce qui signifie qu'un certain nombre d'aspérités reste en contact avec le patin de gomme. Enfin, les valeurs calculées ne sont pas très différentes d'un état de sablage à l'autre ce qui n'est cependant pas étonnant au vu des différences sur les valeurs moyennes des angles α calculés.

5.2.3 Prise en compte de l'adhésion dans le modèle

Le modèle ne prenant en compte que la déformation de la gomme, il est également important de calculer la composante adhésion du frottement. Celle-ci est fonction de l'aire de contact a_i entre le pain de gomme et les aspérités :

$$F_{x,adh} = \sum_{N_i} F_{xi,adh} \quad (5.14)$$

$$= \sum_{N_i} \sigma_i a_i \quad (5.15)$$

σ_i est la contrainte de cisaillement sur l'aspérité i : on suppose que sa valeur est constante d'une aspérité à l'autre et égale à σ . Sur une aspérité circulaire, l'aire de contact est calculée à l'aide de la théorie de Hertz de la façon suivante (Golden, 1981) :

$$a_i = \pi r_i p_i \quad (5.16)$$

où r_i est le rayon de courbure au sommet de l'aspérité et p_i la profondeur de pénétration de la gomme. Le rayon de courbure est calculé à partir de la dérivée seconde du profil au sommet :

$$\frac{1}{r_i} = \frac{z_{x-\Delta x,i} - 2z_{x,i} + z_{x+\Delta x,i}}{\Delta x^2} \quad (5.17)$$

où :

- $z_{x,i}$ est la hauteur du profil de l'aspérité i à l'abscisse x ;
- Δx est le pas de mesure du profil.

La figure 5.6 montre un exemple de distribution de rayons de courbure sur l'échantillon S590-E3.

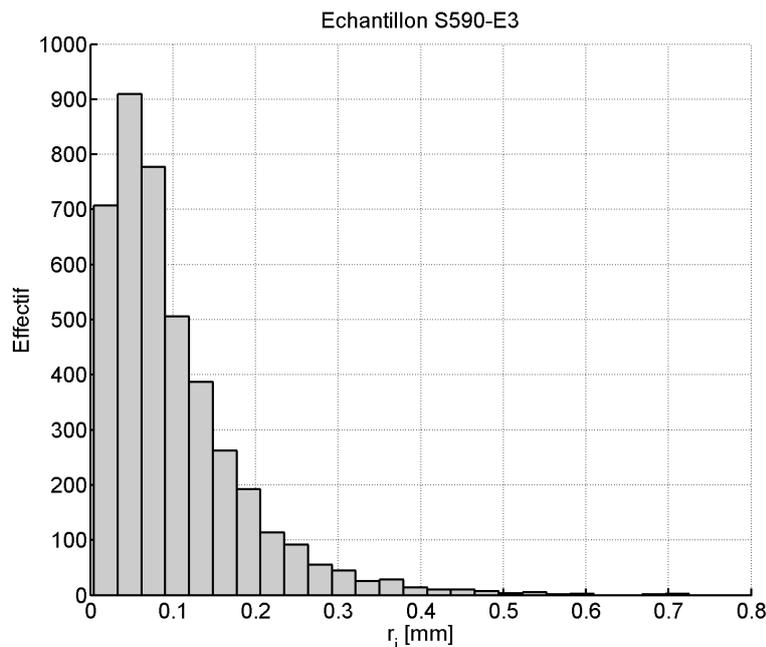


Figure 5.6 — Distribution des rayons de courbure sur l'échantillon G800-E3.

La profondeur de pénétration de la gomme est calculée à l'aide de la théorie de Hertz présentée par Moore (Moore, 1967) :

$$p_i = \frac{F_{zi}}{2L_i C} \quad (5.18)$$

avec :

- L_i est la distance entre 2 vallées encadrant un sommet (longueur d'une rugosité) ;
- C est la raideur de la gomme.

La figure 5.7 montre un exemple de distribution de profondeur de pénétration de la gomme sur l'échantillon G800-E3.

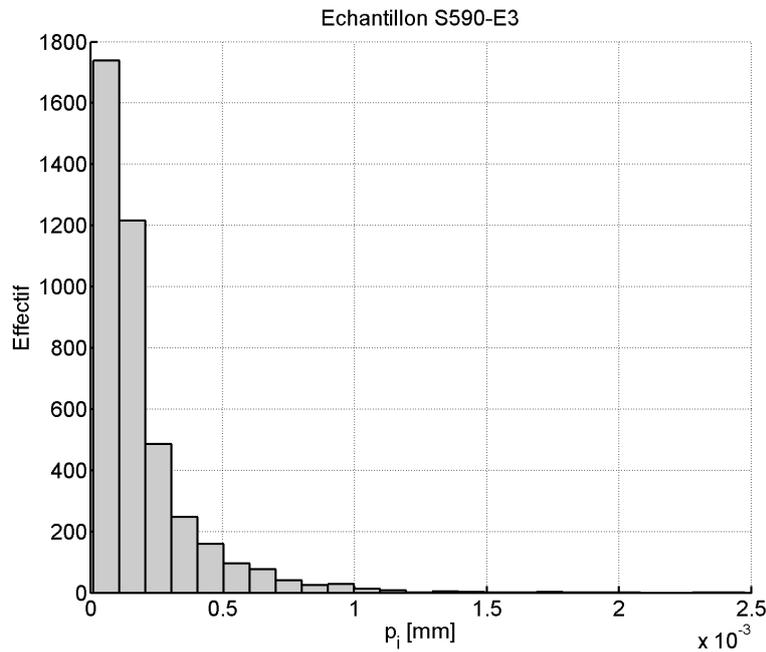


Figure 5.7 — Distribution des profondeurs de pénétration sur l'échantillon G800-E3.

Par conséquent, la force de frottement due à l'adhésion et le coefficient de frottement associé s'expriment de la façon suivante :

$$F_{x,adh} = \pi\sigma \sum_{N_i} r_i p_i \quad (5.19)$$

$$\mu_{adh} = \frac{F_{x,adh}}{F_z} = \frac{\pi\sigma}{F_z} \sum_{N_i} r_i p_i \quad (5.20)$$

Pour les applications numériques, le facteur $\frac{\pi\sigma}{F_z}$ est supposé égal à 1, ce qui équivaut à attribuer la valeur 3,75 MPa à σ . Cette valeur est de l'ordre de grandeur des pressions locales généralement observées au contact entre le pneu et la chaussée pour un véhicule léger : la surface portante d'un pneumatique développe des pressions locales entre 0,5 MPa environ sur une texture peu rugueuse et 4,5 MPa pour une texture très rugueuse (Hamlat, 2007). La figure présente l'évolution de $\mu = \mu_{def} + \mu_{adh}$ en fonction de la hauteur d'eau comparée aux précédentes courbes présentant l'évolution de μ_{def} seule.

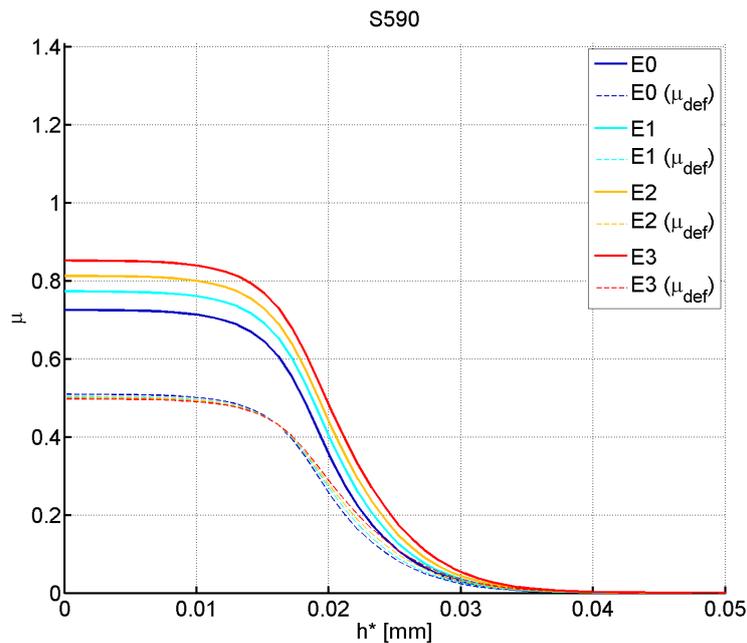


Figure 5.8 — Evolution du coefficient de frottement μ_{def} en fonction de la hauteur d'eau h^* sur la mosaïque S590.

Ce nouveau calcul présente des améliorations par rapport au précédent. Les différences entre les sablages sont plus significatives et logiques : la courbe correspondant à la surface sans sablage se trouve sous les autres. Même si les courbes tendent toujours vers 0, les amplitudes des valeurs du coefficient de frottement sont plus proches des valeurs expérimentales. En particulier, l'écart entre la surface non sablée et la surface après 3 sablages est d'environ 0,2, ce qui est bien plus proche des écarts trouvés expérimentalement. Ce résultat est de plus logique car l'amplitude des rugosités sur la surface sablée étant plus grande le nombre d'aspérités émergées est plus grand pour la même hauteur d'eau.

5.2.4 Prise en compte des effets hydrodynamiques

Pour prendre en compte la valeur non-nulle du frottement dans la phase 3 due aux contraintes de cisaillement du film d'eau, un troisième terme μ_{hyd} est ajouté au modèle :

$$\mu = \mu_{def} + \mu_{adh} + \mu_{hyd} \quad (5.21)$$

Cette valeur est déterminée expérimentalement. Il s'agit de la valeur de frottement du DFT lors d'un essai standard ASTM, c'est-à-dire en présence d'une grande quantité d'eau. Cette valeur dépend de la vitesse. La schéma de la figure 5.9 récapitule le fonctionnement complet du modèle.

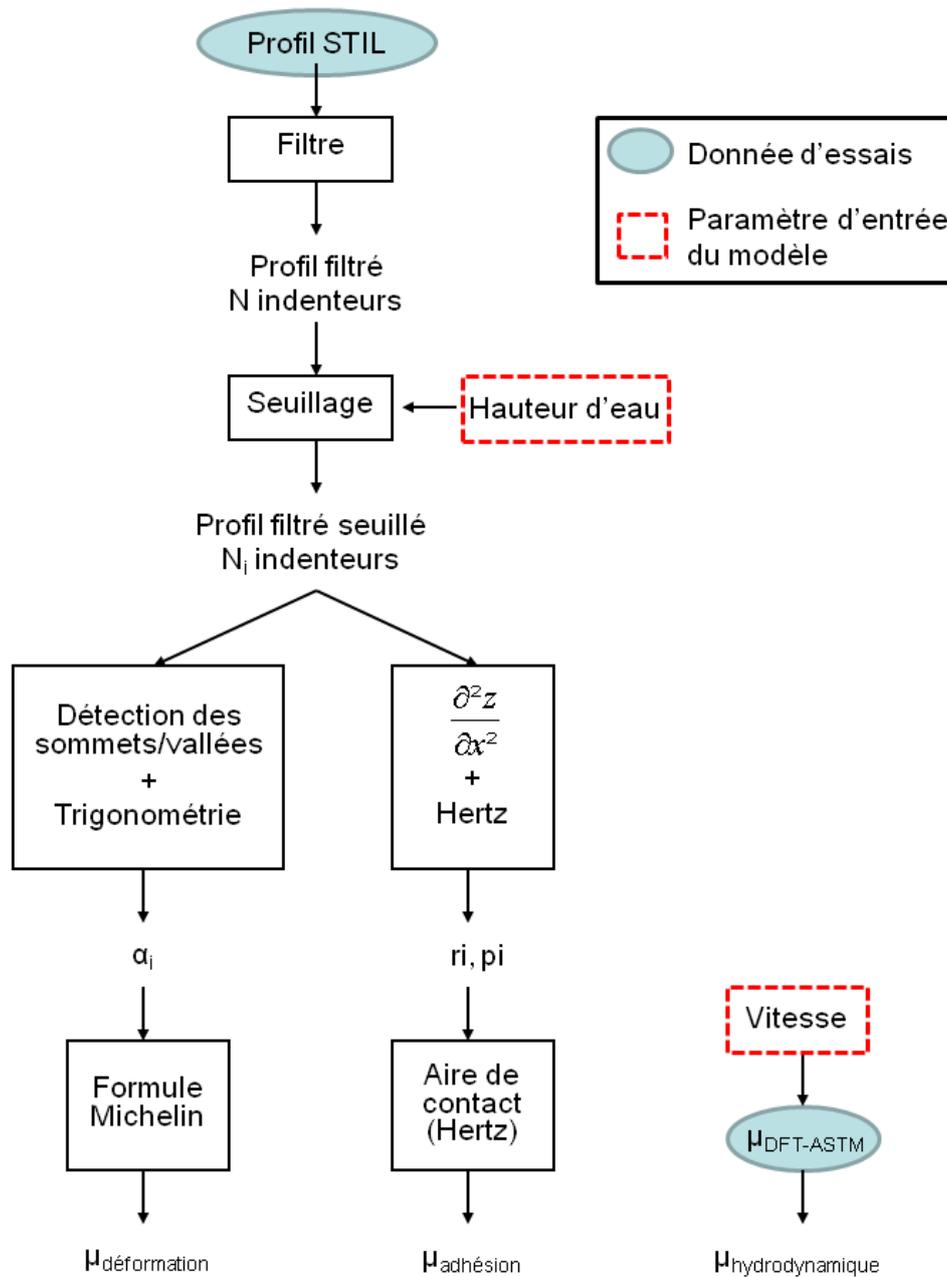


Figure 5.9 — Algorithme de calcul du frottement .

Afin de comparer les résultats des essais et du modèle, une transformation de l'échelle des hauteurs d'eau est nécessaire. Une relation linéaire est utilisée pour transformer la hauteur d'eau au sommet des granulats de la mosaïque h^* en hauteur d'eau pulvérisée h :

$$h = \lambda h^* \quad (5.22)$$

λ est déterminé de manière empirique de sorte que la courbe théorique s'ajuste au mieux aux données d'essais. Pour cela, le coefficient de corrélation entre le modèle et les données d'essai est calculé pour cent valeurs de λ comprises entre 1 et 50 comme montré figure 5.10. La valeur retenue est celle étant la plus proche de 1. Une valeur est calculée

sur chacun des 12 échantillons de mosaïques et pour 3 vitesses (20, 40 et 60 km/h). Les valeurs obtenues sont résumées dans le tableau suivant.

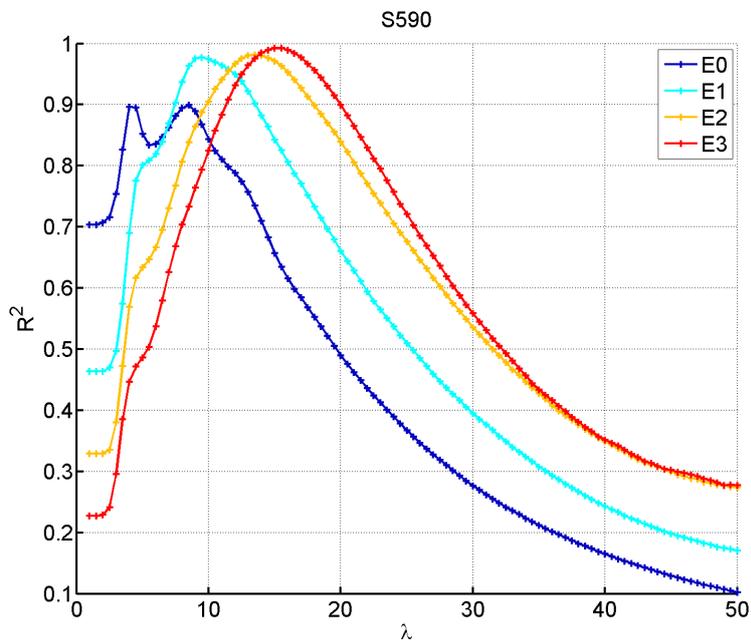


Figure 5.10 — Exemple d'évolution du coefficient de corrélation modèle/essai en fonction de λ .

Tableau 5.1 — Valeurs de λ à 20 km/h.

	S420	S590	G800
E0	23,5	8,5	27
E1	49	9,5	19,5
E2	24	13	20
E3	40,5	15,5	13

Tableau 5.2 — Valeurs de λ à 40 km/h.

	S420	S590	G800
E0	19,5	3,5	25
E1	31,5	8	15
E2	21	12	17
E3	32	14	12,5

Tableau 5.3 — Valeurs de λ à 60 km/h.

	S420	S590	G800
E0	10,5	3	7,5
E1	19,5	8	10,5
E2	20	11	13
E3	28,5	12,5	12

Les figures 5.11 à 5.13 montrent la courbe théorique transformée ainsi que les essais correspondants pour l'échantillon S590-E3 pour les trois vitesses étudiées.

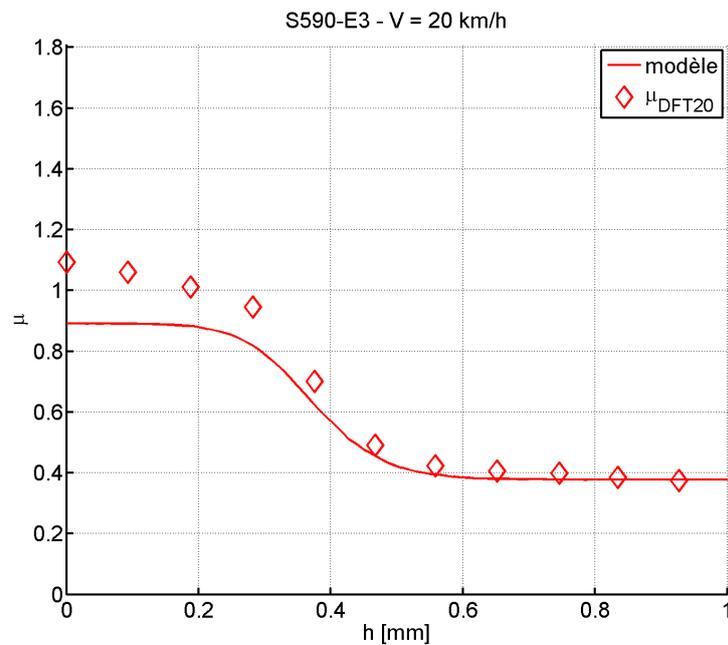


Figure 5.11 — Comparaison du modèle et des résultats d'essais à 20 km/h sur l'échantillon S590-E3.

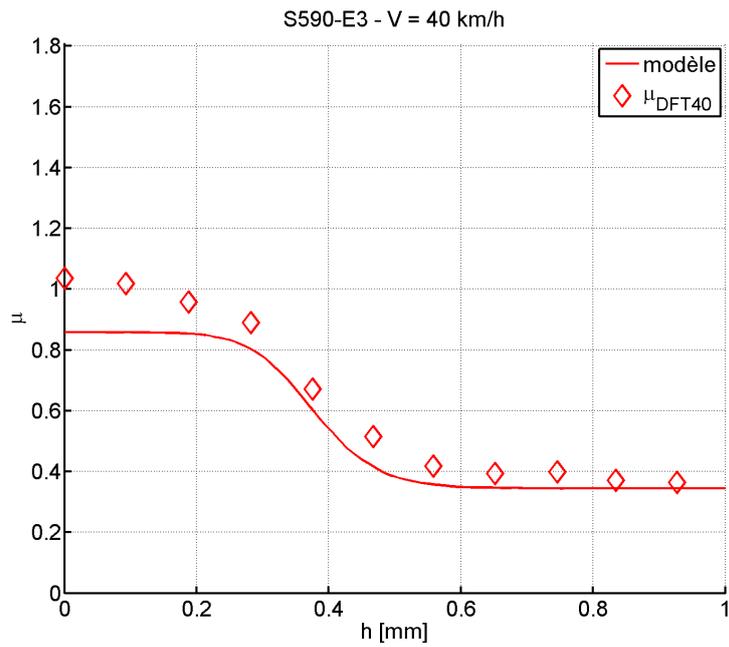


Figure 5.12 — Comparaison du modèle et des résultats d'essais à 40 km/h sur l'échantillon S590-E3.

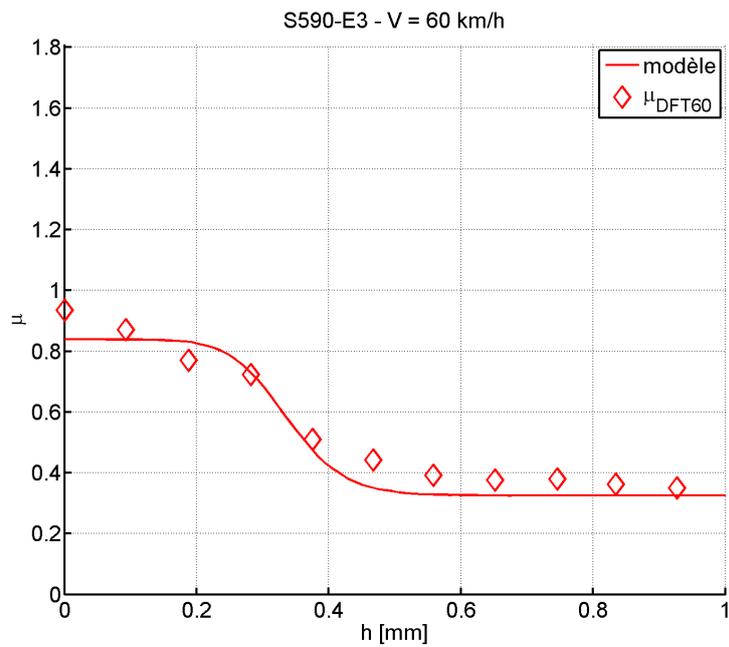


Figure 5.13 — Comparaison du modèle et des résultats d'essais à 60 km/h sur l'échantillon S590-E3.

5.3 Calcul de la hauteur d'eau au sommet des granulats

Le modèle a montré qu'il est indispensable de connaître la hauteur d'eau présente au sommet des rugosités d'une surface pour le calcul du frottement. Si un ajustement mathématique a été effectué précédemment (équation 5.22), le calcul de la hauteur d'eau au sommet des aspérités à partir de la quantité d'eau déversée sur la surface est recherché.

Dans une première partie, nous verrons comment calculer la hauteur d'eau en chaque point d'un profil circulaire à partir d'une quantité d'eau pulvérisée sur une surface.

Dans une seconde partie, l'épaisseur du film d'eau entraînée au sommet d'un granulat est calculée à l'aide d'un modèle développé par Moore. C'est cette hauteur d'eau qui vient masquer la microtexture utilisée dans le modèle présenté précédemment. Des résultats de ce modèle de calcul de hauteur d'eau au sommet d'un granulat sont analysés.

5.3.1 Modèle de mouillage d'un profil de chaussée

Principe général

Le modèle de calcul de la répartition de la hauteur d'eau le long d'un profil de chaussée se déroule en plusieurs étapes. Tout d'abord, on décompose le profil en plusieurs réservoirs dans lesquels l'eau va venir se stocker. Puis, on compare le volume d'eau devant remplir un réservoir avec son volume maximal disponible. Dans le cas où il est supérieur, on regarde s'il est possible de déverser la quantité en surplus dans un réservoir voisin. La figure 5.14 présente l'algorithme général du modèle détaillé ci-après.

Détails de l'algorithme

Décomposition du profil en réservoirs

On considère tout d'abord le profil de la chaussée comme un ensemble de réservoirs dans lesquels l'eau pulvérisée peut se déposer. Afin de délimiter ces réservoirs, il est nécessaire de définir les maxima et minima locaux du profil. Un point est considéré comme un maximum (croix vertes de la figure 5.15) si sa valeur est maximale et s'il est précédé, à gauche, d'une valeur plus petite d'un pas δ donné. Le même principe est appliqué aux minima. Ainsi chaque groupe de points composé d'un maximum, d'un minimum puis d'un autre maximum consécutifs représente un réservoir dans lequel se déverse l'eau.

Calcul du volume d'eau versé dans un réservoir

Les réservoirs sont traités successivement dans le sens croissant des x . Le profil est une projection 2D à épaisseur unitaire de la chaussée étudiée. Ainsi, sur une représentation 2D, le volume d'eau présent dans un réservoir est la surface entre le trait horizontal correspondant à la surface de l'eau et le profil de la chaussée (représenté en bleu sur la figure 5.15). Supposant la pulvérisation homogène de l'eau le long du profil, chaque réservoir est dans un premier temps supposé rempli d'un volume d'eau proportionnel à sa longueur calculé de la manière suivante :

$$V_{initial_{réservoir\ k}} = \frac{\text{longueur du réservoir } k}{\text{longueur du profil}} V_{total} \quad (5.23)$$

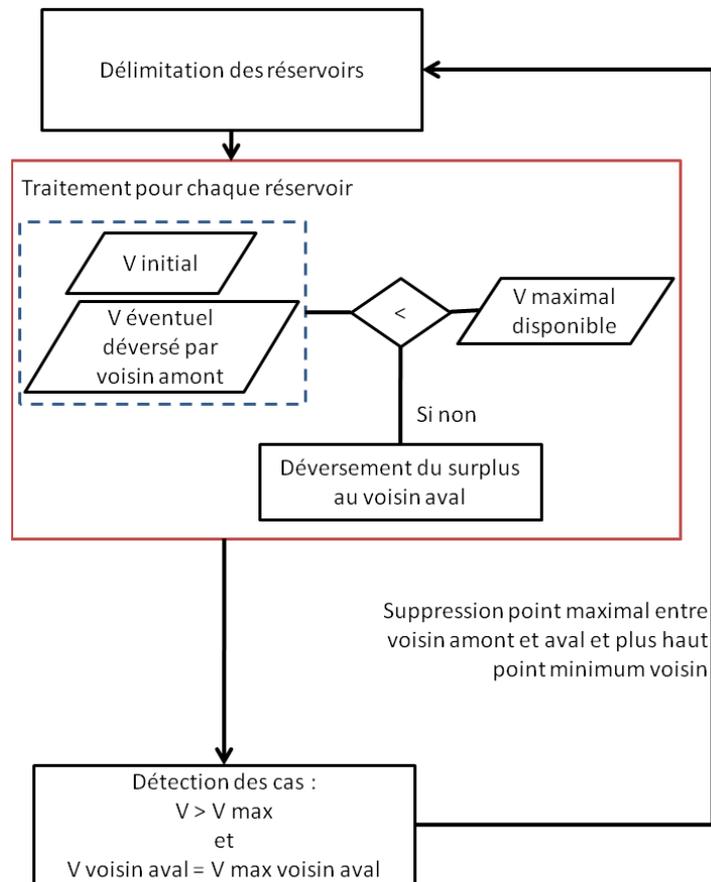


Figure 5.14 — Algorithme général du modèle.

Test : volume d'eau versé < volume du réservoir

Ce volume d'eau est alors comparé au volume maximal disponible. Si ce volume d'eau est supérieur au volume maximal disponible alors le surplus se déverse dans le réservoir voisin aval (du côté du bord le moins élevé) comme montré figure 5.15. Dans le cas où le réservoir considéré a été désigné comme réservoir de déversement de son voisin, le volume maximal disponible est comparé à la somme du volume initial et du surplus provenant du voisin.

Modification des réservoirs pour les tests négatifs

Après traitement de tous les réservoirs du profil considéré, on considère les réservoirs où les opérations décrites ci-dessus ont engendré un volume d'eau plus grand que le volume

maximal disponible. Si le réservoir voisin aval (le réservoir de déversement) contient déjà le volume maximal disponible, le programme supprime alors le point maximum commun aux deux réservoirs ainsi que le point minimal ayant la plus grande ordonnée associé afin de créer un plus grand réservoir (figure 5.16). Le profil avec les réservoirs ainsi redéfini est alors retraité selon les étapes précédentes jusqu'à ce que les volumes calculés dans les réservoirs soient tous inférieurs aux volumes maximaux disponibles correspondants.

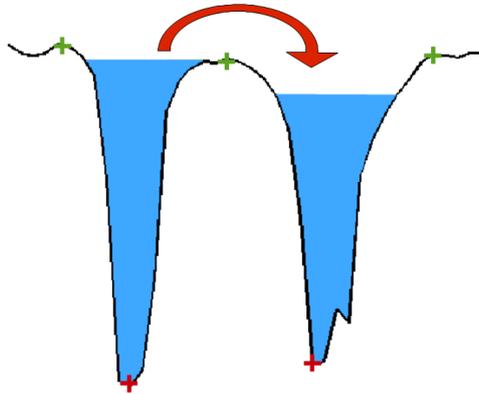


Figure 5.15 — *Définition du réservoir voisin aval.*

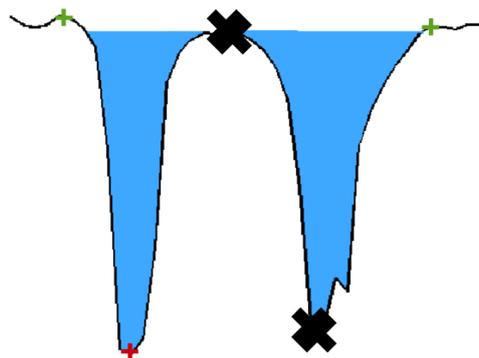


Figure 5.16 — *Exemple de suppression de points dans le cas de volumes trop importants.*

5.3.2 Calcul de l'épaisseur du film d'eau entraîné au sommet d'un granulat

Description du modèle

Un modèle développé par Moore permet de calculer la hauteur d'eau au sommet d'une rugosité (Moore, 1967). Il s'agit d'un modèle local, à l'échelle du pain de gomme. A cette échelle, l'eau est aspirée à la base du granulat par le glissement d'un pain de gomme. La hauteur d'eau au sommet d'une aspérité dépend alors grandement des paramètres du contact. Les hypothèses du modèle sont les suivantes :

- L'aspérité de la chaussée considérée est lisse et symétrique et en interaction avec la bande de roulement d'un pneumatique dont la vitesse de glissement est U_0 ,
- La vitesse U_0 est considérée suffisamment faible pour autoriser l'hypothèse suivante : la gomme circulant par-dessus l'aspérité l'enveloppe symétriquement,

- La variation de la vitesse de glissement le long de l'aspérité étant très faible, U_0 est considérée constante,
- La présence d'un mince film d'eau sur l'aspérité génère une pression hydrodynamique dans les parties d'entrée, centrale et de sortie du film,
- L'aspérité ne présentant aucune microtexture à son sommet, on peut considérer que l'épaisseur du film d'eau est constante dans la partie centrale,
- Il est supposé que, dans les parties d'entrée et de sortie du film, l'épaisseur d'eau varie exponentiellement le long du profil de l'aspérité.

Mise en équation du problème

La procédure attribue une coordonnée x à chaque aspérité désignant sa position moyenne dans la zone de glissement de l'aire de contact. De plus, pour chaque aspérité, un indice $i \in \llbracket 1, 3 \rrbracket$ indique la position dans les zones d'entrée, centrale et de sortie du film, comme présenté dans la figure 5.17

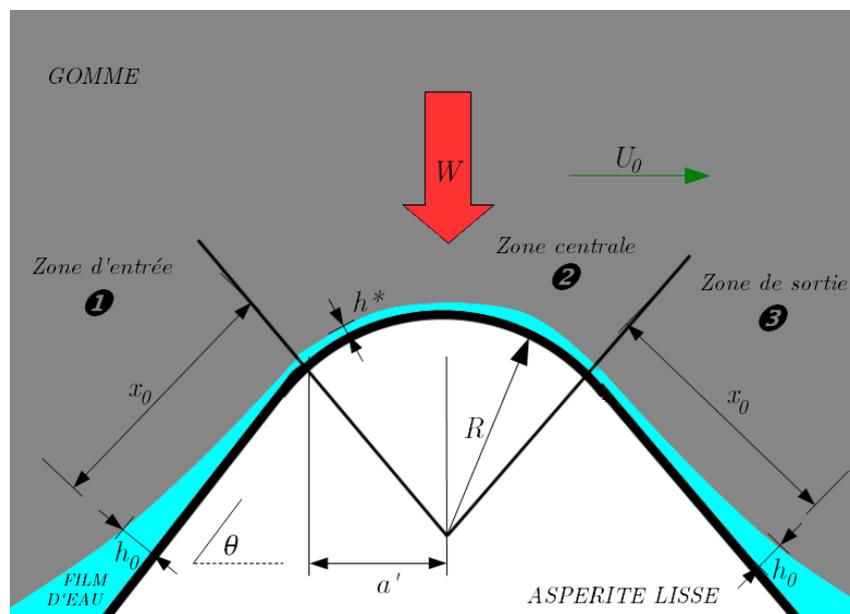


Figure 5.17 — Les trois zones caractéristiques du modèle de Moore.

En considérant la densité et la viscosité de l'eau constante, la forme générale de l'équation de Reynolds régissant le comportement du film d'eau est la suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(h_i^3 \frac{\partial p_i}{\partial x_i} \right) = 6\mu U_0 \frac{\partial h_i}{\partial x_i} \quad (5.24)$$

avec :

- h_i l'épaisseur du film d'eau ;
- p_i la pression hydrodynamique dans le film ;
- μ la viscosité absolue du film d'eau ;
- U_0 la vitesse de glissement.

L'hypothèse de la variation exponentielle du film d'eau dans les zones d'entrée et de sortie du granulat donne les variations de h_1 et h_3 :

$$h_1 = h_0 \cdot e^{ax_1} \quad (5.25)$$

$$h_3 = h_0 \cdot e^{-ax_3} \quad (5.26)$$

avec :

- $a = (1/x_0) \ln(h^*/h_0)$;
- h_0 la hauteur d'eau au début de la zone d'entrée du granulat.

La théorie de Hertz permet d'obtenir la demi-longueur de la zone centrale sur l'aspérité a' :

$$a' = \sqrt{2R\delta_0} \quad (5.27)$$

sachant que la charge verticale appliquée W est :

$$W = 2C_j\delta_0L \quad (5.28)$$

avec :

- $2\delta_0$ la pénétration de la gomme pressée sur un cylindre
- C_j la raideur de la gomme
- L la longueur de l'aspérité perpendiculairement au plan de la figure 5.17

L'expression analytique de la variation de la pression dans les zones d'entrée et de sortie est alors donnée par :

$$p_1 = \frac{\mu U_0}{ah_0^2} \left(-3e^{-2ax_1} + 2e^{ax_0} e^{-3ax_1} + 3 - 2e^{ax_0} \right) \quad (5.29)$$

$$p_3 = -\frac{3\mu U_0}{ah^{*2}} \left[\left(\frac{e^{2ax_0} - e^{3ax_0}}{1 - e^{3ax_0}} \right) - e^{2ax_3} + \left(\frac{1 - e^{2ax_0}}{1 - e^{3ax_0}} \right) e^{3ax_3} \right] + \frac{p^*}{1 - e^{3ax_0}} (e^{3ax_3} - e^{3ax_0}) \quad (5.30)$$

L'intégration de 5.29 et 5.30 donne les charges hydrodynamiques H_{w1} et H_{w3} dans les zones correspondantes. La pression hydrodynamique $p_2 = p_1(x_0)$ est intégrée sur $2a'$ pour obtenir la dernière charge hydrodynamique H_{w2} . Un exemple d'évolution de la pression hydrodynamique le long d'un granulat est montré figure 5.18.

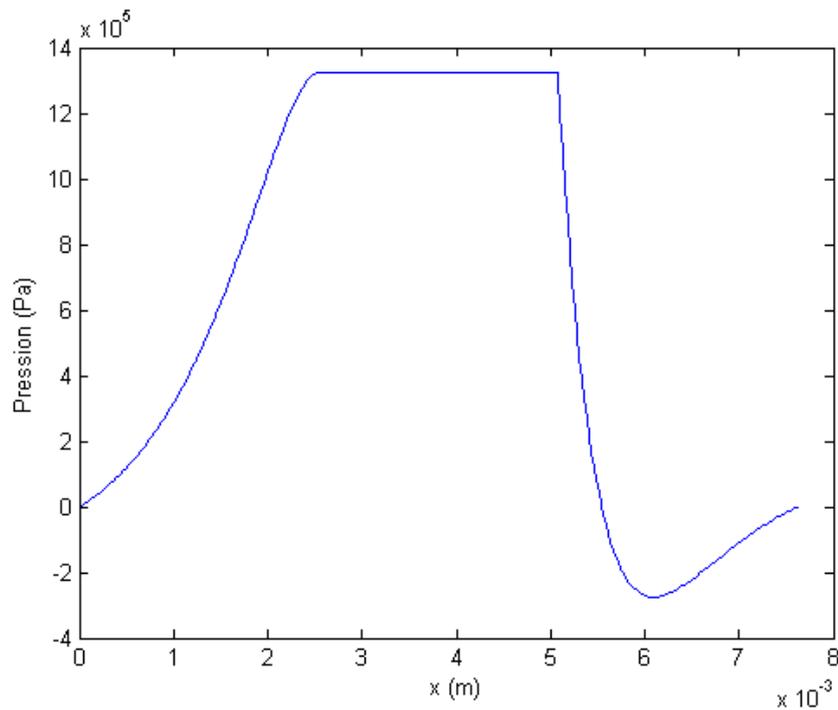


Figure 5.18 — Exemple d'évolution de la pression hydrodynamique le long d'un granulat.

Grâce à un procédé itératif, on cherche le rapport $\frac{h^*}{h_0}$ tel que $W = H_{w1} + H_{w2} + H_{w3}$. Si h_0 est connu, on obtient alors la hauteur d'eau au sommet du granulat h^* .

Application du modèle

Pour appliquer le modèle, il est nécessaire de connaître le rayon d'un granulat. Pour cela, les profils CTM de chaque échantillon de mosaïque (S420, S590 et G800) ont été analysés. Chaque granulat est approximé par un cercle passant par son sommet et les deux vallées voisines. Les figures montrent les distributions des rayons calculées sur chaque échantillon.

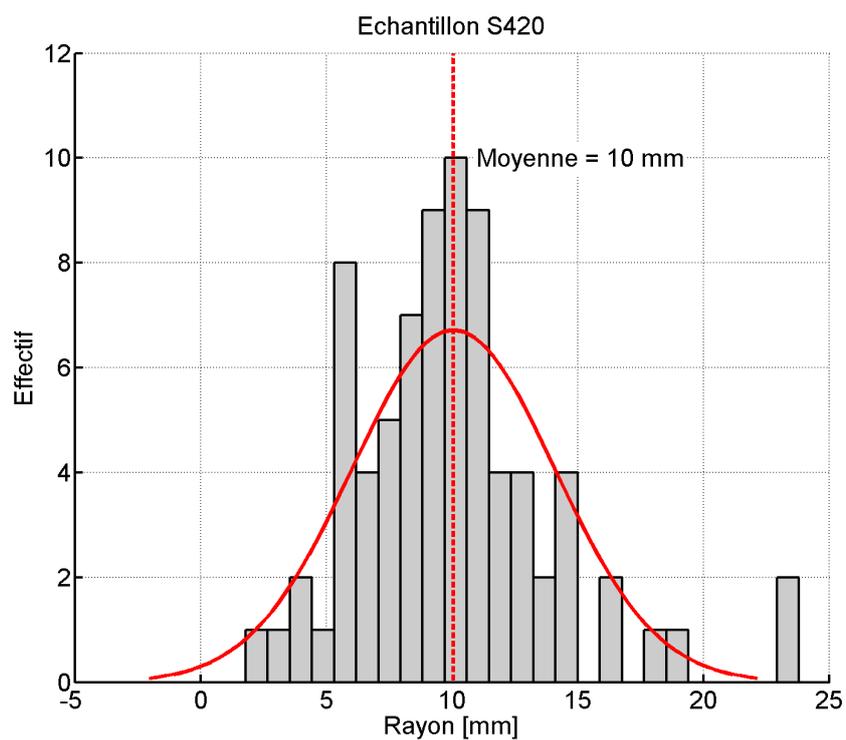


Figure 5.19 — Répartition des rayons des granulats sur l'échantillon S420.

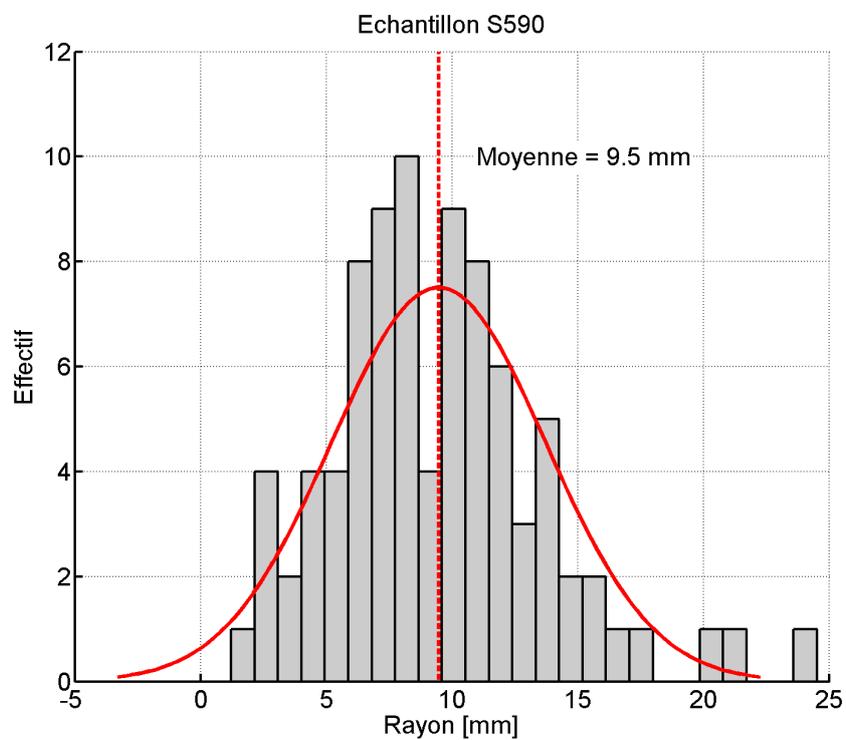


Figure 5.20 — Répartition des rayons des granulats sur l'échantillon S590.

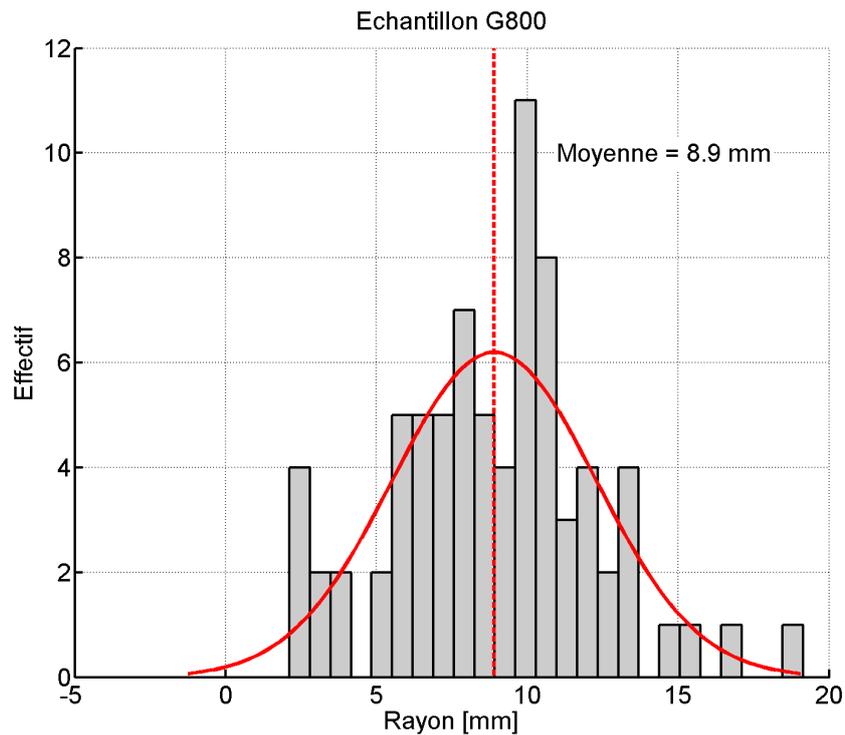


Figure 5.21 — Répartition des rayons des granulats sur l'échantillon G800.

Le modèle de Moore est donc appliqué à un granulat de diamètre 9,5 mm. La charge verticale de la gomme est la même que celle appliquée par un patin DFT, soit 11,8 N.

Des hauteurs d'eau théoriques à la base du granulat sont choisies et la réponse du modèle est observée.

La figure 5.22 présente l'évolution du rapport $\frac{h^*}{h_0}$ en fonction de la hauteur d'eau à l'entrée du granulat h_0 .

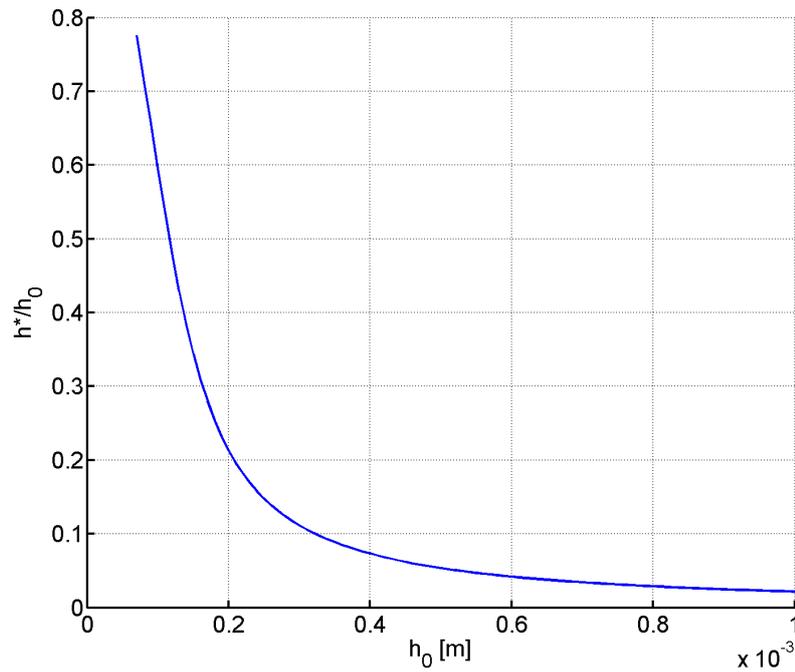


Figure 5.22 — Évolution du rapport $\frac{h^*}{h_0}$ en fonction de h_0 .

La figure 5.23 montre l'évolution de la hauteur d'eau h^* au sommet du granulat en fonction de la hauteur d'eau à l'entrée du granulat h_0 .

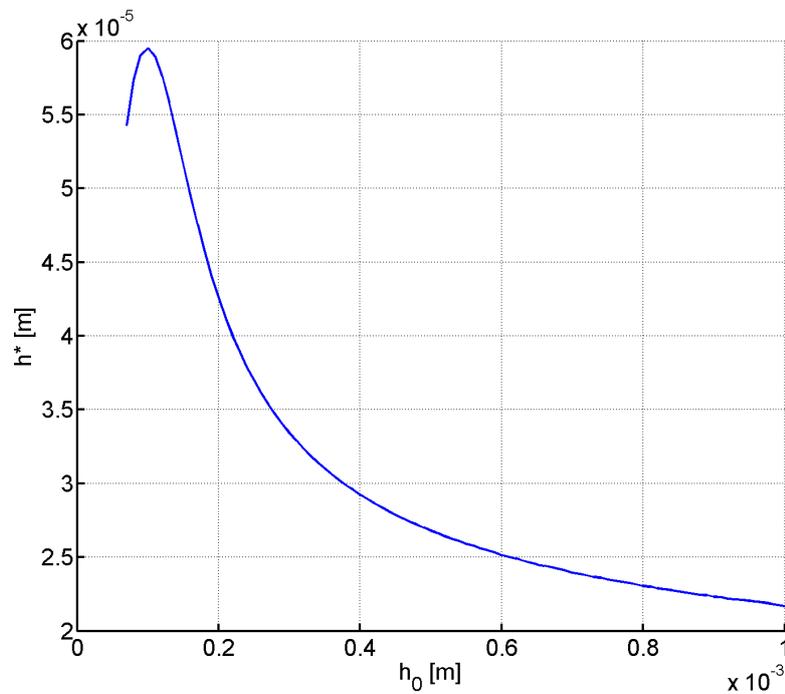


Figure 5.23 — Évolution du rapport $\frac{h^*}{h_0}$ en fonction de h_0 .

L'évolution observée n'est pas celle attendue puisque la hauteur d'eau au sommet du granulat diminue lorsque la hauteur d'eau à l'entrée augmente.

Ainsi, si ce modèle permet de trouver des hauteurs d'eau au sommet des granulats du bon ordre de grandeur, certains résultats montrent qu'une étude supplémentaire est nécessaire pour savoir s'il est approprié à l'étude menée.

Conclusions

Bilan des travaux

Cette étude porte sur la dégradation du potentiel d'adhérence d'une chaussée en présence d'un film d'eau de faible épaisseur (inférieure à 1 mm).

Le premier chapitre a présenté les différentes études existantes concernant ce sujet. Plus particulièrement, les recherches bibliographiques ont permis de montrer que ce sujet a été très peu exploré par le passé. De ce fait, un vaste plan d'expériences a été conduit.

Le chapitre 2 a donné les détails de ce plan d'expériences. Le plan d'expériences mené avait pour objectifs l'observation puis l'analyse des effets des deux échelles de texture (macrotecture et microtexture) sur le coefficient d'adhérence mesuré entre une surface faiblement mouillée et un matériau représentatif d'un pneumatique de véhicule. La mise en œuvre de ces expériences a soulevé deux enjeux métrologiques qui ont été traités. Tout d'abord, des protocoles ont été développés afin de réaliser les mesures sur des surfaces faiblement mouillées et donc loin des conditions standards de mesures des différents appareils utilisés (DFT, ADHERA). Ensuite, des surfaces spécifiques (mosaïques) ont été imaginées et fabriquées afin de pouvoir observer séparément les effets des deux échelles de texture.

Les protocoles mis en place ainsi que ces surfaces ont permis d'obtenir différentes courbes de variation du frottement en fonction de la vitesse de glissement, et ce, pour plusieurs hauteurs d'eau. Finalement, ces mesures ont été faites pour un grand nombre de surfaces. Ainsi, en plus des mosaïques, des plaques d'enrobés usuellement utilisés pour les chaussées réelles ont été étudiées. De plus, des mesures *in situ* ont été réalisées. Ces essais *in situ* ont permis de conclure sur la représentativité des essais de laboratoire par rapport aux mesures *in situ* sur chaussées faiblement mouillées.

Le chapitre 3 a été consacré à l'observation de l'ensemble des résultats obtenus. Ces observations ont permis de faire le lien avec les travaux de la littérature afin de déterminer les outils à utiliser pour les analyses. Les différentes courbes de frottement en fonction de la hauteur d'eau ont permis d'apprécier les effets de la texture et de la vitesse en dégagant des tendances. Finalement, une analogie avec les régimes de lubrification a été proposée afin de permettre une première explication aux phénomènes observés et ainsi amorcer une caractérisation mathématique qui a été développée par la suite.

Ce chapitre a confirmé l'importance de la microtexture pour diminuer voire empêcher la perte d'adhérence due aux très faibles hauteurs d'eau (inférieures à 0,5 mm).

Le chapitre 4 concernait l'analyse des résultats obtenus lors des essais par une approche mathématique. Un indicateur relié à la hauteur d'eau et parfaitement adapté aux films minces sur chaussée a été défini. Il a été appelé *hauteur d'eau critique*. Il est défini comme la hauteur d'eau à la frontière entre le régime de lubrification limite et le régime mixte, à l'endroit où la chute d'adhérence est la plus prononcée.

Une méthode d'extraction de la microtexture sur les profils mesurés a été mise en place. De même, des indicateurs de caractérisation de la microtexture ont été définis. Cette partie d'analyses a montré que la microtexture a une influence bien plus importante sur le frottement faiblement lubrifié que la vitesse. Elle a permis de discriminer les paramètres essentiels à la modélisation physique du frottement sur une surface faiblement mouillée. Cette modélisation a été développée au chapitre 5.

La partie modélisation a montré que le masquage des microaspérités d'une surface est ce qui cause la perte d'adhérence en présence d'eau sur la chaussée. A partir d'une cartographie de la texture d'une chaussée (à l'échelle de la microtexture) et d'un essai standard de mesure de frottement DFT, il est possible de prévoir la variation du frottement d'un patin de gomme en fonction de la hauteur d'eau.

Un algorithme de calcul de la hauteur d'eau en chaque point d'un profil à partir du volume d'eau initialement versé a été développé. Cet algorithme n'a finalement pas été implémenté dans le modèle final mais celui-ci pourra néanmoins être utile pour de futures recherches.

De même, un modèle de calcul de la hauteur d'eau entraînée au sommet de chaque granulat par le passage d'un matériau de type gomme a été trouvé dans la littérature (modèle de Moore). Celui-ci a été exploré sans résultats concluants mais les études menées peuvent être la base de nouvelles recherches.

Perspectives

Cette thèse traite d'un sujet relativement peu étudié jusqu'ici avec forte composante expérimentale. Ainsi, le travail effectué dans le cadre de cette étude pourra être le point de départ de nombreuses autres études.

En particulier, les résultats ont confirmé l'importance de la microtexture pour l'adhérence mais surtout ils ont permis d'en quantifier l'impact. Il faut maintenant travailler sur la transposition de ces travaux au cas des routes réelles (optimisation de la formulation, maintien des performances dans le temps). Cette étude concernerait aussi bien les gestionnaires routiers que les laboratoires comme l'Ifsttar, mais aussi les manufacturiers de pneumatiques car il faudrait faire un compromis entre sécurité et usure prématurée des pneumatiques à cause de l'agressivité de la route. De même, une route plus microtexturée peut s'avérer dangereuse en cas de chute pour les utilisateurs de deux-roues.

La modélisation proposée à la fin de cette étude peut également être améliorée. Tout d'abord, il faudrait pouvoir se passer de données issues de mesures pour le modèle. Pour cela, un modèle permettant de calculer la hauteur d'eau au sommet des granulats d'une chaussée est indispensable. Il s'agirait maintenant de modifier le modèle de Moore déjà étudié ici ou alors de créer un nouveau modèle. Celui-ci serait le fruit d'une étude dans le

domaine de la micro-fluidique. En effet, les hauteurs d'eau étudiées ici sont si faibles que les équations classiques de la mécanique des fluides trouvent leurs limites. De plus, il ne faut pas négliger les effets de tension de surface par exemple.

Finalement, le modèle développé reste limité au frottement d'un pain de gomme. Afin de passer à un modèle d'estimation dans le cas réel d'un pneu circulant sur une chaussée, le modèle proposé devra être couplé avec un modèle pneu plus complet. En particulier il existe plusieurs modèles basés sur le couplage dans toutes les directions de plusieurs solides de Kelvin. Cette prochaine étape pourrait donner à cette thèse de nombreuses applications dans la sécurité active des véhicules.

Applications

Malgré son aspect académique (compréhension des phénomènes, modélisation), la présente thèse a pour objectif d'être appliquée. Loin de prétendre avoir tout résolu, compte tenu de la complexité de la relation adhérence/mouillage de la chaussée et du faible nombre de recherches dédiées, ce travail de thèse cherche à contribuer à l'amélioration de la sécurité des conducteurs en apportant dans les champs d'application suivants :

- alerte aux conducteurs (gestionnaires) : un système d'information dynamique destiné à alerter les conducteurs d'une adhérence insuffisante sur chaussée mouillée peut requérir la connaissance d'une hauteur d'eau critique sur la chaussée (à défaut de connaître la variation complète du coefficient de frottement avec la hauteur d'eau), qui sera comparée aux mesures de hauteurs d'eau réalisées par un capteur installé sur le bord de la route (figure 5.24).



Figure 5.24 — *Système d'information dynamique en bord de voie.*

La hauteur d'eau critique peut être déterminée expérimentalement pour la section routière considérée en réalisant des mesures selon le protocole développé dans cette thèse.

A plus long terme, et idéalement, elle pourrait être déterminée par voie de calcul lorsque la relation hauteur d'eau critique/texture/conditions de contact (vitesse par exemple) sera mieux connue.

- alerte et assistance aux conducteurs (constructeurs) : les constructeurs automobiles développent des capteurs embarqués délivrant une information sur l'état de mouillage de la chaussée. Deux options d'assistance sont envisageables :
 - le conducteur est prévenu par un message de la dangerosité de la situation afin d'adapter son comportement,
 - un freinage est déclenché automatiquement lorsque le système considère que le conducteur ne peut plus agir pour éviter l'accident.

Les connaissances développées dans la thèse sur la variation du coefficient de frottement en fonction de la hauteur d'eau ou sur la notion de hauteur d'eau critique fournissent des informations indispensables au fonctionnement de ce type de systèmes de sécurité embarqués, notamment en termes de précision souhaitable pour les systèmes de mesure de hauteur d'eau.

- développement de capteurs de mesure de hauteurs d'eau (industriels) : les capteurs disponibles dans le commerce actuellement ne permettent pas d'accéder avec suffisamment de précision aux hauteurs d'eau inférieures à 1 mm (ce qui explique l'emploi de la méthode de pesée pour estimer une hauteur d'eau équivalente dans la gamme des valeurs considérées dans cette thèse). Les résultats de cette thèse, sans améliorer la technologie des capteurs, permettent néanmoins de situer les valeurs basses de hauteurs d'eau à atteindre.
- mesures opérationnelles de l'adhérence (laboratoires) : les appareils destinés au suivi de l'état d'adhérence des routes sont souvent conçus pour mouiller la chaussée avec une hauteur d'eau de 0,5 mm ou 1 mm. Les résultats de cette thèse confirment que le coefficient de frottement à ces niveaux de mouillage correspond à un niveau bas et stabilisé de la courbe frottement-hauteur d'eau. Ils confirment également que les mesures des appareils d'auscultation peuvent donc être considérées comme le cas le plus défavorable, vis-à-vis du problème de mouillage, de l'adhérence d'une route.

Annexe A

Chiffres des accidents corporels en France métropolitaine en 2011

Tableau A.1 — *Accidents corporels en 2011 sur l'ensemble des réseaux français en fonction du type d'intempéries.*

Intempéries	Accidents corporels
Normal	54040
Pluie légère	6134
Pluie forte	1211
Neige ou grêle	108
Brouillard ou fumée	440
Vent fort ou tempête	130
Temps éblouissant	645
Temps couvert	1923
Autre	391
Indéterminé	2
Total	65024

A.2 Chiffres des accidents corporels en France métropolitaine en 2011

Tableau A.2 — *Accidents corporels en 2011 sur l'ensemble des réseaux français en fonction de l'état de la surface de chaussée.*

État de la surface	Accidents corporels
Normale	52472
Mouillée	9597
Flaques	49
Inondée	22
Enneigée	38
Boue	33
Verglacée	275
Corps gras	196
Autre	2215
Indéterminé	127
Total	65024

Annexe B

Piste d'essai de l'Ifsttar



Figure B.1 — *Vue aérienne de la piste.*

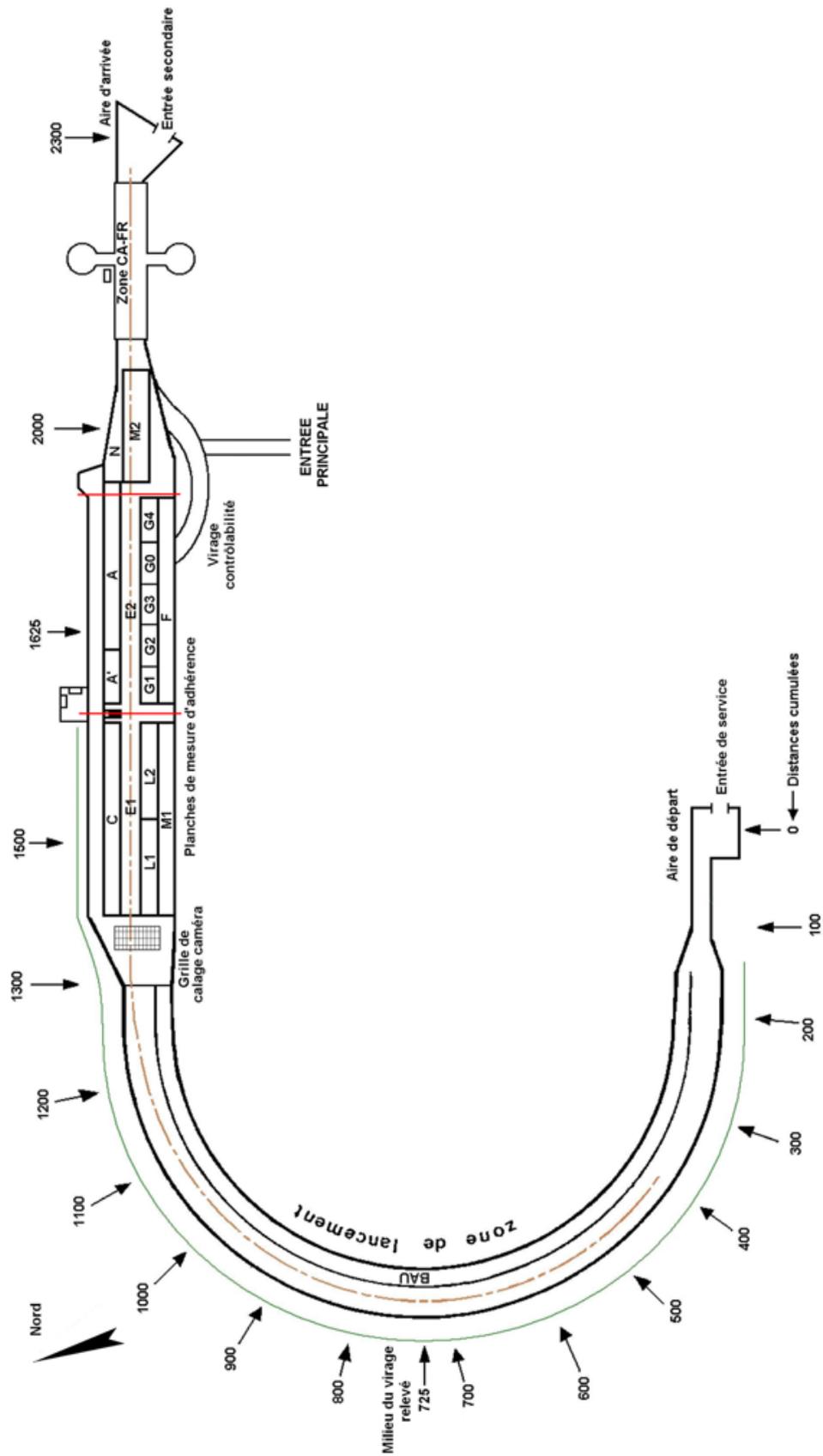


Figure B.2 — Plan général de la piste.

Annexe C

Résultats des mesures DFT

C.1 Échantillon S420

Pesée (g)	h_{eau} (mm)	DFT_{20}	DFT_{40}	DFT_{60}
0	0	1.08	1.03	0.95
7.04	0.075309	1.08	1.04	0.92
15.02	0.16067	0.99	0.93	0.75
23.13	0.24743	1	0.92	0.67
31.23	0.33408	0.94	0.84	0.64
39.33	0.42072	0.91	0.84	0.62
47.65	0.50972	0.79	0.72	0.54
55.82	0.59712	0.72	0.66	0.49
63.71	0.68152	0.69	0.66	0.54
71.9	0.76913	0.68	0.64	0.49
80.18	0.85771	0.7	0.64	0.48
88.21	0.9436	0.69	0.64	0.48
96.3	1.0301	0.7	0.64	0.48
ASTM	ASTM	0.37	0.3	0.29

Tableau C.1 — Mesures de frottement sur la mosaïque S420-E0.

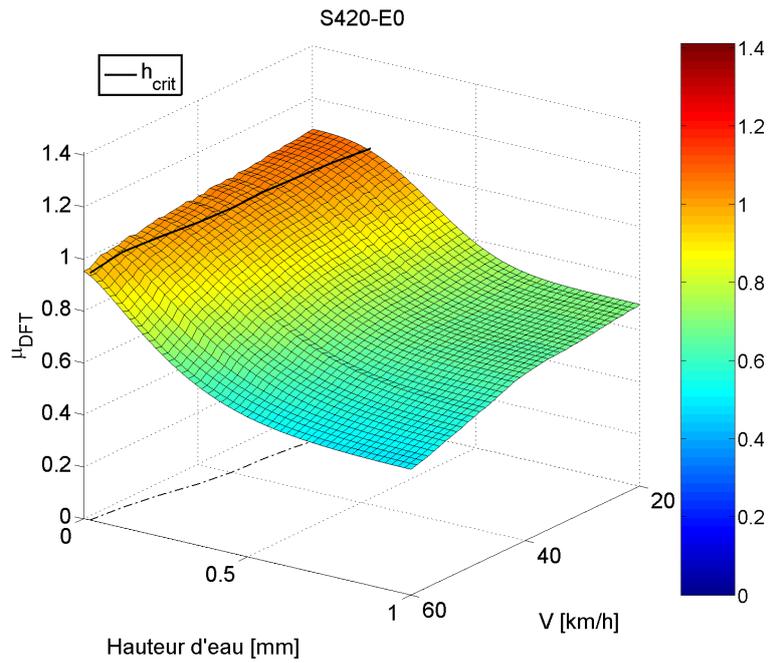


Figure C.1 — Évolution du frottement DFT en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la mosaïque S420-E0.

	$\Delta\mu$	μ_F	h_0	a	h_{crit}
S420-E0 - 20 km/h	0.38	0.7	0.43	2.7	0.18
S420-E0 - 30 km/h	0.38	0.67	0.4	2.25	0.13
S420-E0 - 40 km/h	0.39	0.64	0.39	2.07	0.11
S420-E0 - 50 km/h	0.44	0.56	0.38	1.64	0.05
S420-E0 - 60 km/h	0.47	0.48	0.29	1.39	0.02

Tableau C.2 — Valeurs des coefficients du modèle. Echantillon : S420-E0.

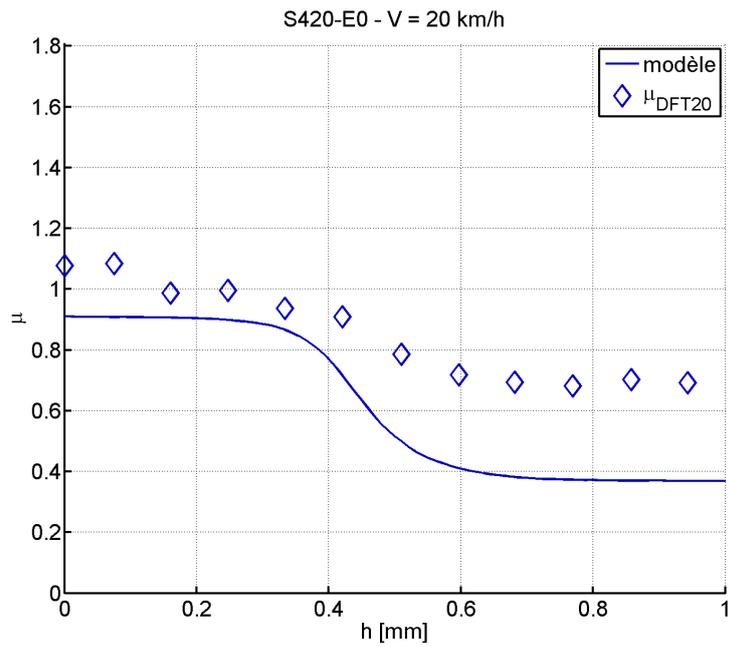


Figure C.2 — *Modèle physique sur la mosaïque S420-E0 à 20 km/h.*

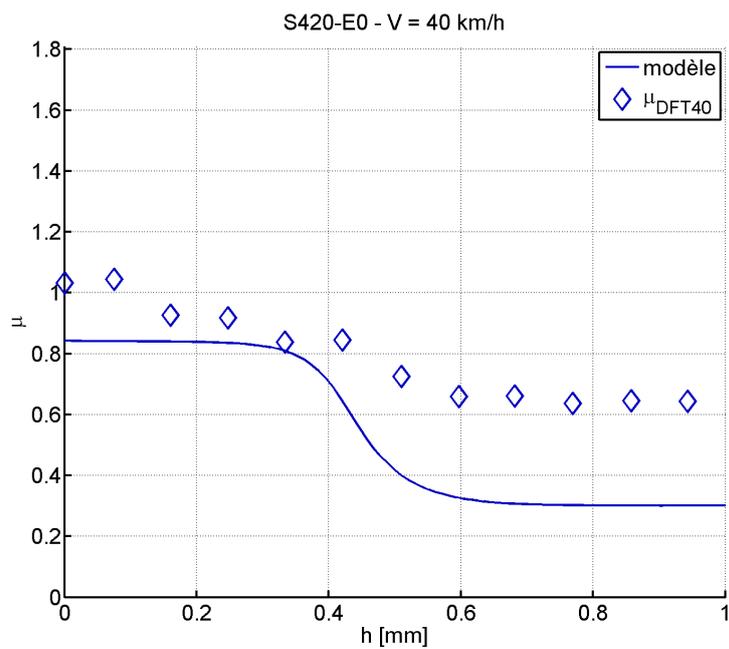


Figure C.3 — *Modèle physique sur la mosaïque S420-E0 à 40 km/h.*

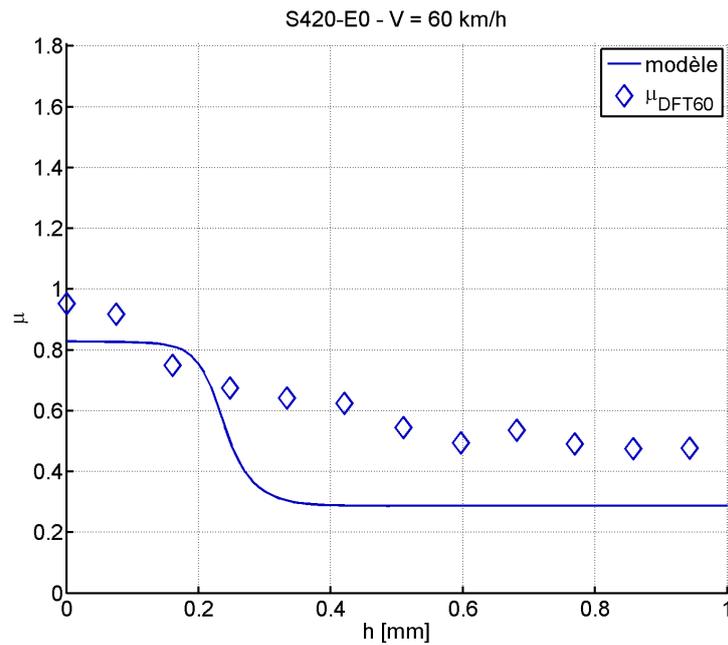


Figure C.4 — *Modèle physique sur la mosaïque S420-E0 à 60 km/h.*

Pesée (g)	h_{eau} (mm)	DFT_{20}	DFT_{40}	DFT_{60}
0	0	0.98	0.95	0.86
7.36	0.078732	1	0.97	0.85
14.75	0.15778	1	0.95	0.79
22.19	0.23737	0.98	0.92	0.75
29.39	0.31439	0.98	0.94	0.76
36.68	0.39238	0.97	0.93	0.75
43.88	0.4694	0.95	0.89	0.69
51.18	0.54749	0.95	0.85	0.67
58.38	0.62451	0.94	0.88	0.63
65.82	0.70409	0.96	0.87	0.67
72.99	0.78079	0.92	0.84	0.63
79.99	0.85567	0.89	0.81	0.57
87.78	0.939	0.83	0.75	0.55
ASTM	ASTM	0.5	0.43	0.4

Tableau C.3 — *Mesures de frottement sur la mosaïque S420-E1.*

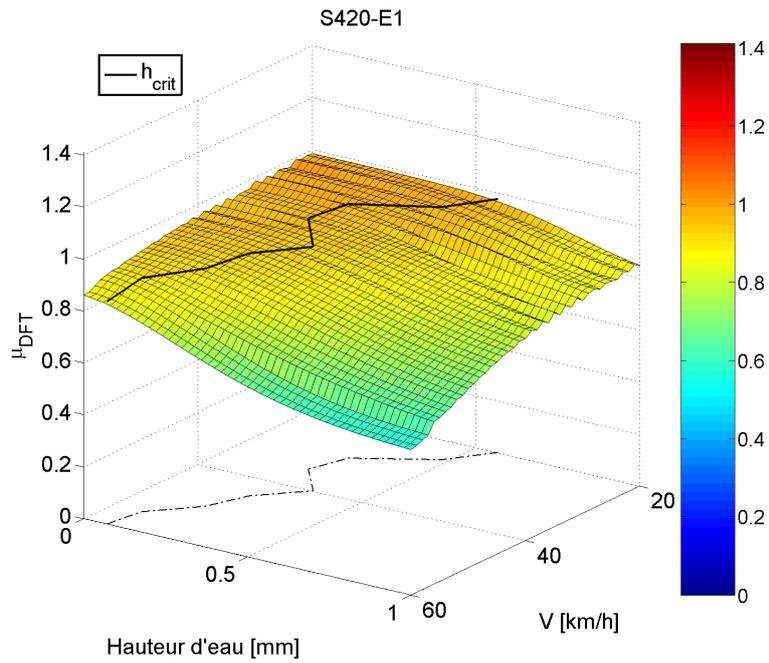


Figure C.5 — Évolution du frottement DFT en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la mosaïque S420-E1.

	$\Delta\mu$	μ_F	h_0	a	h_{crit}
S420-E1 - 20 km/h	0.15	0.83	0.85	5	0.56
S420-E1 - 30 km/h	0.17	0.81	0.65	2.87	0.28
S420-E1 - 40 km/h	0.2	0.75	0.79	2.91	0.35
S420-E1 - 50 km/h	0.28	0.65	0.74	2.07	0.2
S420-E1 - 60 km/h	0.31	0.55	0.48	1.66	0.07

Tableau C.4 — Valeurs des coefficients du modèle. Échantillon : S420-E1.

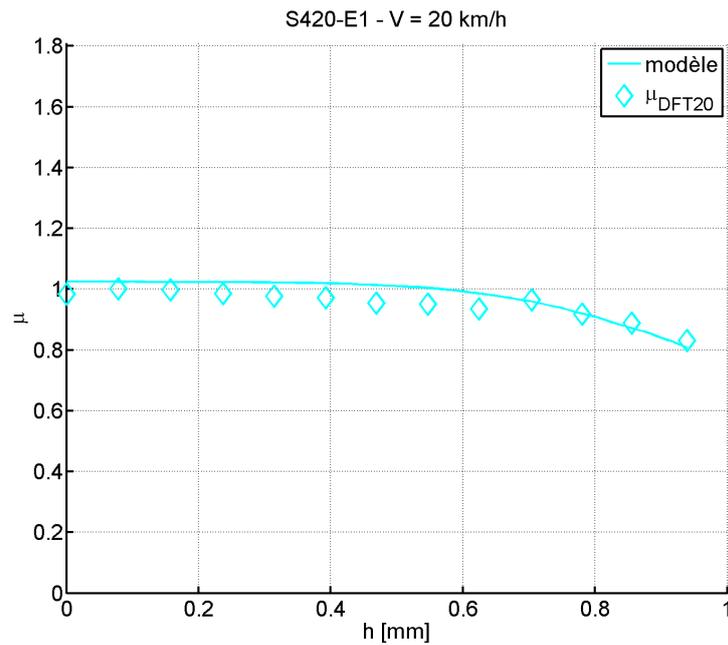


Figure C.6 — *Modèle physique sur la mosaïque S420-E1 à 20 km/h.*

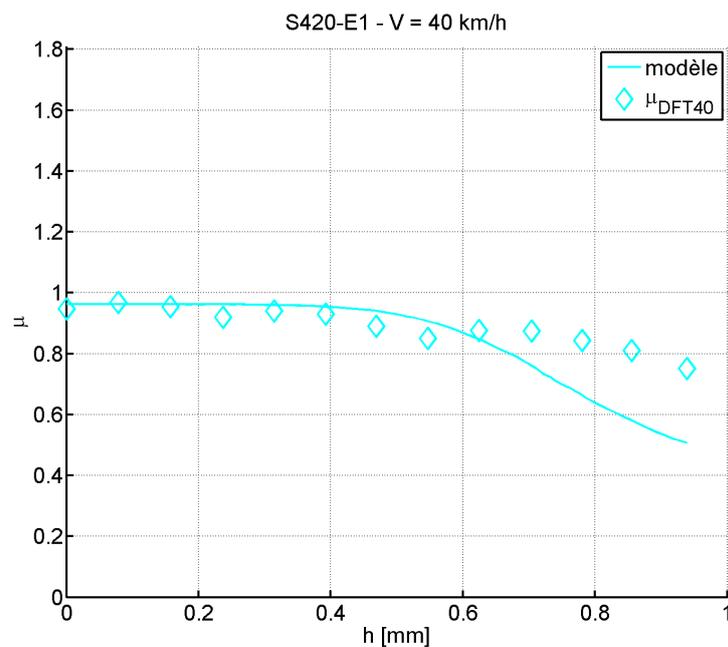


Figure C.7 — *Modèle physique sur la mosaïque S420-E1 à 40 km/h.*

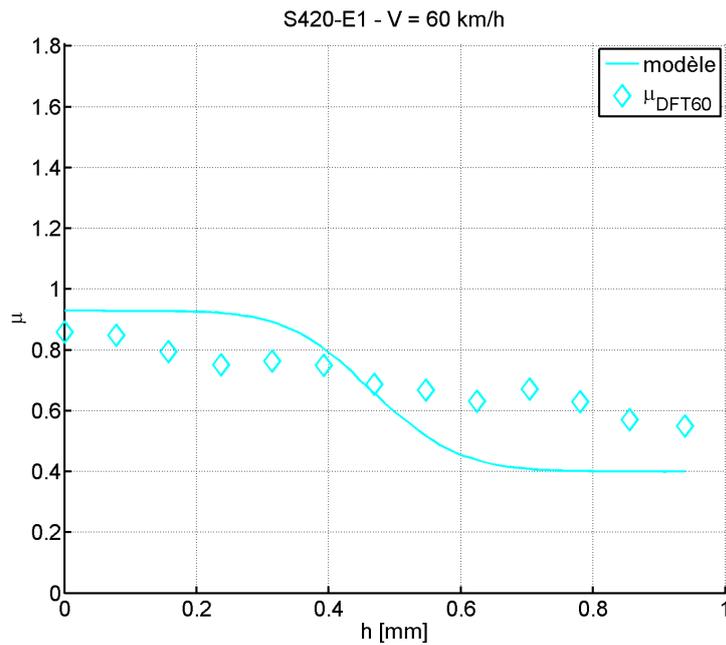


Figure C.8 — *Modèle physique sur la mosaïque S420-E1 à 60 km/h.*

Pesée (g)	h_{eau} (mm)	DFT_{20}	DFT_{40}	DFT_{60}
0	0	1.09	1.06	0.97
8.21	0.087824	1.11	1.06	0.95
17.05	0.18239	1.09	1.03	0.93
26	0.27813	1.11	1.04	0.92
34.86	0.37291	1.07	0.99	0.85
43.85	0.46907	1.06	0.99	0.82
52.91	0.56599	1	0.9	0.77
61.96	0.6628	0.91	0.84	0.74
70.47	0.75383	0.83	0.78	0.7
79.24	0.84765	0.8	0.75	0.67
88.16	0.94307	0.84	0.76	0.64
97.01	1.0377	0.86	0.75	0.64
105.98	1.1337	0.98	0.82	0.64
114.72	1.2272	0.96	0.85	0.7
123.74	1.3237	0.99	0.87	0.72
ASTM	ASTM	0.57	0.5	0.46

Tableau C.5 — *Mesures de frottement sur la mosaïque S420-E2.*

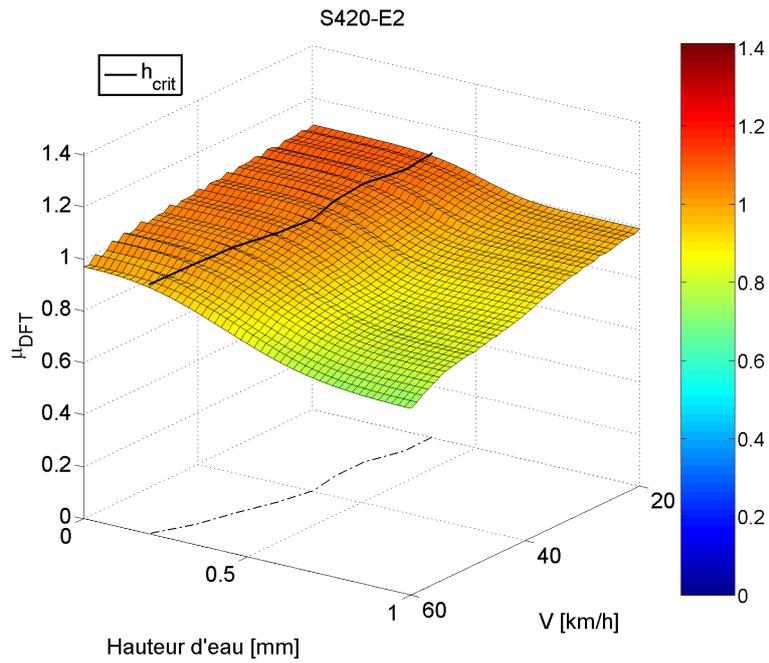


Figure C.9 — Évolution du frottement DFT en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la mosaïque S420-E2.

	$\Delta\mu$	μ_F	h_0	a	h_{crit}
S420-E2 - 20 km/h	0.11	0.99	0.55	5	0.36
S420-E2 - 30 km/h	0.13	0.94	0.5	5	0.33
S420-E2 - 40 km/h	0.19	0.87	0.53	5	0.35
S420-E2 - 50 km/h	0.22	0.82	0.54	3.5	0.29
S420-E2 - 60 km/h	0.25	0.72	0.52	2.56	0.2

Tableau C.6 — Valeurs des coefficients du modèle. Echantillon : S420-E2.

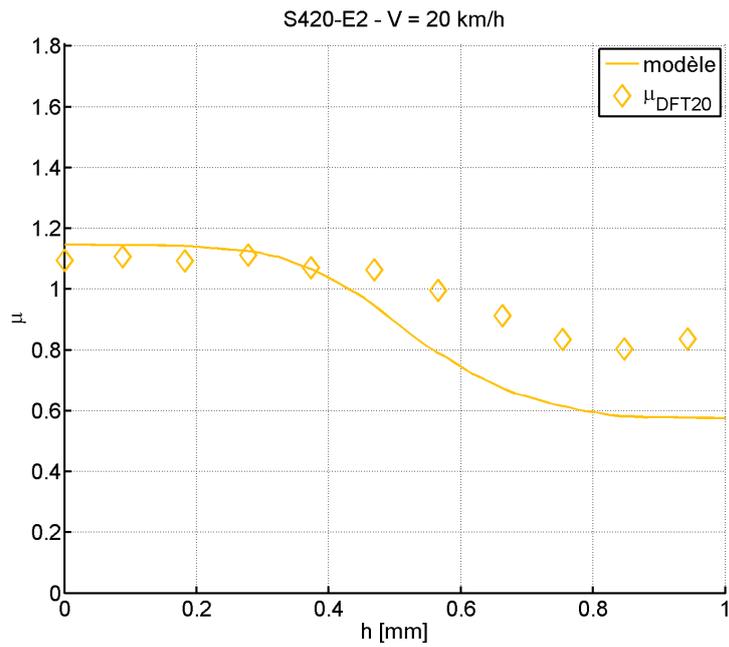


Figure C.10 — *Modèle physique sur la mosaïque S420-E2 à 20 km/h.*

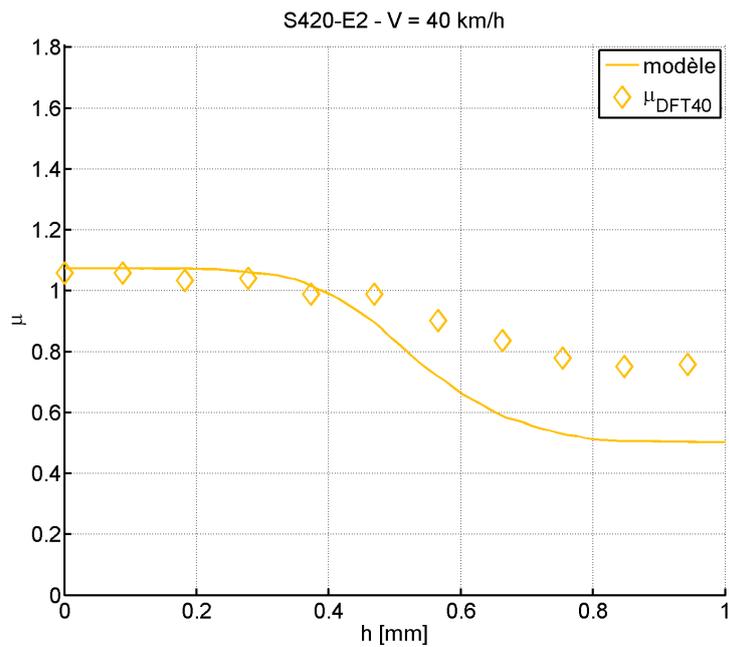


Figure C.11 — *Modèle physique sur la mosaïque S420-E2 à 40 km/h.*

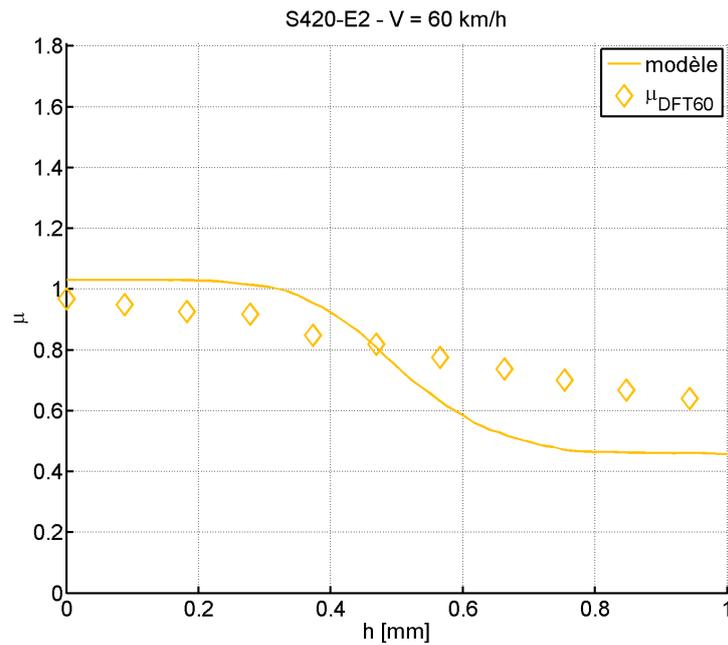


Figure C.12 — *Modèle physique sur la mosaïque S420-E2 à 60 km/h.*

Pesée (g)	h_{eau} (mm)	DFT_{20}	DFT_{40}	DFT_{60}
0	0	1.07	1.04	0.94
9.03	0.096596	1.1	1.05	0.91
18.26	0.19533	1.08	1	0.86
27.61	0.29535	1.08	1	0.83
36.89	0.39462	1.08	1	0.84
45.93	0.49132	1.03	0.93	0.76
55.14	0.58985	0.93	0.87	0.7
64.1	0.68569	0.88	0.81	0.68
73.65	0.78785	0.89	0.82	0.67
83.07	0.88862	0.79	0.73	0.6
92.16	0.98586	0.71	0.67	0.58
101.73	1.0882	0.63	0.6	0.54
111.1	1.1885	0.62	0.59	0.53
120.39	1.2878	0.58	0.56	0.5
129.28	1.3829	0.57	0.54	0.49
ASTM	ASTM	0.58	0.5	0.45

Tableau C.7 — *Mesures de frottement sur la mosaïque S420-E3.*

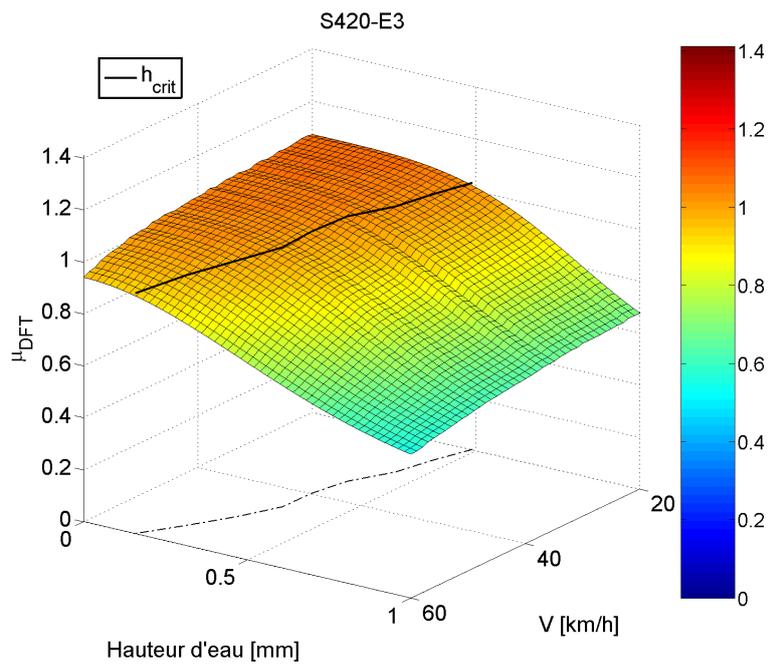


Figure C.13 — Évolution du frottement *DFT* en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la mosaïque *S420-E3*.

	$\Delta\mu$	μ_F	h_0	a	h_{crit}
S420-E3 - 20 km/h	0.5	0.57	0.89	3.66	0.49
S420-E3 - 30 km/h	0.5	0.56	0.87	3.19	0.43
S420-E3 - 40 km/h	0.5	0.54	0.83	2.76	0.35
S420-E3 - 50 km/h	0.5	0.52	0.79	2.51	0.29
S420-E3 - 60 km/h	0.45	0.49	0.71	1.9	0.16

Tableau C.8 — Valeurs des coefficients du modèle. Échantillon : *S420-E3*.

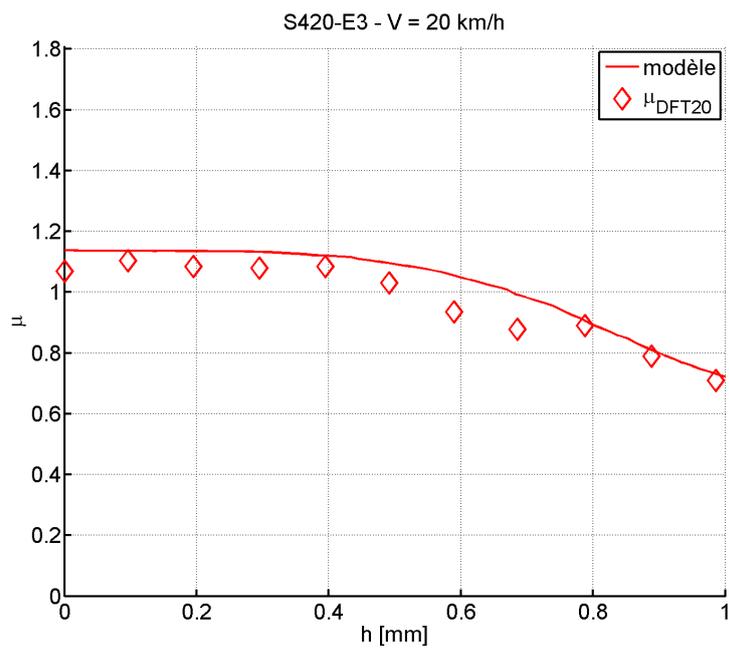


Figure C.14 — *Modèle physique sur la mosaïque S420-E3 à 20 km/h.*

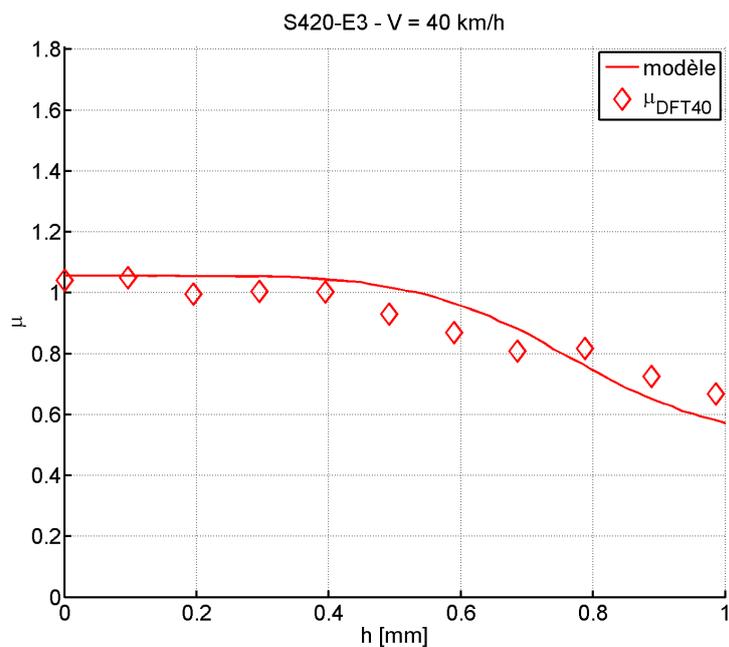


Figure C.15 — *Modèle physique sur la mosaïque S420-E3 à 40 km/h.*

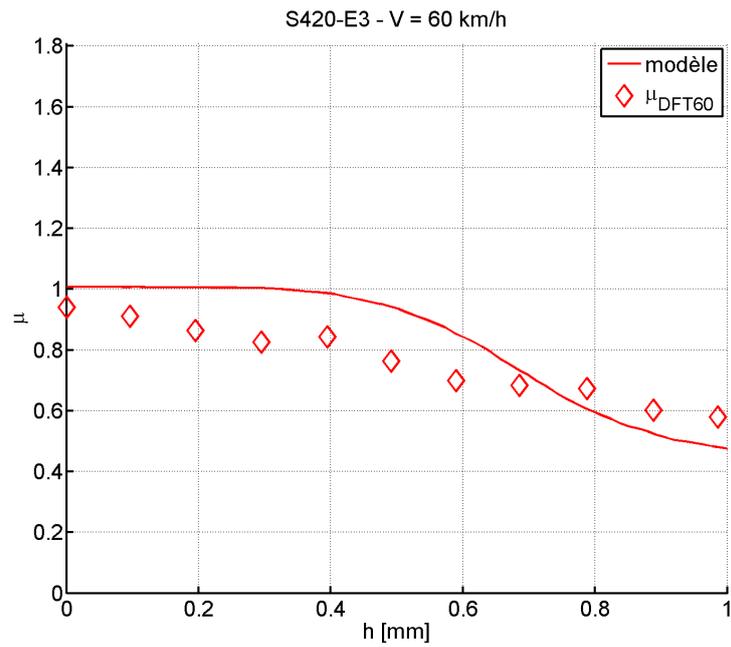


Figure C.16 — *Modèle physique sur la mosaïque S420-E3 à 60 km/h.*

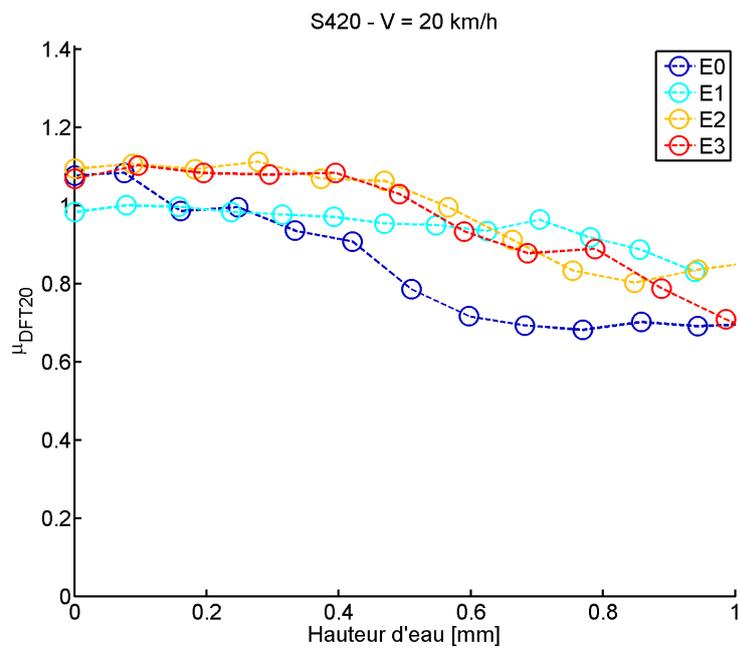


Figure C.17 — *Évolution du frottement DFT en fonction de la hauteur d'eau sur la mosaïque S420 à 20 km/h.*

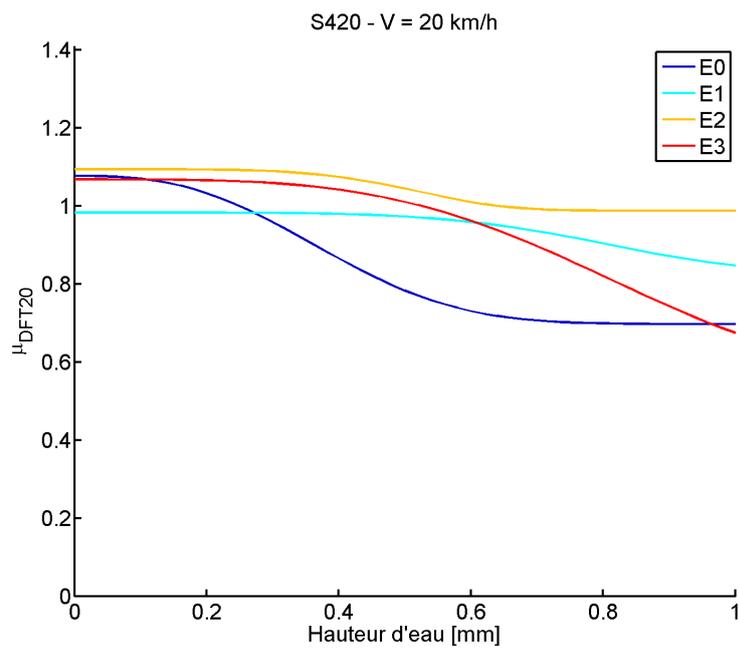


Figure C.18 — Modèle mathématique sur la mosaïque S420 à 20 km/h.

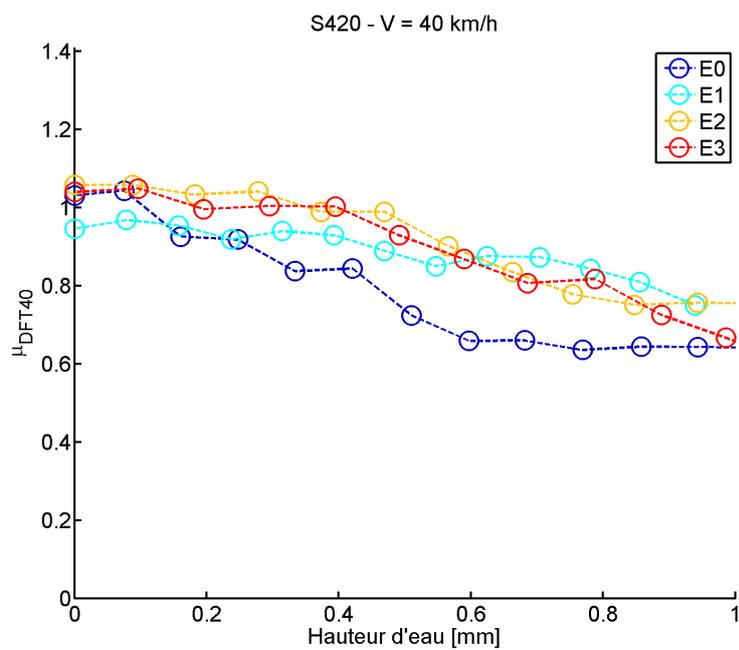


Figure C.19 — Évolution du frottement DFT en fonction de la hauteur d'eau sur la mosaïque S420 à 40 km/h.

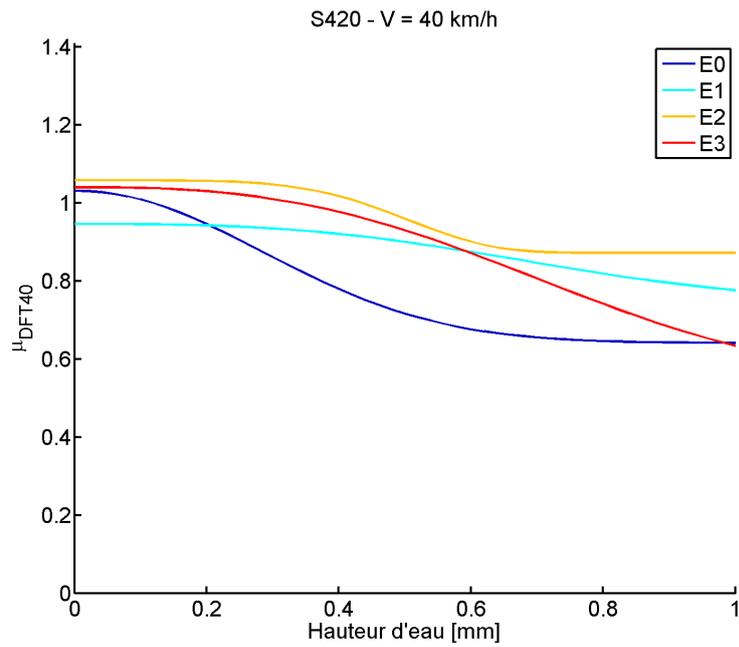


Figure C.20 — *Modèle mathématique sur la mosaïque S420 à 40 km/h.*

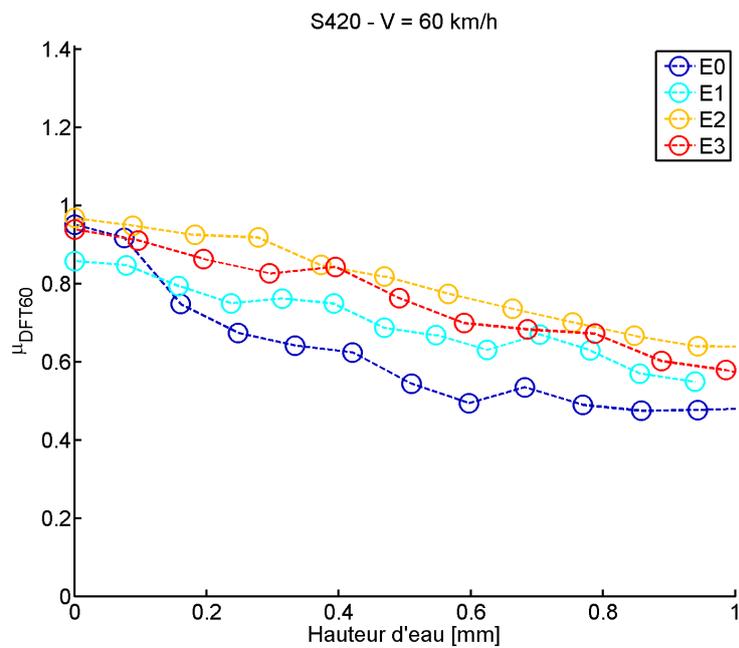


Figure C.21 — *Évolution du frottement DFT en fonction de la hauteur d'eau sur la mosaïque S420 à 60 km/h.*

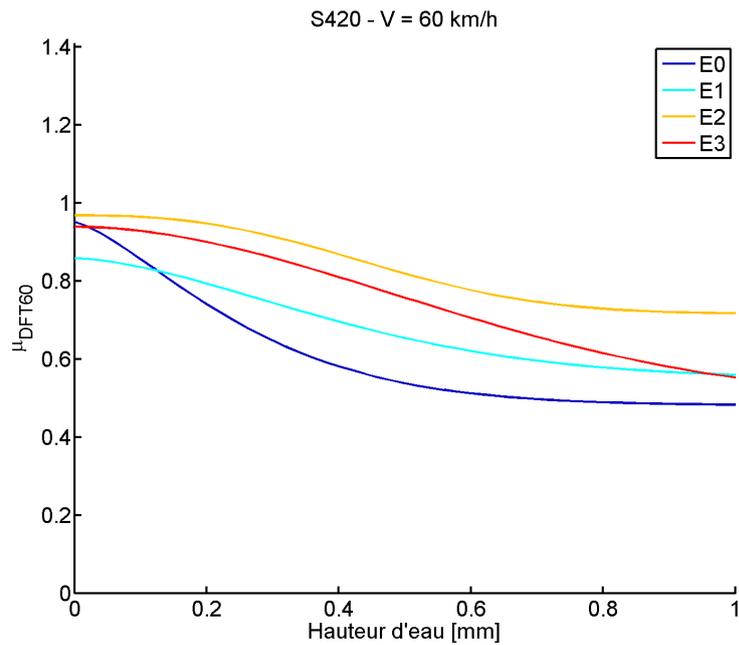


Figure C.22 — Modèle mathématique sur la mosaïque S420 à 60 km/h.

C.2 Échantillon S590

Pesée (g)	h_{eau} (mm)	DFT_{20}	DFT_{40}	DFT_{60}
0	0	1.3	1.22	1.13
8	0.085578	0.84	0.76	0.42
16.51	0.17661	0.59	0.57	0.31
25.31	0.27075	0.3	0.29	0.27
33.77	0.36125	0.28	0.27	0.25
41.83	0.44747	0.27	0.26	0.24
49.48	0.5293	0.26	0.24	0.22
57.53	0.61541	0.25	0.24	0.21
65.94	0.70538	0.26	0.24	0.22
75.14	0.80379	0.24	0.22	0.2
84.14	0.90007	0.24	0.22	0.2
92.39	0.98832	0.24	0.22	0.2
101.02	1.0806	0.24	0.21	0.19
ASTM	ASTM	0.24	0.21	0.19

Tableau C.9 — Mesures de frottement sur la mosaïque S590-E0.

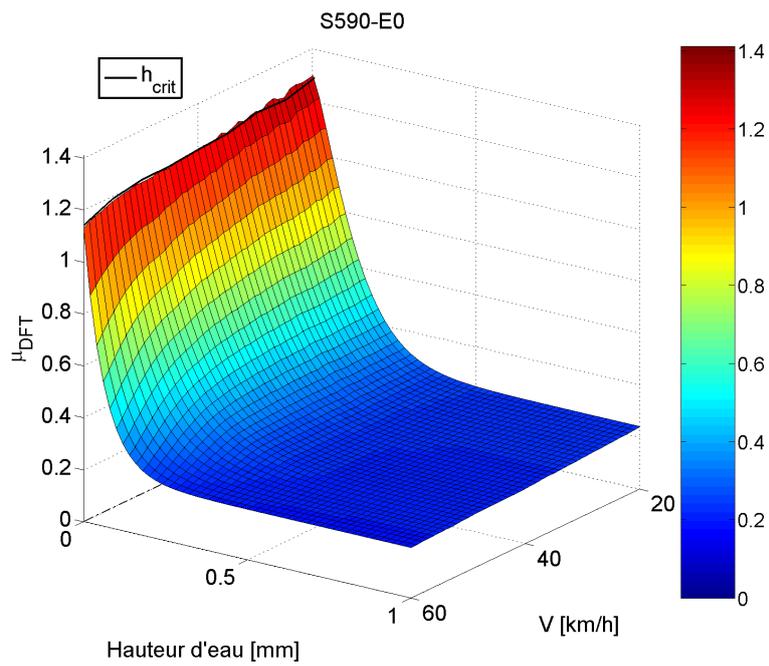


Figure C.23 — Évolution du frottement DFT en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la mosaïque S590-E0.

	$\Delta\mu$	μ_F	h_0	a	h_{crit}
S590-E0 - 20 km/h	1.06	0.24	0.14	1.29	0.01
S590-E0 - 30 km/h	1.04	0.23	0.14	1.23	0
S590-E0 - 40 km/h	1.01	0.21	0.14	1.14	0
S590-E0 - 50 km/h	0.99	0.2	0.12	1	0
S590-E0 - 60 km/h	0.94	0.19	0.06	1	0

Tableau C.10 — Valeurs des coefficients du modèle. Échantillon : S590-E0.

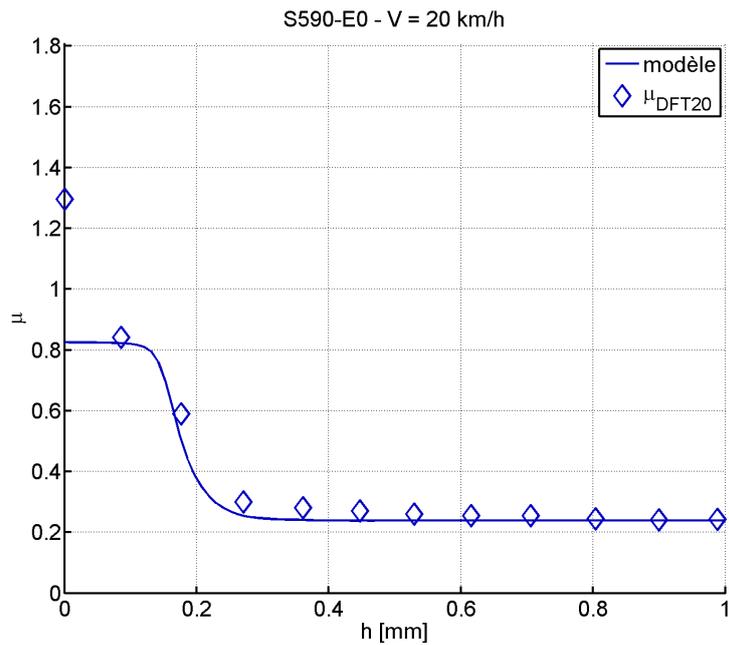


Figure C.24 — *Modèle physique sur la mosaïque S590-E0 à 20 km/h.*

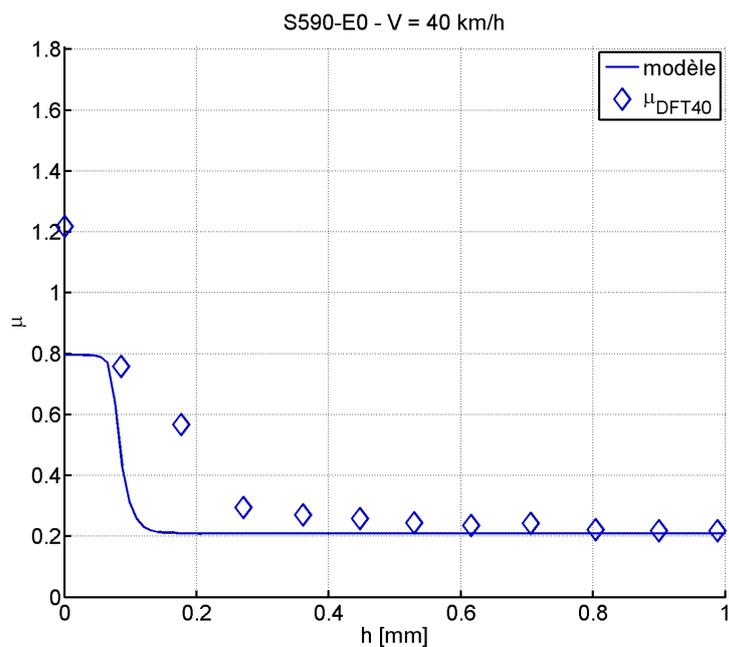


Figure C.25 — *Modèle physique sur la mosaïque S590-E0 à 40 km/h.*

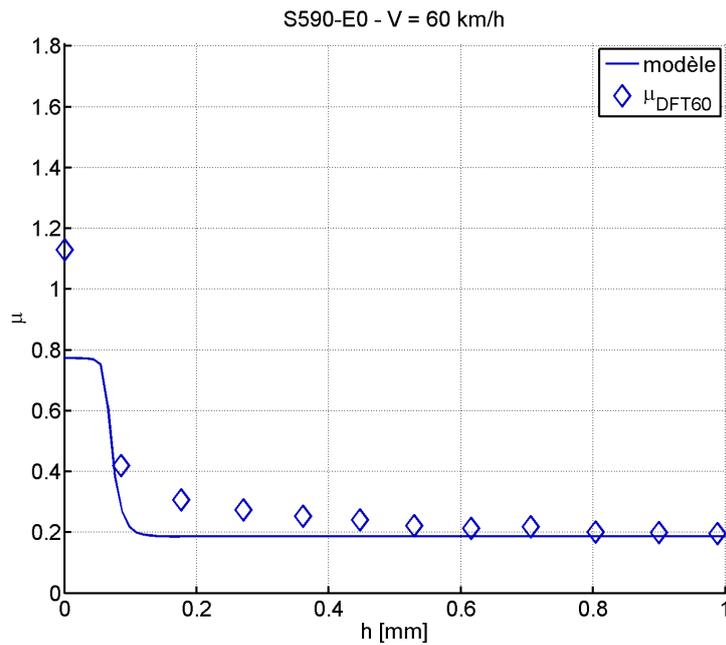


Figure C.26 — *Modèle physique sur la mosaïque S590-E0 à 60 km/h.*

Pesée (g)	h_{eau} (mm)	DFT_{20}	DFT_{40}	DFT_{60}
0	0	1.14	1.07	0.96
9.06	0.096917	0.96	0.92	0.76
17.99	0.19244	0.76	0.73	0.58
27.48	0.29396	0.43	0.4	0.37
36.88	0.39451	0.36	0.33	0.32
45.7	0.48886	0.32	0.29	0.28
55.22	0.5907	0.3	0.28	0.26
64.51	0.69008	0.29	0.27	0.25
72.93	0.78015	0.28	0.27	0.25
82.21	0.87942	0.27	0.26	0.25
90.96	0.97302	0.28	0.27	0.25
100.07	1.0705	0.27	0.26	0.25
108.91	1.165	0.27	0.25	0.25
ASTM	ASTM	0.3	0.28	0.25

Tableau C.11 — *Mesures de frottement sur la mosaïque S590-E1.*

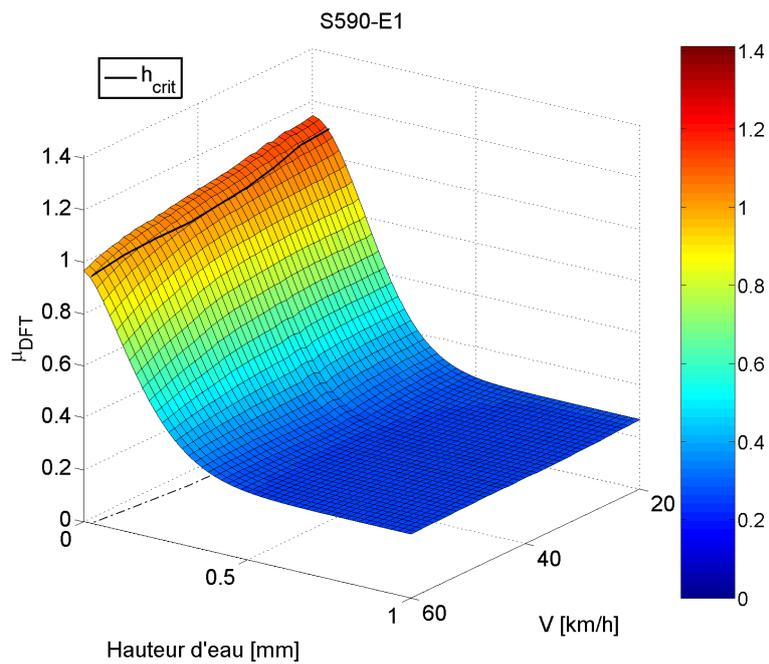


Figure C.27 — Évolution du frottement DFT en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la mosaïque S590-E1.

	$\Delta\mu$	μ_F	h_0	a	h_{crit}
S590-E1 - 20 km/h	0.88	0.27	0.23	1.88	0.05
S590-E1 - 30 km/h	0.85	0.26	0.24	1.97	0.06
S590-E1 - 40 km/h	0.82	0.25	0.23	2.08	0.06
S590-E1 - 50 km/h	0.78	0.25	0.23	1.88	0.05
S590-E1 - 60 km/h	0.72	0.25	0.21	1.54	0.02

Tableau C.12 — Valeurs des coefficients du modèle. Echantillon : S590-E1.

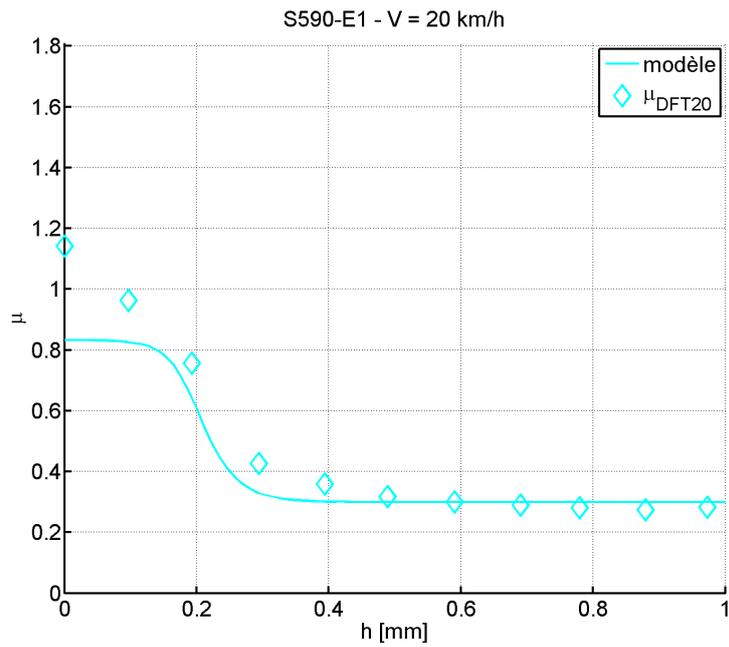


Figure C.28 — *Modèle physique sur la mosaïque S590-E1 à 20 km/h.*

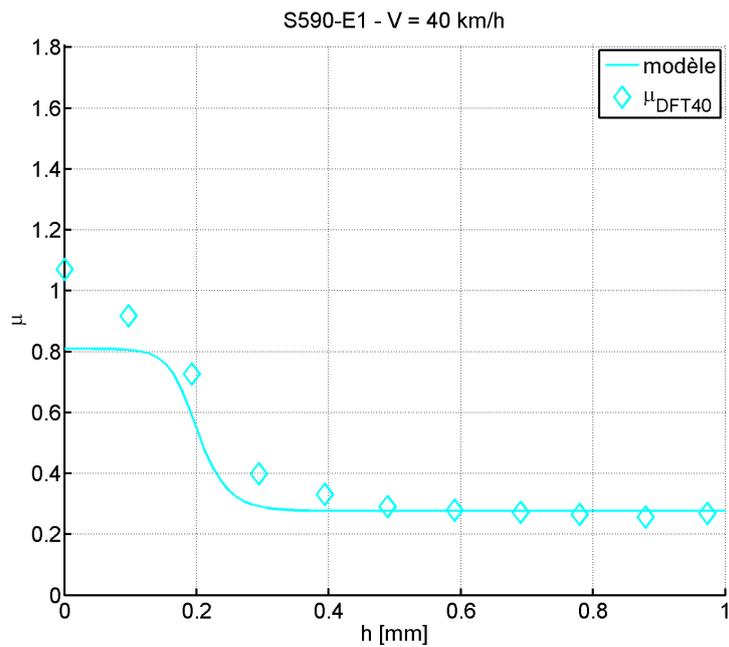


Figure C.29 — *Modèle physique sur la mosaïque S590-E1 à 40 km/h.*

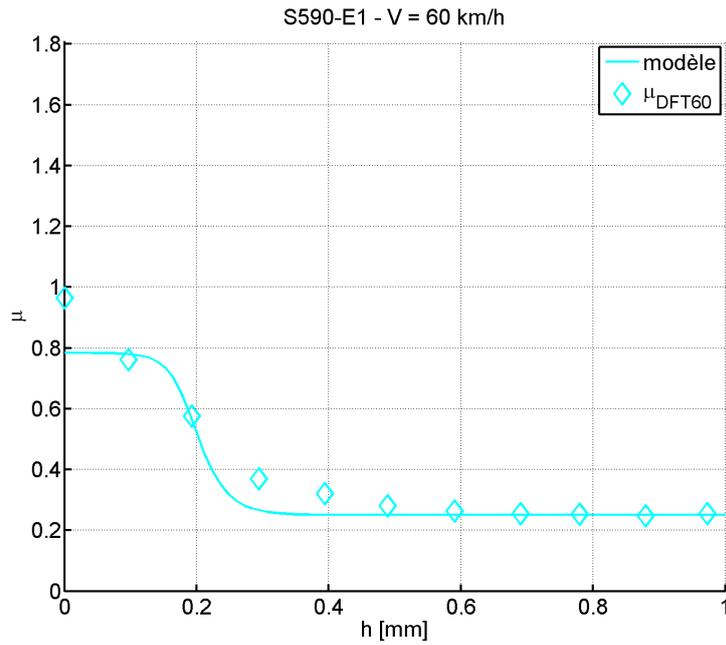


Figure C.30 — *Modèle physique sur la mosaïque S590-E1 à 60 km/h.*

Pesée (g)	h_{eau} (mm)	DFT_{20}	DFT_{40}	DFT_{60}
0	0	1.09	1.03	0.94
9.03	0.096596	1.02	0.97	0.83
18.73	0.20036	0.87	0.84	0.7
27.58	0.29503	0.72	0.72	0.58
36.79	0.39355	0.48	0.48	0.43
46.3	0.49528	0.41	0.41	0.39
55.57	0.59445	0.39	0.38	0.37
65	0.69532	0.38	0.36	0.35
73.73	0.78871	0.36	0.35	0.34
81.64	0.87332	0.36	0.34	0.34
90.85	0.97184	0.37	0.35	0.35
99.74	1.0669	0.34	0.34	0.33
108.74	1.1632	0.36	0.35	0.34
ASTM	ASTM	0.36	0.32	0.31

Tableau C.13 — *Mesures de frottement sur la mosaïque S590-E2.*

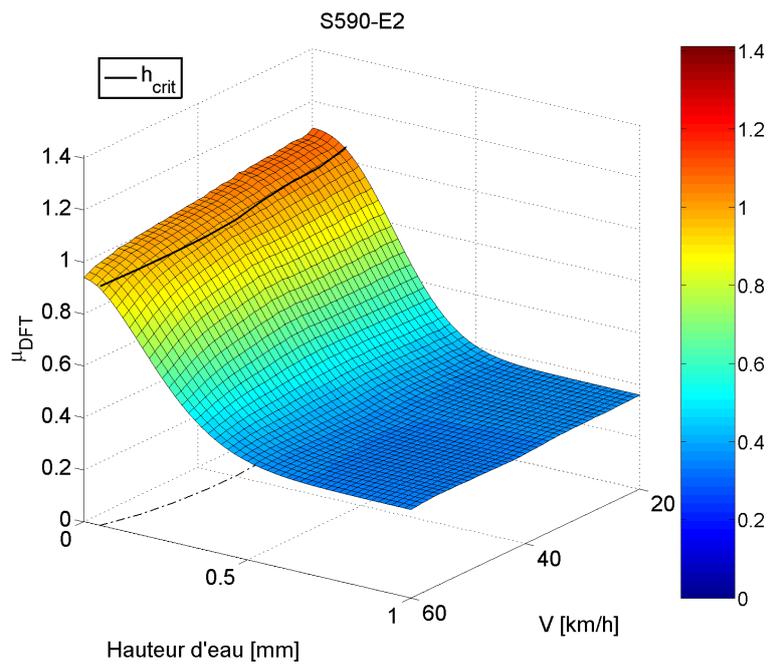


Figure C.31 — Évolution du frottement DFT en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la mosaïque S590-E2.

	$\Delta\mu$	μ_F	h_0	a	h_{crit}
S590-E2 - 20 km/h	0.73	0.36	0.31	2.31	0.1
S590-E2 - 30 km/h	0.7	0.36	0.32	2.32	0.11
S590-E2 - 40 km/h	0.68	0.35	0.33	2.41	0.12
S590-E2 - 50 km/h	0.65	0.35	0.32	2.3	0.1
S590-E2 - 60 km/h	0.6	0.34	0.28	1.76	0.05

Tableau C.14 — Valeurs des coefficients du modèle. Échantillon : S590-E2.

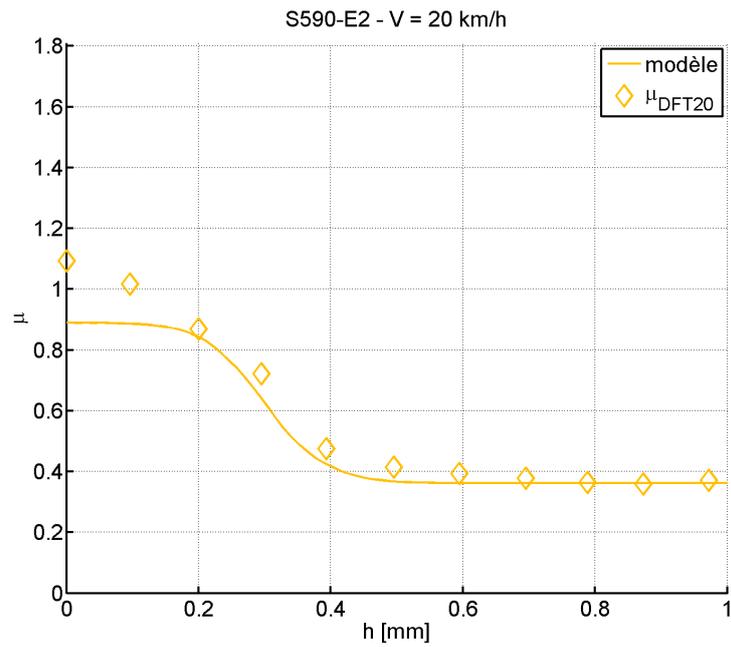


Figure C.32 — *Modèle physique sur la mosaïque S590-E2 à 20 km/h.*

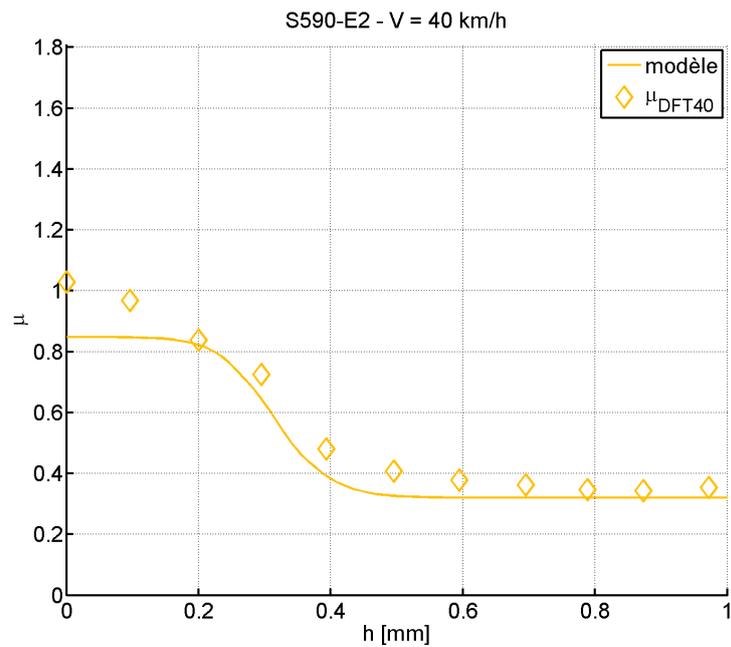


Figure C.33 — *Modèle physique sur la mosaïque S590-E2 à 40 km/h.*

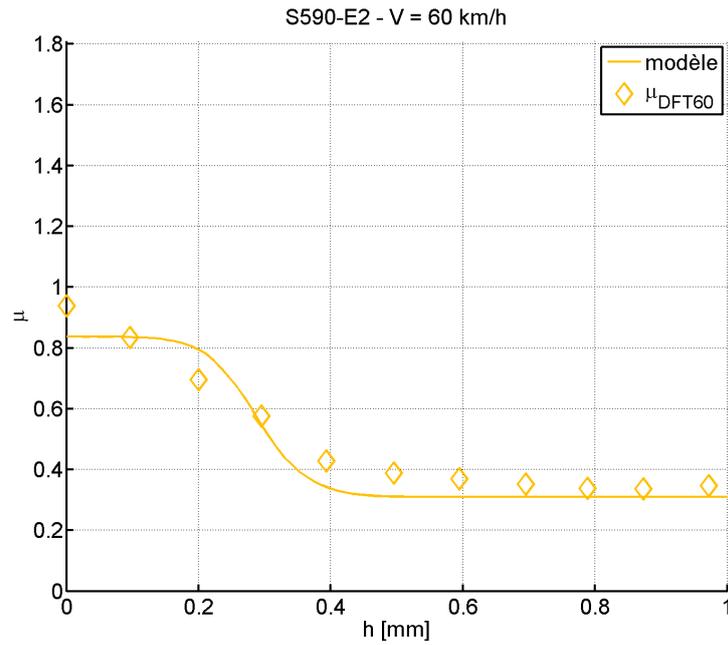


Figure C.34 — *Modèle physique sur la mosaïque S590-E2 à 60 km/h.*

Pesée (g)	h_{eau} (mm)	DFT_{20}	DFT_{40}	DFT_{60}
0	0	1.09	1.04	0.93
8.68	0.092852	1.06	1.02	0.87
17.58	0.18806	1.01	0.96	0.77
26.41	0.28251	0.95	0.89	0.72
35.11	0.37558	0.7	0.67	0.51
43.7	0.46747	0.49	0.51	0.44
52.19	0.55829	0.42	0.42	0.39
60.95	0.652	0.41	0.39	0.38
69.71	0.74571	0.4	0.4	0.38
78.05	0.83492	0.39	0.37	0.36
86.66	0.92702	0.37	0.36	0.35
95.63	1.023	0.37	0.36	0.35
104.21	1.1148	0.4	0.39	0.39
ASTM	ASTM	0.38	0.34	0.33

Tableau C.15 — *Mesures de frottement sur la mosaïque S590-E3.*

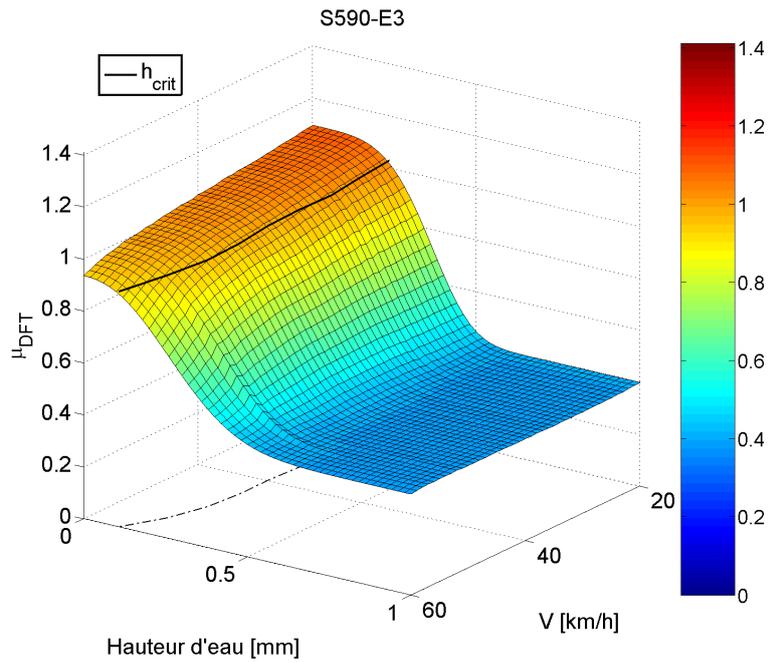


Figure C.35 — Évolution du frottement DFT en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la mosaïque S590-E3.

	$\Delta\mu$	μ_F	h_0	a	h_{crit}
S590-E3 - 20 km/h	0.7	0.4	0.39	4.09	0.23
S590-E3 - 30 km/h	0.67	0.39	0.4	3.99	0.23
S590-E3 - 40 km/h	0.64	0.39	0.4	3.59	0.21
S590-E3 - 50 km/h	0.61	0.39	0.39	3.47	0.2
S590-E3 - 60 km/h	0.55	0.39	0.33	2.29	0.11

Tableau C.16 — Valeurs des coefficients du modèle. Echantillon : S590-E3.

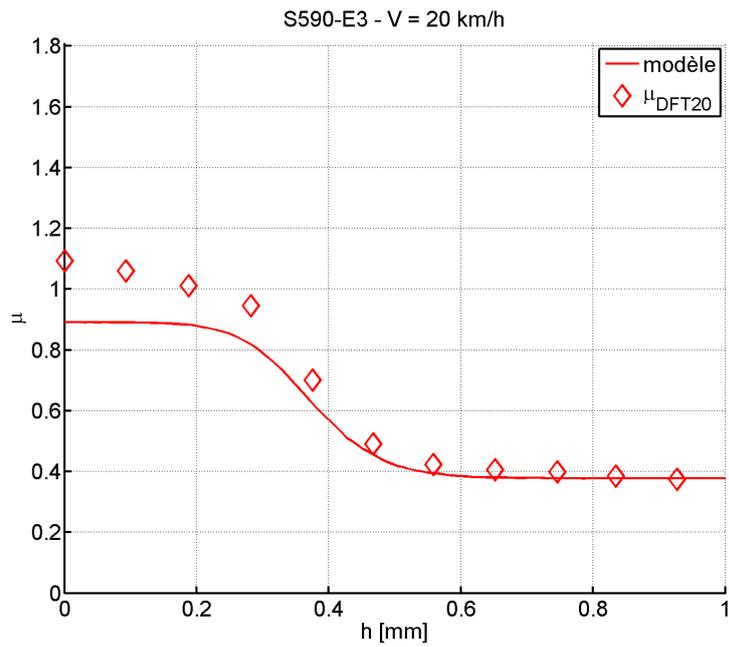


Figure C.36 — *Modèle physique sur la mosaïque S590-E3 à 20 km/h.*

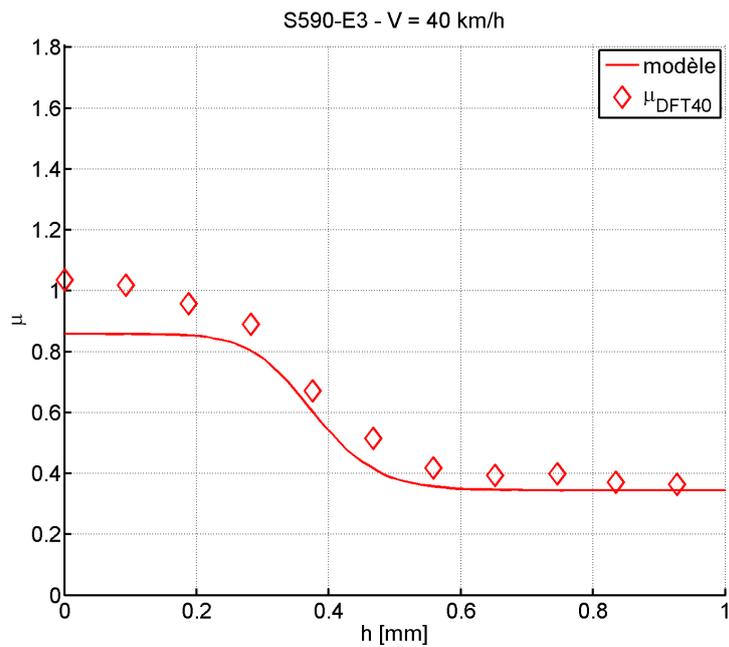


Figure C.37 — *Modèle physique sur la mosaïque S590-E3 à 40 km/h.*

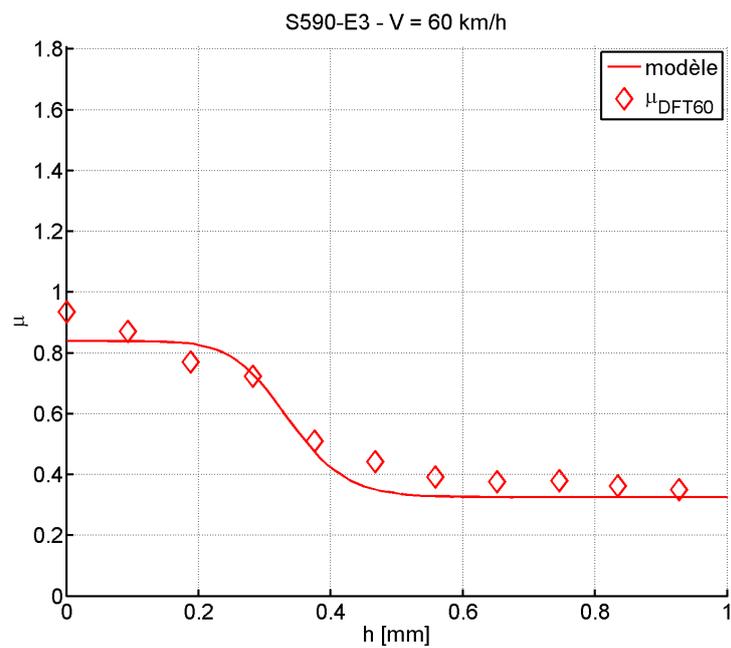


Figure C.38 — Modèle physique sur la mosaïque S590-E3 à 60 km/h.

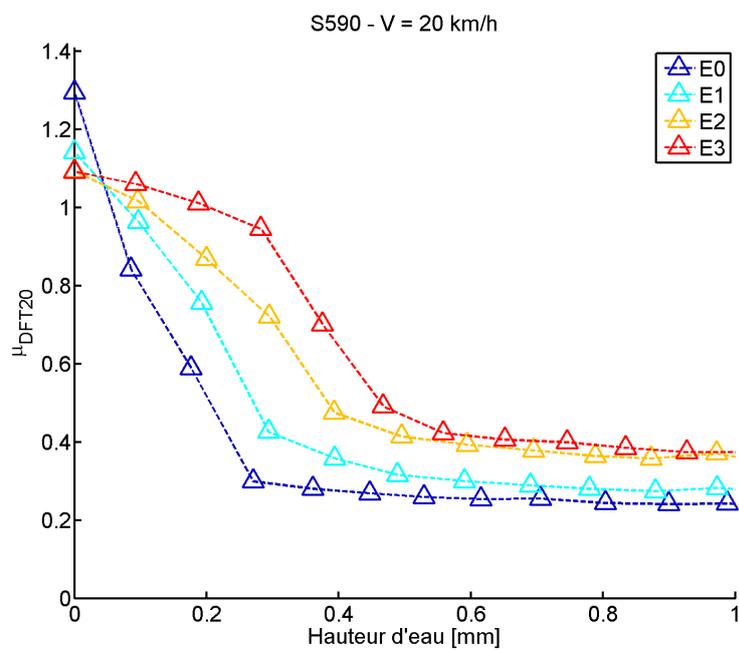


Figure C.39 — Évolution du frottement DFT en fonction de la hauteur d'eau sur la mosaïque S590 à 20 km/h.

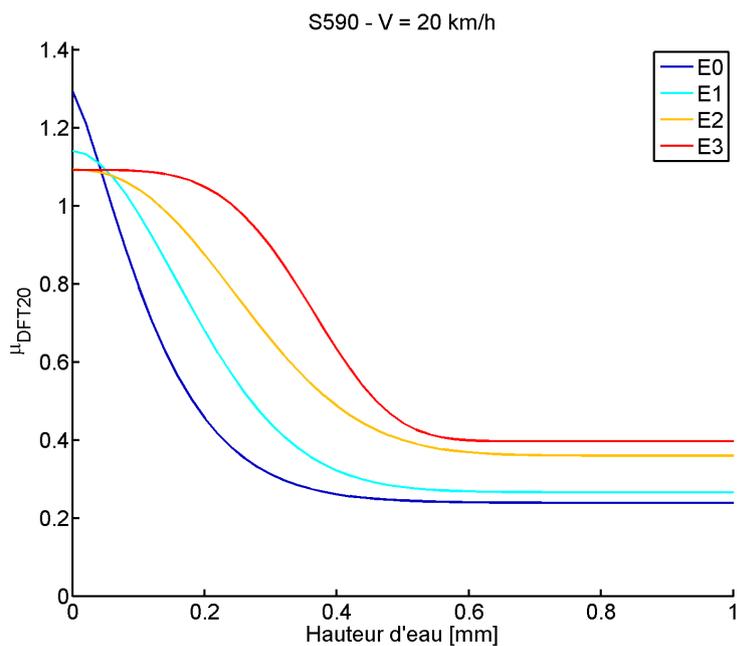


Figure C.40 — *Modèle mathématique sur la mosaïque S590 à 20 km/h.*

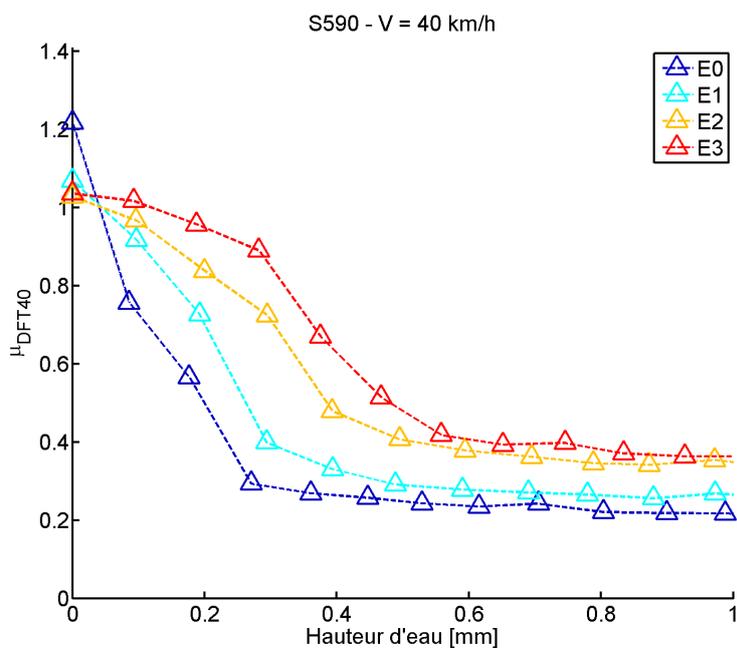


Figure C.41 — *Évolution du frottement DFT en fonction de la hauteur d'eau sur la mosaïque S590 à 40 km/h.*

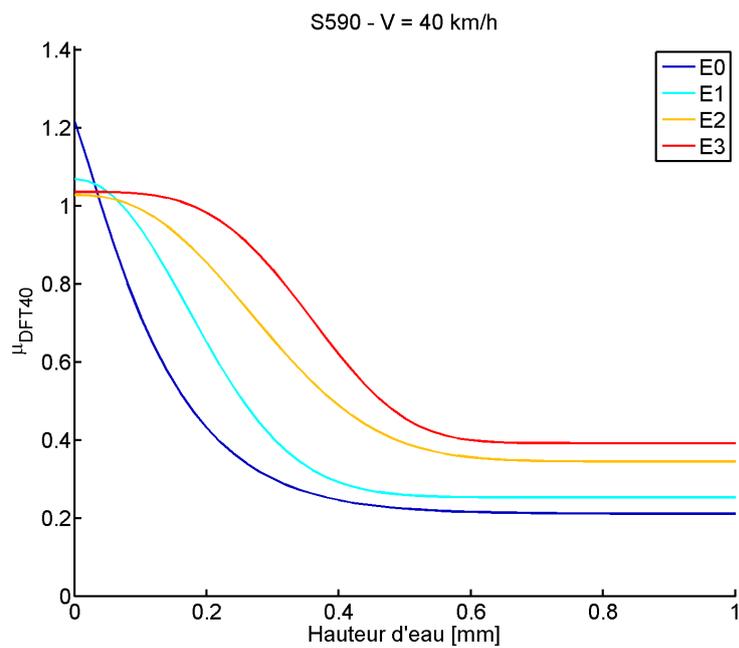


Figure C.42 — Modèle mathématique sur la mosaïque S590 à 40 km/h.

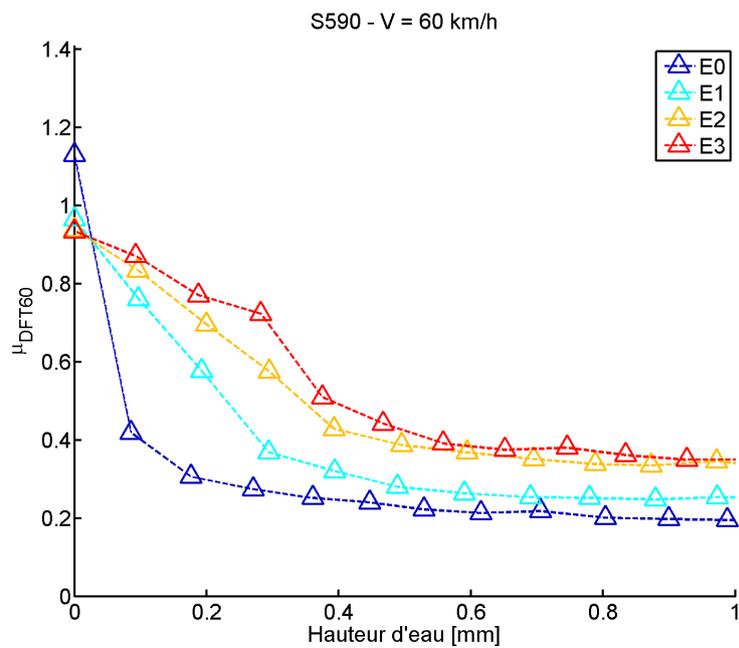


Figure C.43 — Évolution du frottement DFT en fonction de la hauteur d'eau sur la mosaïque S590 à 60 km/h.

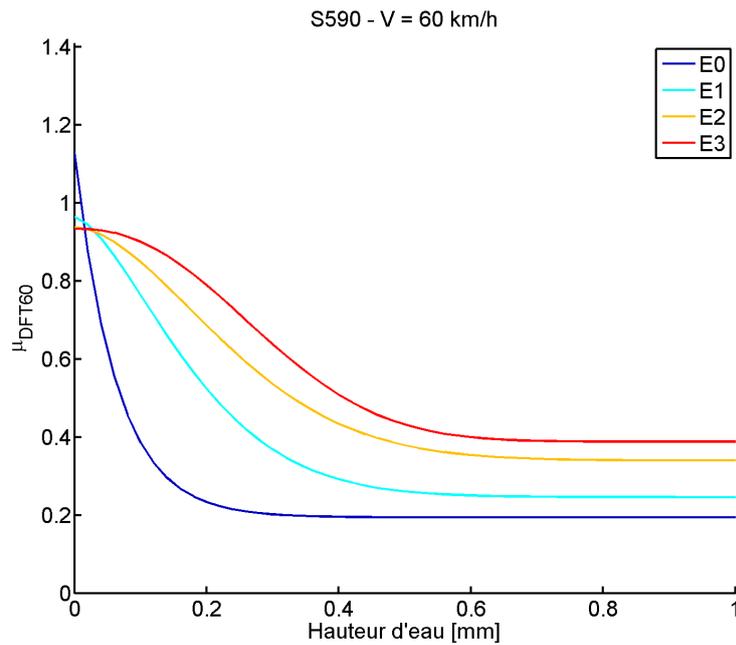


Figure C.44 — Modèle mathématique sur la mosaïque S590 à 60 km/h.

C.3 Échantillon G800

Pesée (g)	h_{eau} (mm)	DFT_{20}	DFT_{40}	DFT_{60}
0	0	1.17	1.12	0.96
6.27	0.067072	1.16	1.13	0.91
12.4	0.13265	1.1	1.03	0.81
18.84	0.20154	1.03	0.95	0.73
25.38	0.2715	1.11	1.02	0.67
31.87	0.34092	1.08	0.96	0.66
38.4	0.41077	1.03	0.95	0.6
44.98	0.48116	1.11	0.99	0.6
51.61	0.55208	1.1	1.01	0.63
58.18	0.62237	1.09	0.99	0.65
64.62	0.69126	1.11	0.99	0.63
71.38	0.76357	1.02	0.87	0.51
78.26	0.83717	0.93	0.75	0.42
84.77	0.90681	0.87	0.71	0.43
91.31	0.97677	1	0.82	0.42
ASTM	ASTM	0.33	0.29	0.28

Tableau C.17 — Mesures de frottement sur la mosaïque G800-E0.

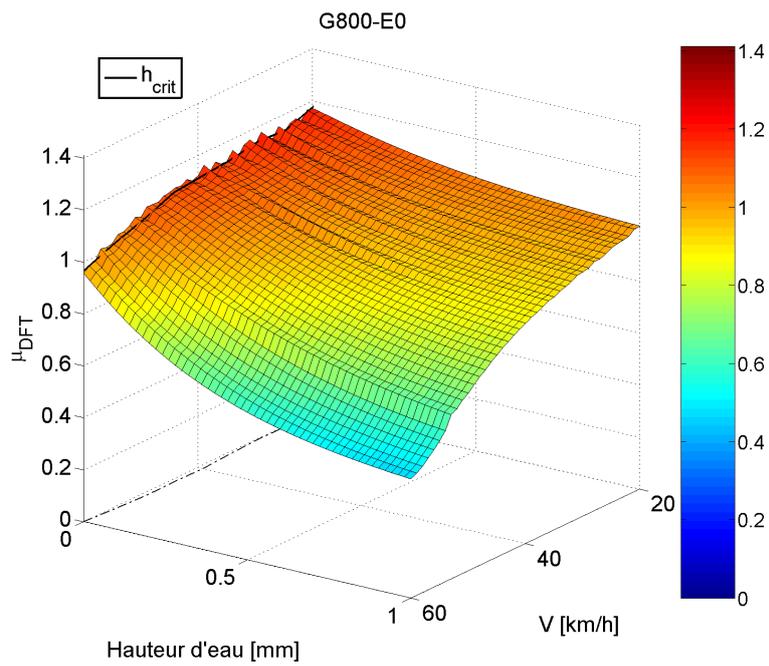


Figure C.45 — Évolution du frottement DFT en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la mosaïque G800-E0.

	$\Delta\mu$	μ_F	h_0	a	h_{crit}
G800-E0 - 20 km/h	0.17	1	0.43	1.1	0
G800-E0 - 30 km/h	0.21	0.92	0.45	1.13	0
G800-E0 - 40 km/h	0.31	0.82	0.52	1.26	0.02
G800-E0 - 50 km/h	0.44	0.63	0.56	1.24	0.02
G800-E0 - 60 km/h	0.53	0.42	0.39	1.03	0

Tableau C.18 — Valeurs des coefficients du modèle. Echantillon : G800-E0.

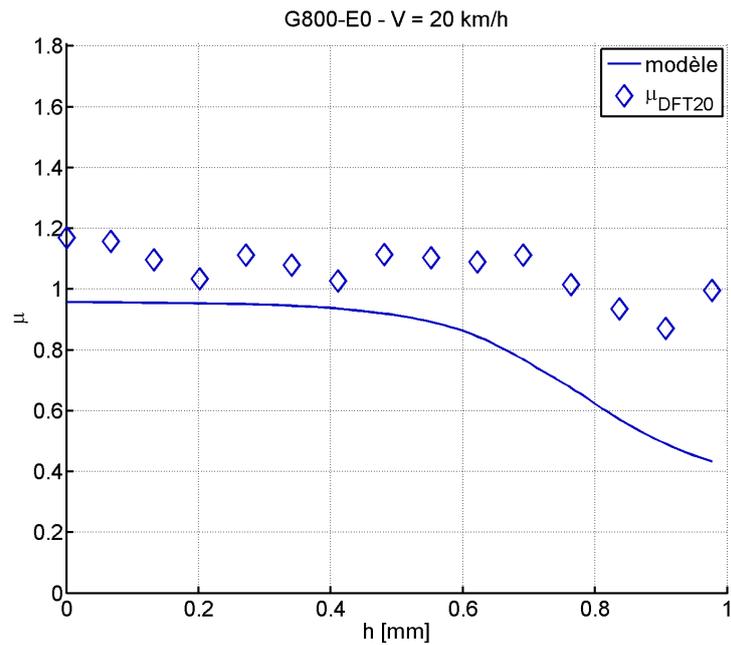


Figure C.46 — *Modèle physique sur la mosaïque G800-E0 à 20 km/h.*

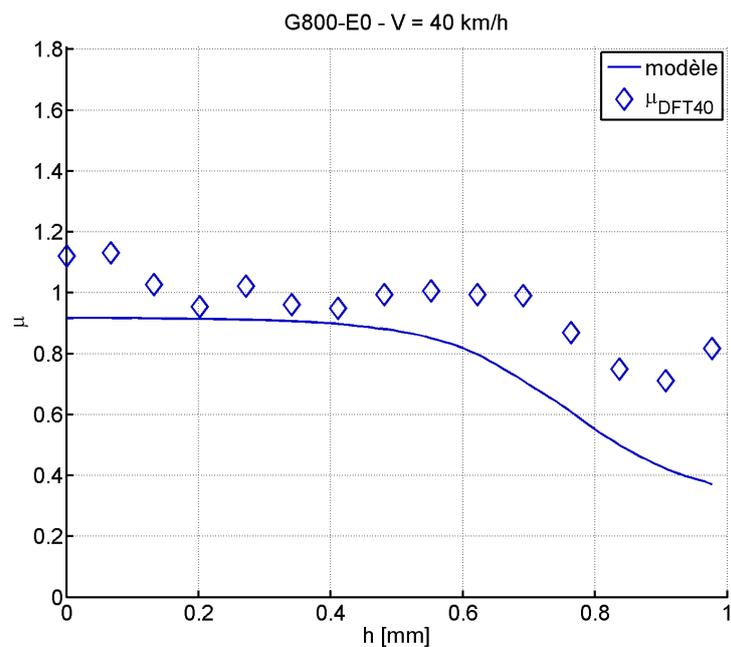


Figure C.47 — *Modèle physique sur la mosaïque G800-E0 à 40 km/h.*

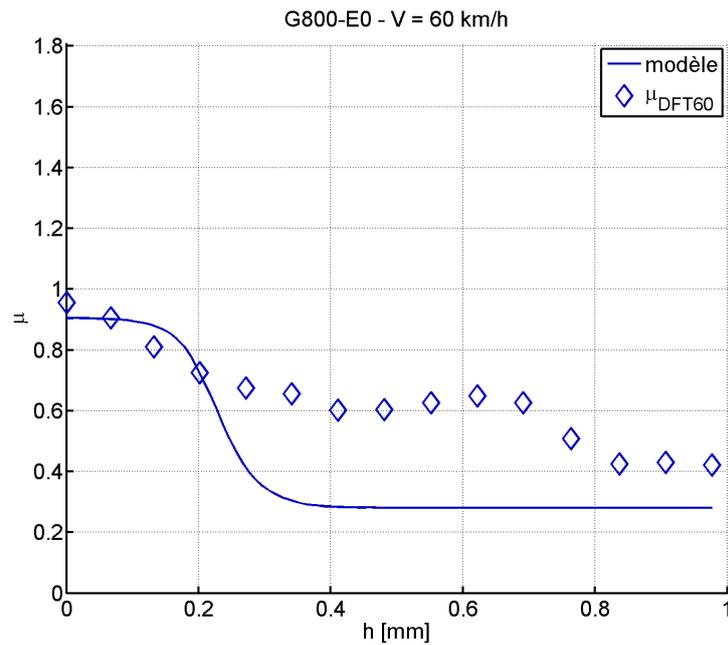


Figure C.48 — *Modèle physique sur la mosaïque G800-E0 à 60 km/h.*

Pesée (g)	h_{eau} (mm)	DFT_{20}	DFT_{40}	DFT_{60}
0	0	1.17	1.09	0.99
6.44	0.06889	1.17	1.1	0.99
12.82	0.13714	1.12	1.07	0.92
19.22	0.2056	1.14	1.09	0.93
25.61	0.27396	1.1	1.06	0.89
32.26	0.34509	1.12	1.03	0.83
38.9	0.41612	1.1	1.04	0.82
45.51	0.48683	1.1	1	0.78
52.21	0.5585	1.08	0.98	0.73
58.91	0.63017	1.05	0.94	0.68
65.67	0.70249	0.98	0.86	0.64
72.28	0.7732	0.98	0.86	0.61
78.99	0.84498	0.83	0.73	0.56
85.76	0.9174	0.71	0.67	0.56
92.21	0.98639	0.74	0.67	0.55
ASTM	ASTM	0.52	0.45	0.42

Tableau C.19 — *Mesures de frottement sur la mosaïque G800-E1.*

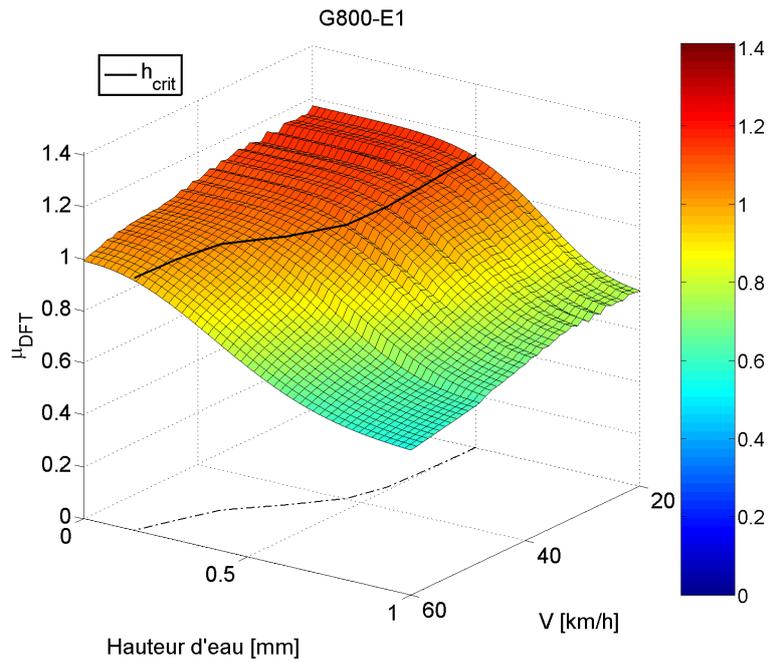


Figure C.49 — Évolution du frottement DFT en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la mosaïque G800-E1.

	$\Delta\mu$	μ_F	h_0	a	h_{crit}
G800-E1 - 20 km/h	0.42	0.74	0.75	5	0.5
G800-E1 - 30 km/h	0.39	0.74	0.74	5	0.49
G800-E1 - 40 km/h	0.42	0.67	0.72	4.46	0.45
G800-E1 - 50 km/h	0.46	0.59	0.6	2.7	0.25
G800-E1 - 60 km/h	0.44	0.55	0.53	2.17	0.15

Tableau C.20 — Valeurs des coefficients du modèle. Échantillon : G800-E1.

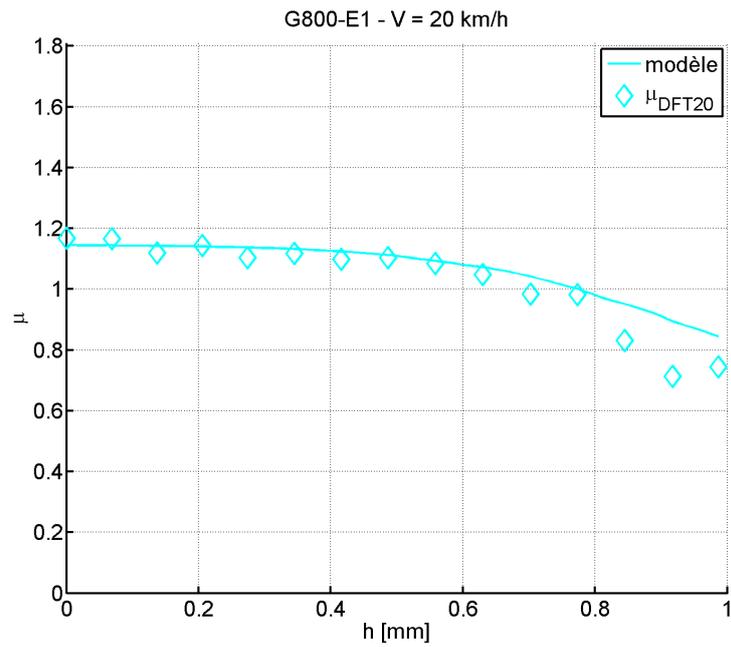


Figure C.50 — *Modèle physique sur la mosaïque G800-E1 à 20 km/h.*

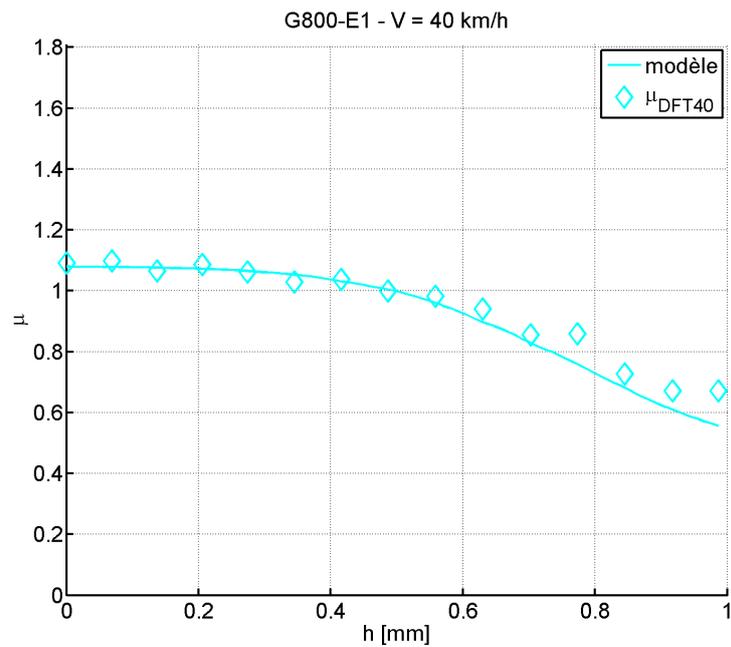


Figure C.51 — *Modèle physique sur la mosaïque G800-E1 à 40 km/h.*

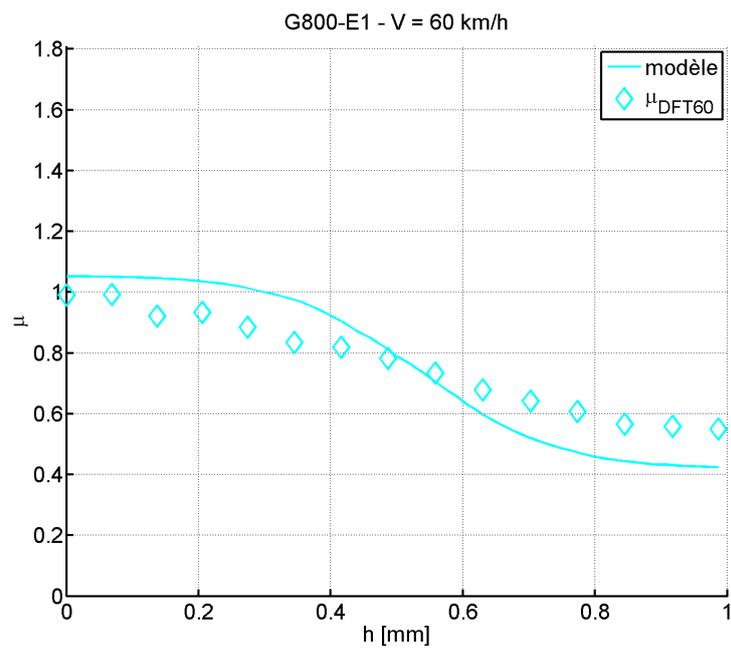


Figure C.52 — *Modèle physique sur la mosaïque G800-E1 à 60 km/h.*

Pesée (g)	h_{eau} (mm)	DFT_{20}	DFT_{40}	DFT_{60}
0	0	1.13	1.07	0.96
6.28	0.067179	1.17	1.09	1
12.48	0.1335	1.15	1.08	0.97
18.73	0.20036	1.15	1.1	0.97
25.09	0.26839	1.14	1.11	0.97
31.4	0.33589	1.13	1.1	0.96
37.75	0.40382	1.13	1.08	0.92
44.21	0.47293	1.15	1.08	0.9
50.76	0.54299	1.15	1.06	0.85
57.43	0.61434	1.08	1	0.81
63.74	0.68184	1.04	0.94	0.75
69.94	0.74817	0.97	0.88	0.69
76.41	0.81738	0.94	0.87	0.68
82.95	0.88734	0.89	0.82	0.64
89.37	0.95601	0.79	0.72	0.59
ASTM	ASTM	0.55	0.47	0.45

Tableau C.21 — *Mesures de frottement sur la mosaïque G800-E2.*

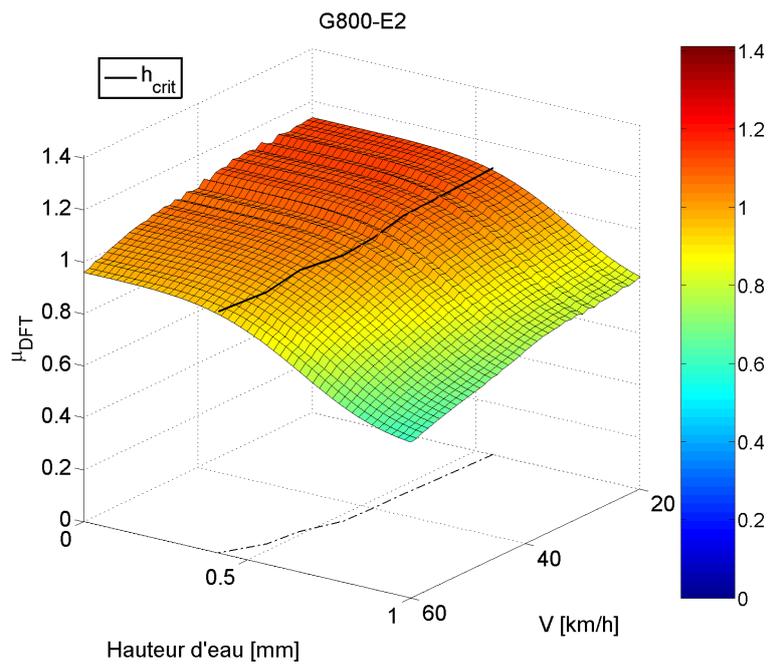


Figure C.53 — Évolution du frottement DFT en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la mosaïque G800-E2.

	$\Delta\mu$	μ_F	h_0	a	h_{crit}
G800-E2 - 20 km/h	0.35	0.79	0.83	5	0.55
G800-E2 - 30 km/h	0.36	0.75	0.82	5	0.54
G800-E2 - 40 km/h	0.35	0.72	0.81	5	0.54
G800-E2 - 50 km/h	0.4	0.65	0.79	4.33	0.49
G800-E2 - 60 km/h	0.37	0.59	0.72	3.87	0.41

Tableau C.22 — Valeurs des coefficients du modèle. Echantillon : G800-E2.

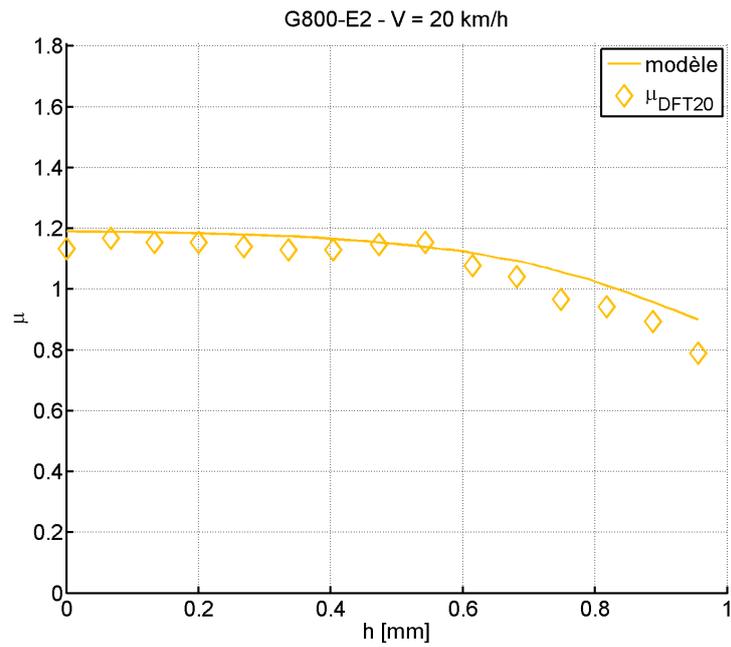


Figure C.54 — *Modèle physique sur la mosaïque G800-E2 à 20 km/h.*

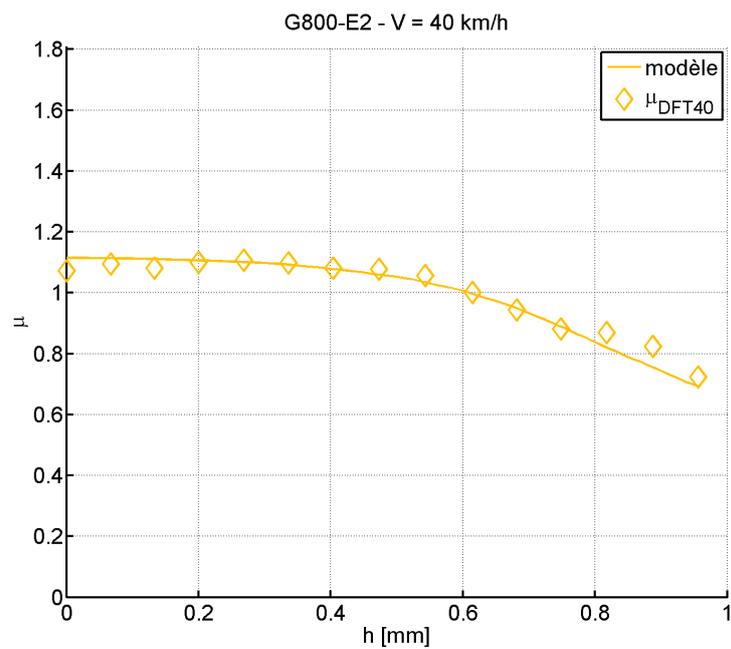


Figure C.55 — *Modèle physique sur la mosaïque G800-E2 à 40 km/h.*

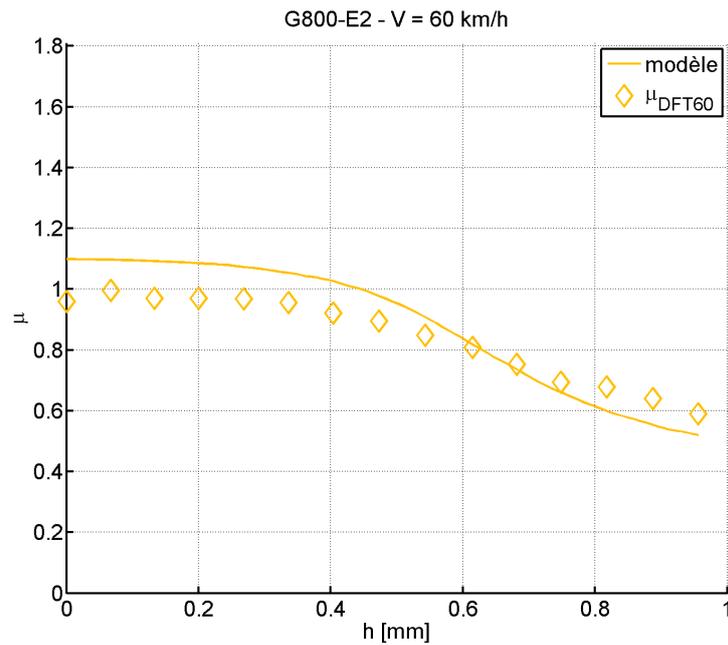


Figure C.56 — Modèle physique sur la mosaïque G800-E2 à 60 km/h.

Pesée (g)	h_{eau} (mm)	DFT_{20}	DFT_{40}	DFT_{60}
0	0	1.11	1.08	0.98
8.42	0.090071	1.15	1.1	0.99
16.73	0.17896	1.14	1.09	0.98
25.35	0.27118	1.15	1.1	0.96
33.9	0.36264	1.14	1.09	0.93
42.46	0.45421	1.12	1.07	0.9
51.39	0.54973	1.09	1.03	0.84
68.43	0.73201	1.05	0.96	0.83
76.91	0.82273	1.03	0.93	0.77
85.9	0.91889	1.01	0.9	0.77
94.43	1.0101	1.01	0.9	0.74
102.9	1.1007	1.01	0.91	0.75
111.67	1.1946	1.01	0.92	0.73
120.85	1.2928	0.97	0.86	0.7
129.46	1.3849	0.98	0.86	0.7
ASTM	ASTM	0.58	0.5	0.49

Tableau C.23 — Mesures de frottement sur la mosaïque G800-E3.

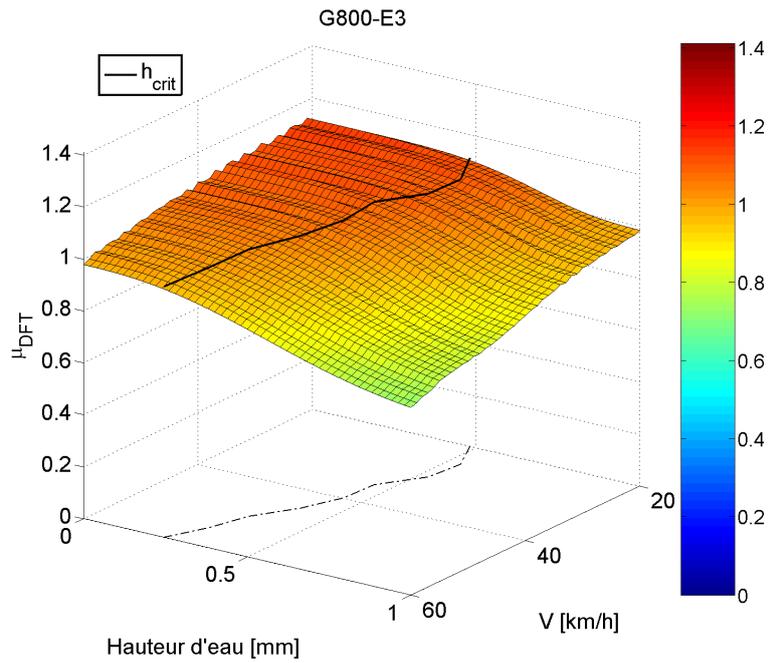


Figure C.57 — Évolution du frottement DFT en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau sur la mosaïque G800-E3.

	$\Delta\mu$	μ_F	h_0	a	h_{crit}
G800-E3 - 20 km/h	0.13	0.98	0.72	5	0.48
G800-E3 - 30 km/h	0.16	0.94	0.8	5	0.53
G800-E3 - 40 km/h	0.22	0.86	0.74	4.15	0.44
G800-E3 - 50 km/h	0.27	0.77	0.74	2.9	0.33
G800-E3 - 60 km/h	0.28	0.7	0.7	2.42	0.25

Tableau C.24 — Valeurs des coefficients du modèle. Échantillon : G800-E3.

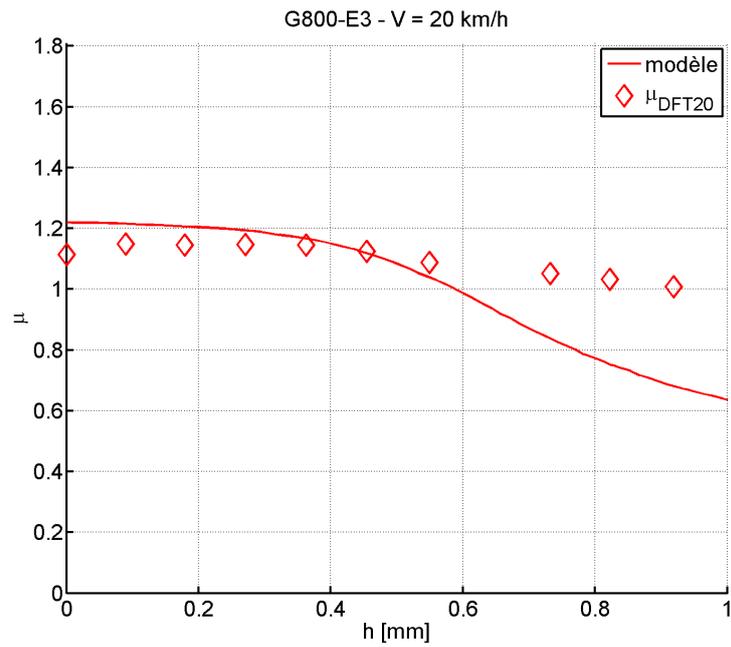


Figure C.58 — *Modèle physique sur la mosaïque G800-E3 à 20 km/h.*

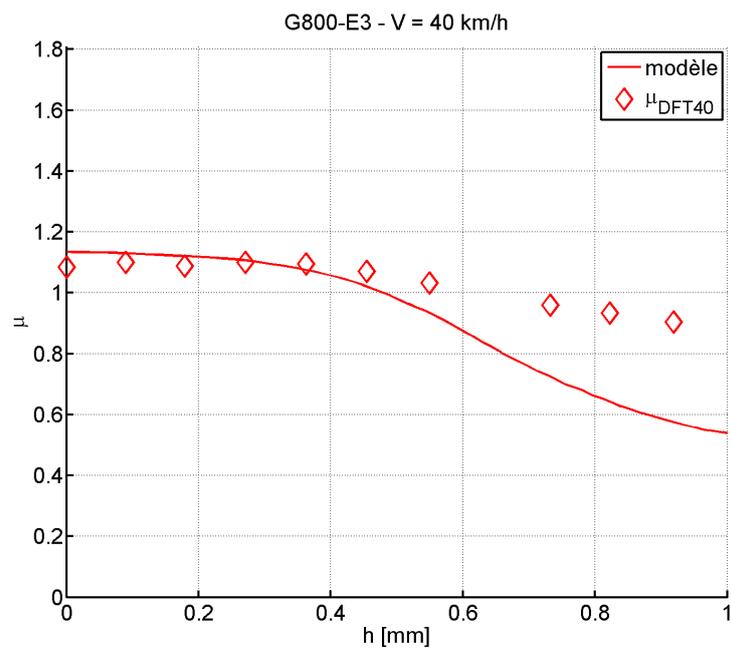


Figure C.59 — *Modèle physique sur la mosaïque G800-E3 à 40 km/h.*

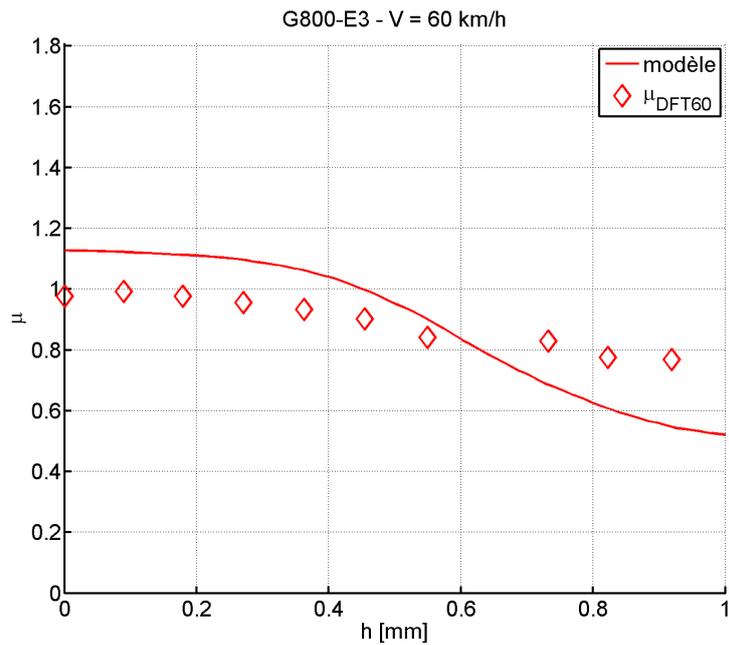


Figure C.60 — *Modèle physique sur la mosaïque G800-E3 à 60 km/h.*

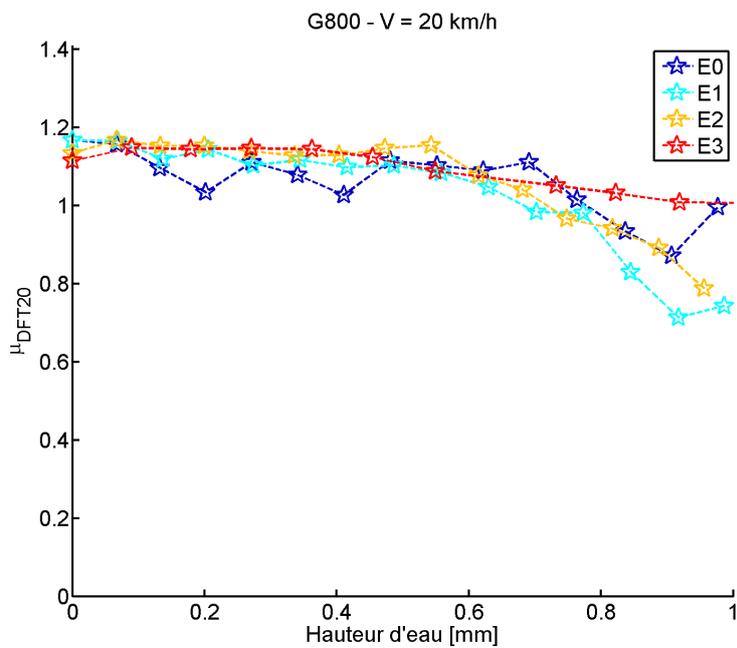


Figure C.61 — *Évolution du frottement DFT en fonction de la hauteur d'eau sur la mosaïque G800 à 20 km/h.*

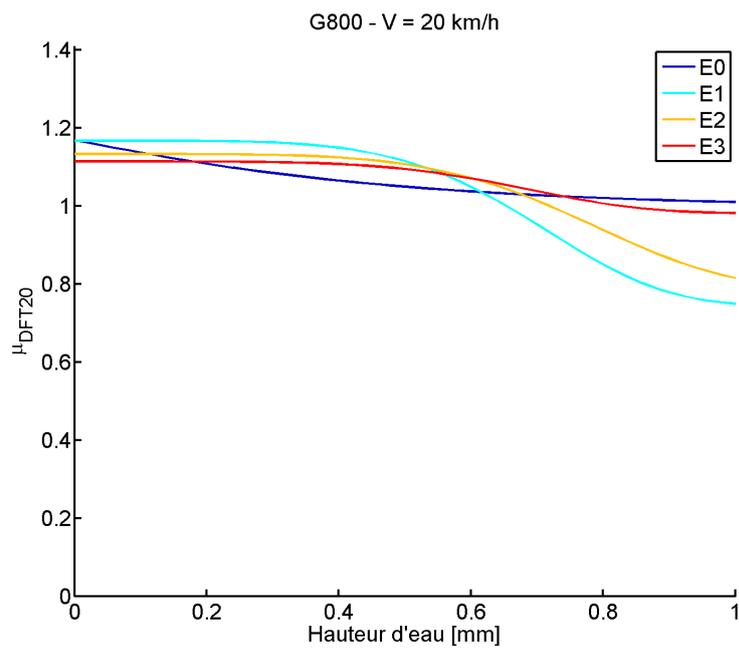


Figure C.62 — Modèle mathématique sur la mosaïque G800 à 20 km/h.

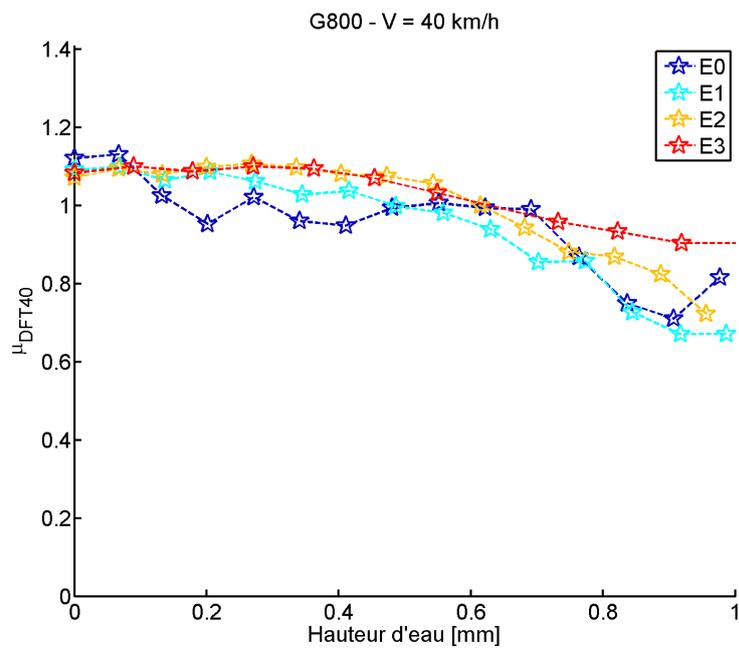


Figure C.63 — Évolution du frottement DFT en fonction de la hauteur d'eau sur la mosaïque G800 à 40 km/h.

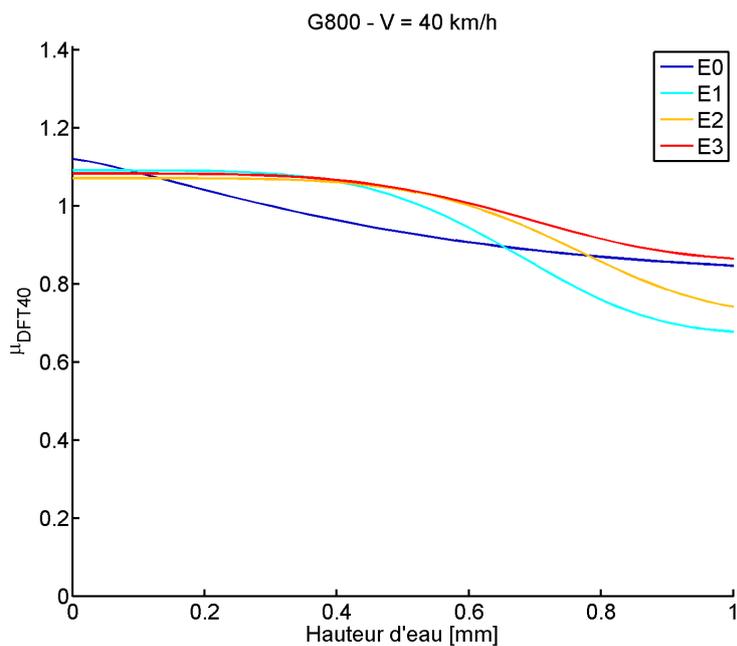


Figure C.64 — *Modèle mathématique sur la mosaïque G800 à 40 km/h.*

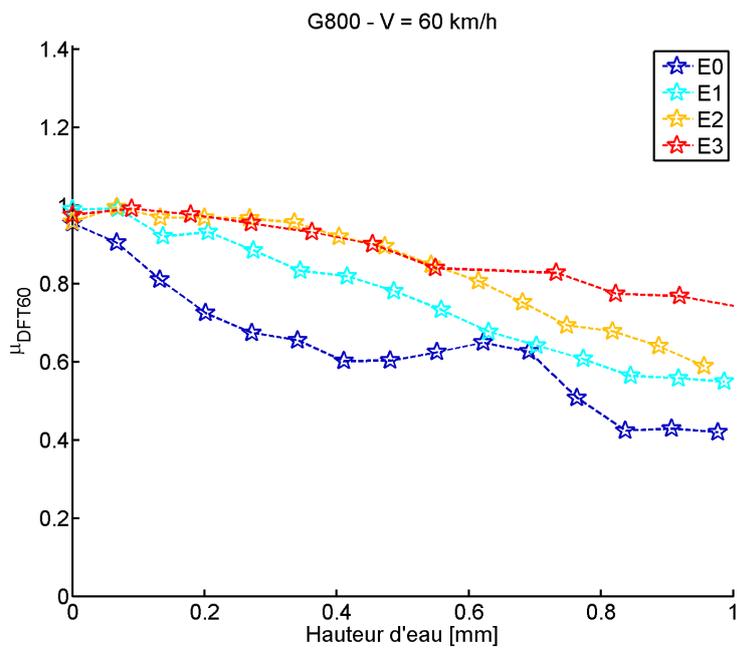


Figure C.65 — *Évolution du frottement DFT en fonction de la hauteur d'eau sur la mosaïque G800 à 60 km/h.*

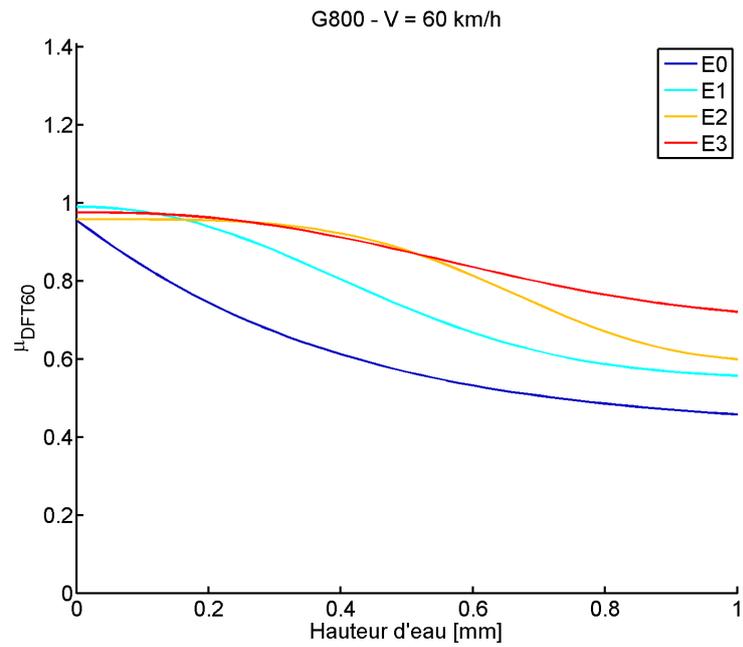


Figure C.66 — Modèle mathématique sur la mosaïque G800 à 60 km/h.

Bibliographie

- AFNOR NF EN 11562 : Spécification géométrique des produits (gps) - État de surface : méthode du profil - caractéristiques métrologiques des filtres à phase correcte. 72
- AFNOR NF EN 13036-1 : Mesurage de la profondeur de macrotexture de la surface d'un revêtement à l'aide d'une technique volumétrique à la tâche. 13
- AFNOR NF EN 13036-4 : Méthode d'essai pour mesurer l'adhérence d'une surface : L'essai au pendule. 21
- AFNOR NF EN 13473-1 : Caractéristiques de la texture d'un revêtement de chaussée à partir de relevés de profils - Partie 1 : détermination de la profondeur moyenne du profil. 14, 15
- AFNOR NF P18-545 : Granulats - Éléments de définition, conformité et codification. 43
- AIPCR : Spécifications d'un pneu d'essai standard pour la mesure d'un coefficient de frottement d'une surface de chaussée : le pneu lisse. Rapport technique, 2009. 17
- ASTM E 1911 : Standard test method for measuring paved surface frictional properties using the dynamic friction tester, 2009. 23
- CEN/TS 15901-6 : Road and airfield surface characteristics - part 6 : Procedure for determining the skid resistance of a pavement surface by measurement of the sideway force coefficient (sfcs) : Scrim ö. 22
- CEN/TS 15901-7 : Road and airfield surface characteristics - part 7 : Procedure for determining the skid resistance of a pavement surface using a device with longitudinal fixed slip ratio (lfcg) : the griptester ö. 22
- A. COIRET : Evaluation spectroscopique des états de mouillage des chaussées - influence sur le frottement roue/sol. *Bulletin des Laboratoires des Ponts de Chaussées*, 255:137-155, 2005. 11
- Y. DELANNE, M.-T. DO, M. GOTHÉ et G. DELALANDE : *Potentiel d'adhérence du couple pneumatique-chaussée*. Laboratoire central des ponts et chaussées, 2006. 8
- Y. DELANNE et D. LECHNER : Rapport de synthèse - étude PREDIT 2 aptp "accidents par temps de pluie" - demande et offre d'adhérence en situation d'urgence et perte de contrôle. Rapport technique, Programme PREDIT, 2002. 2

- M.-T. DO : Contribution des échelles de texture routière à l'adhérence des chaussées. *Etudes et recherches des Laboratoires des ponts et chaussées. Série Chaussées*, 2004. 24, 28, 29, 89, 90
- I. J. FORD : Roughness effect on friction for multi-asperity contact between surfaces. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 26(12):2219–2225, décembre 1993. 88
- J. FOUCARD : Rôle du pneumatique dans le phénomène d'adhérenc. *Bulletin des Laboratoires des Ponts de Chaussées*, 255:11–22, 2005. 7, 9
- J.M. GOLDEN : A theory of wet road-tyre friction. *Wear*, 71(3):307 – 331, 1981. ISSN 0043-1648. 93
- M. GOTHIE : Détermination d'indicateurs de mégatexture par l'analyse d'un profil de surface relevé par un capteur sans contact. *In Caractéristiques de surface de chaussées - IVe symposium international "SURF 2000" - Nantes (France) - 22-24 mai 2000*, pages 123–142, 2000. 12
- M GOTHIE : Les mesures de l'adhérence des chaussées en france et leur interprétation. *Bulletin des Laboratoires des Ponts de Chaussées*, 255:53 – 69, 2005. 19
- J.W. HALL, L.T. GLOVER, K.L. SMITH, L.D. EVANS, J.C. WAMBOLD, T.J. YAGER et Z. RADO : *Guide for Pavement Friction*. National Cooperative Highway Research Program, 2006. 30
- S. HAMLAT : *Etude la résistance des revêtements routiers aux sollicitations tangentielles*. Thèse de doctorat, 2007. 94
- R. R. HEGMON : The contribution of deformation losses to rubber friction. *Rubber Chemistry and Technology*, 42(4):1122–1135, 1969. 30
- F. HOLZWARTH et U. EICHHORN : Non-contact sensors for road conditions. *Sensors and Actuators A : Physical*, 37-38:121–127, 1993. 10
- B. T. KULAKOWSKI et D. W. HARWOOD : Effect of Water-Film thickness on Tire-Pavement friction. *In Surface Characteristics of Roadways : International Research and Technologies*, pages 50–60. ASTM International, 1990. 8, 26, 27, 55, 65
- R. LAMM, A. TAUBMANN et J. ZOELLMER : *Analyse récapitulative du concept d'épaisseur du film d'eau critique sur chaussée*. Laboratoire central des ponts et chaussées, 1990. 9
- MICHELIN : *Le pneu, l'adhérence*. Société de Technologie Michelin, 2002. 7, 8, 9, 10, 12
- D. F. MOORE : A theory of viscous hydroplaning. *International Journal of Mechanical Sciences*, 9(12):797–810, décembre 1967. 33, 94, 102
- D. F. MOORE : The logical design of optimum skid-resistant surfaces. *Highway Research Board Special Report*, (101), 1969. 28
- D.F. MOORE : The elastohydrodynamic transition speed for spheres sliding on lubricated rubber. *Wear*, 35(1):159 – 170, 1975. 9, 32, 92

- ONISR : *Les accidents corporels de la circulation - Recueil de données brutes "Document de travail" - Année 2011*. Observatoire national interministériel de la sécurité routière, 2012. 1
- S.M. RHODE : On the effect of pavement microtexture on thin water film traction. *International Journal of Mechanical Sciences*, 18:95–101, 1976. 31, 32
- B.E. SABEY : Pressure distribution beneath spherical and conical shapes pressed into a rubber plane, and their bearing on coefficient of friction under wet conditions. *Proceedings of the Physical Royal Society*, 71:979–988, 1958. 30
- A.R. SAVKOOR : Paper viii (iii) tribology of tyre traction on dry and wet roads. In C.M. Taylor D. DOWSON et M. GODET, éditeurs : *Vehicle Tribology*, volume 18 de *Tribology Series*, pages 213 – 228. Elsevier, 1991. 29, 31, 92
- A.R. SAVKOOR, G. LODEWIJKS et A.J.G. NUTTALL : Wet tire to road traction. *Tire Technology International*, pages 116–121, 2004. 32
- D.J. SCHIPPER : *Transitions in the lubrication of concentrated contacts*. Thèse de doctorat, University of Twente, 1955. 60
- SWOV : *De invloed van het weer op de verkeersveiligheid*. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, 2009. 1
- P. TANEERANANON et W.O. YANDELL : Microtexture roughness effect on predicted road-tyre friction in wet conditions. *Wear*, 69(3):321 – 337, 1981. 30, 31
- Z. TANG : *Polissage et adhérence des chaussées routières*. Thèse de doctorat, 2007. 12
- A.G. VEITH : Tires - roads - rainfall - vehicles : The traction connection. In *Frictional Interaction of Tire and Pavement*, pages 3–38. ASTM International, 1983. 8, 26, 55
- W. O. YANDELL : The part played by micro-texture in skidding resistance. volume 6, 1972. 29
- D. ZHAO : *Evolution de l'adhérence des chaussées : influence des matériaux, du vieillissement et du trafic, variations saisonnières*. Thèse de doctorat, 2011. 12, 29

Influence des films d'eau très minces sur le frottement pneu/chaussée

Ce travail de thèse vise à mieux comprendre comment l'adhérence des chaussées varie en présence d'un film d'eau très mince (épaisseur inférieure à 1 mm) à la surface de la chaussée. Cet état de mouillage peut engendrer le phénomène de viscoplanage qui est à l'origine d'accidents en cas de pluie légère ou juste après un épisode pluvieux. La finalité de la thèse est de proposer des critères permettant de définir les conditions d'apparition du viscoplanage. Des essais en laboratoire ont été réalisés sur différents types d'échantillons : des enrobés bitumineux mais aussi des mosaïques de graviers roulés et sablés qui permettent l'étude de l'influence de la microtexture, paramètre essentiel pour l'évacuation des films d'eau minces. Des essais sur route réelle (piste) ont également été effectués pour valider la représentativité des essais en laboratoire. Des protocoles d'essais spécifiques ont été développés pour suivre l'évolution du coefficient de frottement de l'état de chaussée sec jusqu'au mouillage complet de la surface. La courbe représentant la variation du coefficient de frottement avec la hauteur d'eau est similaire à la courbe de Stribeck qui met en évidence trois régimes de lubrification : limite, mixte et hydrodynamique. L'influence de divers paramètres (vitesse, microtexture, macrotexture) sur cette variation est étudiée. Une hauteur d'eau dite z_c critique, transition entre le régime de lubrification limite (valeur du coefficient de frottement proche de la valeur sur surface sèche) et le régime de lubrification mixte (chute brutale du coefficient de frottement), est définie. La relation entre la hauteur d'eau critique, la microtexture et la vitesse est analysée. L'influence relative des paramètres de contact est quantifiée. Un modèle physique est développé. Il comporte trois contributions (déformation de la gomme, adhésion et effets hydrodynamiques) et prend en compte les conditions de contact (charge verticale, vitesse). Ce modèle est appliqué à des profils de texture mesuré avec un capteur laser à très haute résolution. Une méthode d'analyse de profils est développée pour déterminer des indenteurs, aspérités sur lesquelles les calculs de déformation et d'adhésion sont appliqués. La comparaison entre le modèle et les essais est satisfaisante, justifiant les hypothèses du modèle. Celui-ci a notamment permis de souligner l'importance du film d'eau présent au sommet des aspérités d'une chaussée. Un modèle de la littérature a été utilisé, comme première tentative, pour estimer l'épaisseur de ce film. Des applications des résultats de la thèse sont citées : elles contribuent à une meilleure compréhension de la présence de films d'eau très minces sur l'adhérence mais également à la détermination des critères d'établissement du viscoplanage.

Mots-clés : film d'eau mince, frottement, microtexture, hauteur d'eau critique, modélisation.

Effect of very thin water film on tire/road friction

This thesis aims at understanding better how skid resistance is altered by a very thin water film (thickness less than 1 mm) on the road surface. This wetting can cause viscoplaning which is the source of accidents during drizzles or after rainfalls. The final goal of the thesis is to suggest criteria to define conditions for the onset of viscoplaning. Laboratory tests are performed on different types of samples : asphalt concrete but also mosaics composed of sandblasted coarse aggregates which allow studying the influence of microtexture, an essential parameter for the evacuation of thin water films. Tests on actual roads (test tracks) are also performed to validate the representativeness of laboratory tests. Specific tests protocols are developed to monitor the evolution of the friction coefficient from a dry state to a complete wetting of the surface. The curve representing the variation of the friction coefficient with water depth is similar to the Stribeck curve which highlights three lubrication regimes : boundary, mixed and hydrodynamic. The influence of some parameters (speed, microtexture, macrotexture) on this variation is studied. A z_c critical water depth, transition between the boundary lubrication regime (value of the friction coefficient close to the value on dry surface) and the mixed lubrication regime (collapse of the friction coefficient), is defined. Relationship between critical water depth, microtexture and speed is analyzed. The relative influence of contact parameters is quantified. A physical model is developed. The theoretical friction coefficient results from three contributions (deformation of rubber, adhesion and hydrodynamic effects). Contact parameters such as vertical load and speed are also considered. The model is applied to texture profiles measured by a high resolution laser sensor. A method of profile analysis is developed to detect profile asperities on which deformation and adhesion calculations are made. Comparison between model and measurement is satisfactory, justifying the hypotheses of the model. The model has especially highlighted the importance of the water film at the top of the road asperities. A model from the literature was used, as a first attempt, to estimate the thickness of this water film. Applications of the results of the thesis are mentioned : they contribute to a better understanding of the presence of thin water films on skid resistance but also to the determination of the onset of viscoplaning.

Keywords : thin water film, friction, microtexture, critical water depth, model.

Discipline : Sciences de l'Ingénieur