



HAL
open science

Adhérence des chaussées contaminées par des particules

Yosra Hichri

► **To cite this version:**

Yosra Hichri. Adhérence des chaussées contaminées par des particules. Génie mécanique [physics.class-ph]. École centrale de Nantes, 2018. Français. NNT : 2018ECDN0024 . tel-02119522

HAL Id: tel-02119522

<https://theses.hal.science/tel-02119522>

Submitted on 3 May 2019

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.

THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : *Génie Mécanique*

Par
Yosra HICHRI

Adhérence des chaussées contaminées par des particules

Thèse présentée et soutenue à Bouguenais, le 4 octobre 2018

Unité de recherche : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) - Département Aménagement, Mobilité et Environnement (AME) - Laboratoire Environnement, Aménagement, Sécurité et Eco-conception (EASE)

Rapporteurs avant soutenance :

Jean DENAPE	Professeur des universités, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
Mohamed EL MANSORI	Professeur des universités, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Composition du Jury :

Président de jury :	Guillaume RACINEUX	Professeur des universités, Ecole Centrale de Nantes
Examinatrice :	Sylvie DESCARTES	Chercheur HDR, INSA de Lyon
Directeur de thèse :	Minh-Tan DO	Ingénieur- ITPE, HDR, IFSTTAR
Co-directrice de thèse :	Véronique CERZO	Ingénieure-IPEF, HDR, IFSTTAR

A mes chers parents Najet et Youssef,
pour leur amour et leur soutien

Remerciements

A l'issue de la rédaction de ce manuscrit, je suis convaincue que la thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais pas pu réaliser ce travail sans le soutien et l'aide d'un grand nombre de personnes dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de ma recherche m'ont permis de progresser durant ces trois années de thèse.

En premier lieu, je tiens à remercier très chaleureusement mon directeur de thèse Minh-Tan DO et ma co-directrice de thèse Véronique CERZO, pour leur encadrement scientifique, leur soutien, leur disponibilité, leurs conseils, leur écoute ainsi que la confiance qu'ils m'ont accordé tout au long de ces années de thèse. Ils m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions. Malheureusement, les mots ne sont pas assez forts pour les remercier comme il se doit. Mais, je mesure et je réalise la chance que j'ai eue en les côtoyant durant ces trois années.

Je tiens à remercier Monsieur Jean DENAPE et Monsieur Mohamed EL MANSORI d'avoir accepté de rapporter ce mémoire de thèse ainsi que pour l'intérêt qu'ils ont témoigné à l'égard de ces travaux. J'associe à ces remerciements Monsieur Guillaume RACINEUX, le président du jury, et Madame Sylvie DESCARTES, examinatrice, pour leur participation au sein du jury de la thèse. Je leur suis sincèrement reconnaissante de l'attention qu'ils ont porté à ce travail.

Je remercie également Madame Sylvie DESCARTES, Monsieur Hassan ZAHOUANI et Monsieur Bogdan MURESAN pour leurs participations aux différents comités de suivi de thèse. Merci pour votre temps, vos commentaires et vos critiques constructives et positives.

Pour mener à bien ces travaux de thèse, j'ai été amenée à travailler avec un certain nombre de personnes au sein de mon équipe mais également au sein d'autres équipes de l'IFSTTAR ainsi que dans d'autres laboratoires. Un grand merci à Christophe ROPERT, Patrick MAISONNEUVE, Jean François LE FUR et Stéphane BURON pour toutes ces expérimentations, leurs conseils et leur implication dans le projet. Je tiens à remercier également Erwan RAYSSAC pour son aide aux observations MEB, Dimitri DENELE pour son aide aux analyses DRX et Dominique DEMARE pour les analyses chimiques. Je remercie chaleureusement Simon CHANGARNIER pour son travail de PFE dans le cadre de cette thèse.

Je ne saurais oublier de remercier toutes les personnes formidables que j'ai eu le plaisir de rencontrées durant ma thèse. Je pense particulièrement à Angélique, Sébastien, Samuel, Christophe, JF, Patrick, Stéphane, Malal, Ibrahim, Denis, Laurence, Cyrille, Sylvie et Michel.

Je remercie tous les doctorants et les ex-doctorants de l'IFSTTAR pour les afterworks, les soirées et autres moments, qui ont permis de construire de belles amitiés en trois ans. Je remercie Chiraz, Yaarob, Emir, Weslei, Raj, Venkadesh, Maissa, Rahma et Mehdi.

En fin, mes remerciements à ma famille qui m'entoure "à distance" depuis toutes ces années. Je suis redevable à mes parents pour leur soutien moral et matériel et leur confiance indéfectible dans mes choix. Et surtout merci à toi, Khalil, d'être à mes côtés chaque jour et de m'avoir apporté la joie, le bonheur et surtout d'avoir su m'encourager dans les moments de doute pour accomplir nos rêves, nos passions.

Ces trois années ont été une expérience unique tant au niveau humain qu'au niveau professionnel. Merci à toutes et à tous. J'en oublie sans doute, et j'espère que les personnes concernées ne m'en tiendront pas rigueur.

Table des matières

Remerciements.....	4
Table des matières	6
Liste des figures.....	9
Liste des tableaux.....	14
Chapitre 1 Introduction générale.....	16
Chapitre 2 État de l’art	18
2.1. Introduction.....	20
2.2. Contaminants	20
2.2.1. Définitions	20
2.2.2. Nature	21
2.2.3. Cycles géochimiques des particules	23
2.3. Adhérence en présence d’eau.....	26
2.3.1. Définitions	26
2.3.2. Mécanismes	28
2.3.3. Facteurs influents.....	29
2.3.4. Méthodes de mesure	33
2.4. Adhérence en présence d’autres contaminants que l’eau	38
2.4.1. Description des phénomènes	38
2.4.2. Influence du type de contaminants	39
2.4.3. Cas particulier des contaminants particulières.....	40
2.4.4. Bilan des travaux existants	42
2.5. Apports de la tribologie	43
2.5.1. Approche du troisième corps	43
2.5.2. Lubrification sèche	47
2.6. Synthèse	51
Chapitre 3 Démarche.....	52
3.1. Limites de l’état de l’art	54
3.2. Démarche adoptée.....	54
3.3. Programme de travail.....	55
Chapitre 4 Programme expérimental.....	58
4.1. Introduction.....	60
4.2. Particules.....	60
4.2.1. Prélèvement.....	60
4.2.2. Caractérisation.....	63
4.3. Surfaces étudiées.....	70
4.3.1. Choix du type de surface	70
4.3.2. Fabrication et caractérisation.....	70
4.4. Appareils de mesure.....	73
4.4.1. Mesures de frottement	73
4.4.2. Mesures de cartographies de hauteurs	74
4.4.3. Caméra rapide.....	75
4.4.4. Microscope Electronique à Balayage	76
4.5. Plan d’expérience.....	77
4.6. Protocoles.....	78
4.6.1. Simulation de la phase de dépôt des particules.....	79
4.6.2. Simulation des phases de lessivage et de séchage	80
4.6.3. Mesure de frottement.....	82

4.6.4. Observations au MEB.....	85
4.6.5. Observations par la caméra rapide.....	87
Chapitre 5 Phase de dépôt – Frottement à l’interface	92
5.1. Introduction.....	94
5.2. Variations du coefficient de frottement et de la masse des particules.....	94
5.2.1. Calcul de la masse des particules à partir des pesées.....	94
5.2.2. Répétabilité des mesures de frottement	95
5.2.3. Evolution avec les états de contamination.....	95
5.3. Influence des caractéristiques liées aux particules	96
5.3.1. Taille.....	96
5.3.2. Concentration	100
5.4. Influence des caractéristiques de surface	101
5.4.1. Analyse des flux de particules	102
5.4.2. Influence de la macrotexture sur le stockage des particules	104
5.4.3. Influence de la microtexture sur le piégeage des particules.....	109
5.5. Conclusions.....	113
Chapitre 6 Phase de dépôt - Comportement des particules à l’interface.....	116
6.1. Introduction.....	118
6.2. Observations à l’échelle microscopique.....	118
6.2.1. Observations des particules piégées par la texture	118
6.2.2. Observation des particules éjectées sur les pastilles	129
6.3. Comportement dynamique des particules	138
6.3.1. Suivi d’une seule particule	139
6.3.2. Suivi d’un ensemble de particules	142
6.4. Conclusions.....	145
Chapitre 7 Phase de dépôt – Vers la prédiction du frottement.....	148
7.1. Introduction.....	150
7.2. Modèle de frottement.....	150
7.3. Modélisation de taux de recouvrement	151
7.3.1. Utilisation de la hauteur locale du film de particules	151
7.3.2. Utilisation de la masse des particules	152
7.3.3. Utilisation des flux de particules	155
7.4. Résultats de la modélisation.....	158
7.4.1. Taux de recouvrement	158
7.4.2. Frottement	165
7.5. Conclusions.....	169
Chapitre 8 Phases de lessivage et de séchage.....	172
8.1. Introduction.....	174
8.2. Frottement à l’interface.....	174
8.2.1. Calcul de la masse du mélange à partir des pesées.....	174
8.2.2. Evolution avec les états de contamination.....	175
8.2.3. Influence des caractéristiques liées aux particules, à la surface et à l’eau	177
8.2.3.1. Taille des particules	177
8.2.3.2. Texture de la surface	180
8.2.3.3. L’ajout d’eau.....	181
8.2.4. Relation entre le frottement et la masse du mélange	182
8.3. Vers une prédiction du frottement	184
8.3.1. Estimation de la fraction volumique des particules et d’eau dans le mélange.....	184
8.3.1.1. Hypothèses et application	184
8.3.1.2. Fraction volumique des particules dans le mélange	185
8.3.2. Estimation de la viscosité du mélange d’eau et des particules	190
8.3.2.1. Approche expérimentale	190
8.3.2.2. Approche théorique.....	191
8.3.2.3. Viscosité du mélange	195

8.3.3. Application au calcul du frottement	197
8.3.3.1. Modèle de frottement	197
8.3.3.2. Résultats	199
8.4. Conclusions.....	201
Chapitre 9 Conclusions et perspectives.....	202
9.1. Bilan des travaux.....	204
9.2. Perspectives	207
9.2.1. Influence de la texture	207
9.2.2. Amélioration de la prédiction du niveau d'adhérence	208
9.2.3. Transposition aux routes réelles	209
9.2.4. Vers une évaluation des risques.....	211
Annexe A : méthodes de caractérisations des particules.....	212
Annexe B : méthodes de mesures et de traitement des cartographies	213
Annexe C : phase de dépôt – frottement à l'interface	215
Liste des références.....	218

Liste des figures

Figure 2.1 Classification d'états de surface d'après Andresen and Wambold (1999)	20
Figure 2. 2 Origine des principaux polluants rencontrés en domaine routier et urbain (Ruban et al., 2003)	22
Figure 2.3 Variabilité de la distribution de taille des particules (Liu et al., 2011)	24
Figure 2.4 Variation de la distribution de la taille des particules en fonction du nombre de jours secs (Egodawatta, 2007)	24
Figure 2.5 Variation de la distribution de la taille des particules (Egodawatta and Goonetilleke, 2008)	26
Figure 2.6 Évolution typique du Coefficient de frottement transversal en fonction du taux de glissement	28
Figure 2.7 Mécanismes physiques à l'origine de la génération d'adhérence (MICHELIN, 2001) : a) mécanisme d'indentation, b) mécanisme d'adhésion.	28
Figure 2.8 Aire de contact entre pneumatique et chaussée en présence d'eau (Do, 2005).	29
Figure 2.9 Schéma représentatif des deux échelles de texture (ISO, 1997).	30
Figure 2.10 Influence de la texture sur le frottement pneu/chaussée (Hall et al., 2006)	31
Figure 2.11 Variation du coefficient du frottement en fonction de la microtexture (Do et al., 2013).....	32
Figure 2.12 Evolution de l'adhérence en fonction de la hauteur d'eau : a) avec différentes vitesse, b) avec différentes microtexture (Do et al., 2013).....	33
Figure 2.13 Pendule SRT.	34
Figure 2.14 Dynamic Friction Tester DFT.	35
Figure 2.15 ADHERA (Gothié, 2005).	35
Figure 2.16 Mesure volumique dite « à tache » (Gothié, 2005).....	36
Figure 2.17 Capteur laser de l'appareil RUGO (Gothié, 2005).	37
Figure 2.18 a) Capteur Infinite Focus de Alicona, b) Exemple de cartographie de hauteurs.	37
Figure 2.19 Variation de l'adhérence d'une chaussée contaminée pendant une période sèche suivie d'une précipitation (d'après Bennis and De Wit, 2003).....	38
Figure 2.20 Frottement d'une surface contaminée (Tyfour, 2009)	39
Figure 2.21 Evolution de l'adhérence en fonction a) du nombre de jours secs (Hill and Henry, 1981) et b) de la concentration des particules (Shakely et al., 1980) (coefficient de frottement longitudinal mesuré en présence d'eau avec une roue bloquée ; l'unité SN utilisée correspond à un coefficient de frottement multiplié par 100 et 64 indique la vitesse de glissement en miles/h soit environ 100 km/h)	40
Figure 2.22 Taux de recouvrement étudiés par (Ping et al., 2010)	41
Figure 2.23 Influence du lessivage des chaussées sur l'adhérence : a) Mesures avant/après nettoyage d'une surface contaminée (Shakely et al., 1980) ; b) Suivi de l'évolution de l'adhérence avec la durée de la pluie (Wilson, 2013)	42
Figure 2.24 Triplet tribologique (d'après Denape et al., 2001).....	44
Figure 2.25 Définitions des sites et des modes d'accommodation (d'après Denape et al., 2001)	45
Figure 2.26 Mécanismes d'accommodation couramment observés (d'après Denape et al., 2001).....	45
Figure 2.27 Circuit tribologique pour un contact élémentaire bidimensionnel (d'après Descartes and Berthier, 2002)....	46
Figure 2.28 Schéma d'une courbe de Stribeck délimitant les différents régimes de lubrification	47
Figure 2.29 Courbe de Stribeck étendue proposée par (Heshmat, 1994)	48
Figure 2.30 L'effet de l'épaisseur du film de lubrifiant solide sur le frottement (Singer and Pollock, 1991)	49
Figure 2.31 Représentation schématique des trois manières auquel le glissement est accommodé entre une contre face et un substrat recouvert par un film de particules (d'après Ives et Peterson).....	50
Figure 3.1 Programme de travail.....	55
Figure 4.1 Site d'étude.....	61
Figure 4.2 Distribution de taille (a) et concentration en éléments majeurs (b) des particules collectées de la surface de la route (Kreider et al., 2010).....	62
Figure 4.3 Concentration en éléments majeurs des particules prélevées de bassin de Cheviré (Durand, 2003)	63

Figure 4.4 Bassins de prélèvement près du pont de Cheviré	63
Figure 4.5 Répartition (%) des classes de taille des particules dans la fraction 0-100µm	64
Figure 4.6 Distribution de tailles (pondérée en volume) des particules de Cheviré après tamisage	65
Figure 4.7 Composition chimique des particules de Cheviré.....	67
Figure 4.8 Diffractogramme avec les phases identifiées (Cheviré 0-40µm).....	68
Figure 4.9 Quantité (%) des minéraux dans les particules de Cheviré (toutes les fractions de taille).....	68
Figure 4.10 Echantillons (a : grenailé appelé « Sablé » ; b : grenailé et strié appelé « Sablé Strié »)	71
Figure 4.11 Désignations de la plaque d'aluminium Sablé Strié	71
Figure 4.12 Zones de mesures de cartographies sur toutes les surfaces d'essai	72
Figure 4.13 Pendule SRT et échantillon mis en place.....	74
Figure 4.14 a) Capteur optique à haute résolution Infinite Focus b) principe de la variation focale c) caractéristiques en fonction du grossissement	75
Figure 4.15 Caméra MotionBLITZ® Cube4 et objectif Sigma	75
Figure 4.16 Microscope électronique à balayage Hitachi SU5000	76
Figure 4.17 Accumulation des particules lors d'une période sèche (route A et B : trafic faible à moyen ; route C : trafic important) (Wang et al., 2013).....	77
Figure 4.18 Plan d'expérience	78
Figure 4.19 Simulation du dépôt des particules a) répandage b) ancien système de compactage utilisant de petites roues	79
Figure 4.20 Nouveau système de compactage utilisant un rouleau	79
Figure 4.21 Empreinte du rouleau de compactage sur la plaque d'essai.....	80
Figure 4.22 Comparaison des résultats trouvés avec les deux systèmes de compactage	80
Figure 4.23 Simulateur de pluie et les positions de l'échantillon a) vue de l'ensemble b) la buse d'eau	81
Figure 4.24 Profondeur d'eau pour chaque position après une durée de 60 secondes a) valeur moyenne b) coefficient de variation	81
Figure 4.25 Protocole pour la réalisation d'une série d'essais à sec	83
Figure 4.26 Protocole pour la réalisation d'une série d'essais en présence d'eau.....	84
Figure 4.27 Montage d'essai.....	86
Figure 4.28 Protocole expérimental des observations au MEB	87
Figure 4.29 Montage de l'essai à la caméra rapide.....	88
Figure 4.30 Plaque d'aluminium à surface lisse	89
Figure 4.31 Répartition des billes de verre sur la plaque lisse	89
Figure 5.1 Répétition des séries d'essais (Sablé ; concentration 20g/m ² ; fraction 0-40µm)	95
Figure 5.2 Variation typique du coefficient de frottement et de la masse des particules en fonction des étapes du protocole (Sablé Strié ; concentration 20g/m ² ; fraction 0-100µm)	96
Figure 5.3 Variation du coefficient de frottement pour différentes fractions de taille : a) Sablé ; b) Sablé Strié	97
Figure 5.4 Niveau minimum du coefficient de frottement - μ_{min} : a) Sablé, b) Sablé Strié.....	98
Figure 5.5 Niveau final du coefficient de frottement - μ_{stab} : a) Sablé ; b) Sablé Strié.....	99
Figure 5.6 Variation de la masse des particules pour différentes fractions de taille : a) Sablé ; b) Sablé Strié.....	99
Figure 5.7 Variation du coefficient de frottement pour différentes concentrations initiales (fraction de taille 0-100µm) : a) Sablé ; b) Sablé Strié.....	100
Figure 5.8 Variation de la masse des particules pour différentes concentrations initiales (fraction de taille 0-100µm) : a) Sablé ; b) Sablé Strié.....	101
Figure 5.9 Variation du coefficient de frottement (a) et de la masse des particules (b) sur les deux surfaces d'essai (fraction 0-100µm ; concentration 20g/m ²)	102
Figure 5.10 Variation du coefficient de frottement en fonctions de la masse des particules : a) Sablé ; b) Sablé Strié (fraction 0-100µm ; concentration 20g/m ²)	102
Figure 5.11 Représentation schématique des flux de particules dans le contact sur une surface avec deux échelles de la texture	103
Figure 5.12 Quantité estimée de particules stockées dans les creux	104

Figure 5.13 Aire de contact pour la surface Sablé Strié	106
Figure 5.14 plaque Sablé Strié : a) 0-40µm b) 40-50µm c) 50-80µm et d) 80-100µm (concentration 20 g/m2).....	107
Figure 5.15 Variation du facteur k pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations des particules.....	108
Figure 5.16 Variations du coefficient de frottement en fonctions de la masse des particules pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations initiales des particules : a) Sablé ; b) Sablé Strié	109
Figure 5.17 Masse des particules mesurée à la fin de chaque série d'essais : a) Sablé ; b) Sablé Strié	110
Figure 5.18 Schéma représentatif des paramètres de volumes avec la courbe d'Abbott	111
Figure 5.19 Variation du coefficient de frottement en fonctions de la masse des particules sur la surface Sablé (toutes fractions de taille et toutes concentrations initiales des particules).....	112
Figure 5.20 Variation du coefficient de frottement en fonctions de la masse estimée des particules sur la surface Sablé Strié (toutes fractions de taille et toutes concentrations initiales des particules)	113
Figure 6.1 Images MEB : surfaces propres observées avant les essais avec les quatre fractions de taille des particules	119
Figure 6.2 Particules piégées dans les aspérités de la surface en état propre : a) observation en SE b) observation en BSE	120
Figure 6.3 Réponses des électrons secondaires et rétrodiffusés suite à l'interaction d'un faisceau d'électrons avec la surface d'un échantillon.....	121
Figure 6.4 Images MEB : surfaces après contamination et compactage.....	122
Figure 6.5 Images MEB : surfaces après la 1 ^{ère} mesure SRT.....	123
Figure 6.6 Images MEB : surfaces à l'étape intermédiaire.....	124
Figure 6.7 Images MEB : état des surfaces à l'étape finale (stabilisation de μ)	125
Figure 6.8 Comparaison de l'état de la surface avec la fraction 0-100µm a) après le compactage b) à l'étape 1 c) à l'étape 3 d) à l'étape finale.....	127
Figure 6.9 Comparaison de l'état de la surface à l'étape finale avec la fraction de taille a) 0-40µm b) 40-50µm c) 50-80µm d) 80-100µm e) 0-100µm	128
Figure 6.10 Particules éjectées lors du 1 ^{er} passage du patin SRT	130
Figure 6.11 Particules éjectées lors du 3 ^{ème} passage du patin SRT	131
Figure 6.12 Particules éjectées lors du dernier passage du patin SRT	132
Figure 6.13 Particules éjectées lors du dernier passage du patin SRT a) 0-40µm b) 0-100µm	133
Figure 6.14 Zones d'observation sur chaque pastille	134
Figure 6.15 Exemple d'une photo prise au MEB a) à l'état brut, b) à l'état final traité avec Paint et ImageJ (fraction 80-100µm ; 1 ^{er} passage du patin)	134
Figure 6.16 Illustration du Féret mesuré à avec ImageJ	135
Figure 6.17 Distribution de taille des particules de la fraction 0-40µm éjectées sur la pastille à l'étape 1, intermédiaire et finale	135
Figure 6.18 Distribution de taille des particules de la fraction 40-50µm éjectées sur la pastille à l'étape 1, intermédiaire et finale	136
Figure 6.19 Distribution de taille des particules de la fraction 50-80µm éjectées sur la pastille à l'étape 1, intermédiaire	137
Figure 6.20 Distribution de taille des particules de la fraction 80-100µm éjectées sur la pastille à l'étape 1, intermédiaire et finale	137
Figure 6.21 Distribution de taille des particules de la fraction 0-100µm éjectées sur la pastille à l'étape 1, intermédiaire et finale	138
Figure 6.22 Comportement de la bille de verre lors du passage du patin sur la surface lisse	140
Figure 6.23 Comportements de la bille de verre lors du passage du patin sur la surface sablée	141
Figure 6.24 Schéma représentatif des différentes trajectoires de la bille de verre sur la surface lisse lors du passage de patin	142
Figure 6.25 Schéma représentatif des différentes trajectoires de la bille de verre sur la surface grenillée lors du passage de patin.....	142
Figure 6.26 Comportements des particules de Cheviré lors du passage du patin sur la plaque Sablé	143

Figure 6.27 Schéma représentatif des différentes trajectoires des particules naturelles observés lors du passage de patin	145
Figure 7.1 Schématisation des hauteurs du film des particules.....	151
Figure 7.2 Dépôt des particules sur les sommets d'aspérités	152
Figure 7.3 Variation du coefficient de frottement avec le pourcentage de sous-alimentation (Heshmat, 1993).....	152
Figure 7.4 Comparaison entre le modèle proposé et la mesure (aluminium grenailée, concentration 20g/m ² , fraction 0-100µm).....	153
Figure 7.5 Valeurs de (n) pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations des particules : a) Sablé ; b) Sablé Strié.....	154
Figure 7.6 Schématisation des phénomènes d'adsorption et d'enlèvement des dépôt gazeux (d'après Dickrell et al., 2004).....	155
Figure 7.7 Détermination du taux de recouvrement initial à partir d'une cartographie 3D	158
Figure 7.8 Evolution du taux de recouvrement calculée en fonction des étapes du protocole: échantillon Sablé ; concentration initiale des particules a) 10g/m ² b) 20g/m ² c) 40g/m ²	160
Figure 7.9 Evolution du taux de recouvrement calculé en fonction des étapes du protocole : échantillon Sablé Strié ; concentration initiale des particules a) 10g/m ² b) 20g/m ² c) 40g/m ²	161
Figure 7.10 Taux de recouvrement calculé en fonction de la masse des particules sur la plaque Sablé pour les cinq fractions de tailles et concentration initial a) 10g/m ² ; b) 20g/m ² ; b) 40g/m ²	162
Figure 7.11 Taux de recouvrement calculé en fonction de la masse des particules sur la plaque Sablé Strié pour les cinq fractions de tailles et concentration initial a) 10g/m ² ; b) 20g/m ² ; c) 40g/m ²	163
Figure 7.12 Valeurs de γ et de α pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations des particules sur l'échantillon Sablé	165
Figure 7.13 Valeurs de γ et de α pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations des particules sur l'échantillon Sablé Strié.....	165
Figure 7.14 Comparaison des résultats expérimentaux et du modèle : échantillon Sablé, concentration initiale des particules a) 10g/m ² b) 20g/m ² c) 40g/m ²	166
Figure 7.15 Comparaison des résultats expérimentaux et du modèle : échantillon Sablé Strié, concentration initiale des particules a) 10g/m ² b) 20g/m ² c) 40g/m ²	167
Figure 7.16 Frottement et les composantes liées à μ_{film} et μ_{surface} : échantillon Sablé, concentration 20g/m ² a) fraction 0-40µm b) fraction 80-100µm.....	168
Figure 8.1 Phases étudiées	174
Figure 8.2 Variation typique du coefficient de frottement et de la masse du mélange des particules et d'eau en fonction des étapes du protocole (échantillon Sablé ; concentration 20g/m ² ; fraction 0-40µm)	176
Figure 8.3 Variation du coefficient de frottement pour les cinq fractions de taille des particules : a) Sablé, b) Sablé Strié	178
Figure 8.4 Schématisation des différents états de l'eau dans les particules : a) régime hygroscopique, b) régime pendulaire, c) régime funiculaire, d) régime capillaire	179
Figure 8.5 Variation de la masse du mélange en fonction des étapes pour les cinq fractions de taille des particules : a) Sablé, b) Sablé Strié.....	180
Figure 8.6 Variation du coefficient de frottement sur les quatre surfaces d'essai (fraction 0-100µm ; concentration 20g/m ²)	181
Figure 8.7 Comparaison de la variation du coefficient de frottement dans les conditions sèches et dans les conditions mouillées (aluminium grenailé ; concentration 20g/m ²) : a) fraction 0-40µm b) fraction 0-80µm.....	182
Figure 8.8 Variation du coefficient de frottement en fonction de la masse du mélange pour les cinq fractions de taille des particules : a) Sablé, b) Sablé Strié.....	183
Figure 8.9 Hypothèses	184
Figure 8.10 Variation du coefficient de frottement en fonction de la fraction volumique des particules pour les cinq fractions de taille des particules : a) Sablé, b) Sablé Strié	186
Figure 8.11 Présentation des trois phases sur l'exemple de variation du coefficient de frottement en fonction de la fraction volumique des particules (50-80µm, plaque Sablé).....	187

Figure 8.12 Fraction volumique critique dans le cas de la fraction de taille des particules 40-50 μ m et la surface Sablé	188
Figure 8.13 Présentation des fractions volumique critique dans le mélange	190
Figure 8.14 Problème de sédimentation des particules	191
Figure 8.15 Représentation de ϕr comme une fonction de $\phi \phi m$ en utilisant des données de la littérature et des travaux de Shewan et Stokes (2015).....	192
Figure 8.16 Evolution de ϕr_{cp} en fonction de la distribution de taille moyenne σ (Shewan et Stokes, 2015).....	193
Figure 8.17 Retracer de la prédiction de ϕr_{cp} à partir de σ d'après les travaux de Shewan et Stokes (2015).....	194
Figure 8.18 Variation du coefficient de frottement en fonction de la viscosité relative du mélange pour les cinq fractions de taille des particules ; a) Sablé b) Sablé Strié	196
Figure 8.19 Illustration des hypothèses de modèle dans les conditions sèches et dans les conditions mouillées	197
Figure 8.21 Comparaison des résultats expérimentaux et du modèle pour les fractions a) 0-40 μ m et 40-50 μ m sur les deux surfaces ; b) 50-80 μ m et 80-100 μ m sur les deux surfaces	200
Figure 9.1 Représentation des phénomènes	207
Figure 9.2 Résultats préliminaires de l'évolution du coefficient de frottement pour les quatre surfaces différentes (concentration 20g/m ² , fraction 0-100 μ m) : a) phase de dépôt, b) phase de mouillage et de séchage	208
Figure 9.3 Cas particulier étudié par Tichy (1995)	209
Figure 9.4 Observation en surface du granulat prélevé de la bande de roulement à : a) 1 jour sec b) 9 jours secs.....	210
Figure 9.5 Observation en coupe des granulats prélevés de la bande de roulement à : a) 1 jour sec b) 9 jours secs	210
Figure B.1 Méthode de traitement appliquée sous MountainsMap sur toutes les cartographies.....	213
Figure B.2 Méthode de appliquée sous MountainsMap pour extraire la surface de contact après l'indentation de la gomme	214
Figure C.1 Variation du coefficient de frottement pour les cinq fractions de taille des particules (concentration 10g/m ²): a) Sablé, b) Sablé Strié.....	215
Figure C.1 Variation du coefficient de frottement pour les cinq fractions de taille des particules (concentration 40g/m ²) : a)Sablé, b) Sablé Strié.....	215
Figure C.2 Variation de la masse des particules pour les cinq fractions de taille des particules (concentration 10g/m ²) : a) Sablé, b) Sablé Strié.....	216
Figure C.3 Variation de la masse des particules pour les cinq fractions de taille des particules (concentration 40g/m ²) : a) Sablé, b) Sablé Strié.....	216

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Evaluation semi quantitative par diffraction rayon X de la quantité (%) des minéraux cristallisés dans les sédiments (Roger et al., 1998)	23
Tableau 2.2 Les paramètres de la distribution de taille des particules (Liu et al., 2011)	24
Tableau 4.1 Paramètres de taille des particules de Cheviré	66
Tableau 4.2 Masse volumique absolue des particules de Cheviré	66
Tableau 4.3 Evaluation semi quantitative par diffraction rayon X de la quantité (%) des minéraux cristallisés dans les particules.....	69
Tableau 4.4 Paramètres de rugosité caractérisant la microtexture de la surface de l'échantillon d'aluminium	73
Tableau 5.1 Valeurs de f_s	106
Tableau 5.2 Les valeurs de k pour toutes les fractions de taille et concentration des particules.....	108
Tableau 5.3 Valeurs la masse calculée.....	112
Tableau 6.1 Les valeurs de la vitesse calculée pour trois particules suivies de chaque fraction de taille	145
Tableau 7.1 Expressions analytiques du taux de recouvrement lors des premières rotations (Dickrell et al., 2004)	156
Tableau 7.2 Valeurs des données du modèle de frottement pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations initiales des particules	159
Tableau 8.1 Valeurs de la fraction volumique critique pour chaque fraction de taille.....	189
Tableau 8.2 Les valeurs de σ et de \varnothing_{rcp} calculée pour toutes les fractions de taille des particules	195
Tableau 8.3 Les valeurs de c trouvées pour toutes les fractions de taille des particules et les deux surfaces d'essais....	199

Chapitre 1

Introduction générale

Il est généralement accepté que la pluie est l'un des facteurs de risque principal influant sur la perte de contrôle de la voiture par le conducteur. Un certain nombre d'études ont permis de montrer la contribution de la pluie sur l'augmentation des accidents routiers. Il a été montré que le risque d'accidents est à peu près multiplié par deux par temps de pluie. En analysant des données statistiques d'accidents aux Etats-Unis (période 1975-2000), Eisenberg, (2004) a noté que si globalement la pluie induit une augmentation des accidents, d'autres tendances – statistiquement significatives – peuvent être notées. Cet auteur a trouvé que l'occurrence des accidents lors d'une journée pluvieuse dépend de la météorologie des jours précédents : les accidents diminuent si la journée étudiée est précédée de pluies ; les accidents augmentent si elle est précédée d'une période sèche. Pour le dernier cas, les statistiques montrent que 10 mm de précipitation journalière induiraient 3% (respectivement 9%) d'augmentation du nombre d'accidents si cet événement pluvieux est précédé de 2 jours (respectivement 21 jours et plus) secs. Ce nombre d'accident est assimilé par la perte du contrôle, qui est accordée à la perte d'adhérence sur la chaussée. Ce constat est avéré par les travaux de Bennis et De Wit (2003) qui montrent que l'adhérence chute significativement quand il pleut après une longue période sèche. Cette perte d'adhérence, qui se déroule sur une échelle de temps très court, est attribuée aux particules d'origines diverses (poussières, débris d'usure des pneus et de la route, particules émises par les véhicules hors échappement, etc.) qui se déposent sur la route pendant la période sèche. Ce phénomène est particulièrement observé sur les routes à fort trafic et en milieu urbain où le niveau de pollution est élevé. Ces particules, seules ou mélangées avec l'eau de pluie, agissent comme un contaminant à l'interface entre le pneu et la chaussée.

Les travaux sur l'adhérence pneu/chaussée se sont essentiellement intéressés au cas des chaussées mouillées sans tenir compte de la présence des particules. A travers cette thèse, nous cherchons à comprendre les phénomènes physiques qui interviennent à l'interface pneu/chaussée d'une surface contaminée et à modéliser les mécanismes induits par les particules. On s'intéresse plus particulièrement à l'effet des particules fines (<100 μ m).

Le plan du mémoire de thèse se décompose en huit chapitres faisant suite à cette introduction :

Le chapitre 2 consiste en une synthèse bibliographique réunissant l'essentiel des connaissances nécessaires à cette étude. A savoir, une première partie est consacrée à la présentation des contaminants, leurs caractéristiques et leurs cycles durant le temps ; une deuxième partie est consacrée aux notions de base sur l'adhérence des chaussées comme les mécanismes de génération des forces

de frottement et de lubrification et les facteurs influents ; une troisième partie synthétise les travaux existants sur l'adhérence des chaussées contaminées ; et enfin une dernière partie est consacré à l'introduction de l'approche utilisés dans cette étude.

Le chapitre 3 présente la démarche développée dans cette thèse pour étudier le frottement sur une surface contaminée par des particules.

Le chapitre 4 développe le programme expérimental mis en œuvre pour dans cette thèse pour caractériser puis observer le comportement des particules présentes sur la surface en frottement et leurs interactions avec la texture de la surface en laboratoire. Les particules et les surface d'essais ont été caractérisées. Un vaste plan d'expérience est développé et les différentes approches expérimentales sont présentées. Ce programme comprend deux phases : l'étude du comportement en frottement des particules sèches et l'étude du comportement en frottement des particules mouillées.

Le chapitre 5 aborde l'ensemble des résultats de frottement obtenus au cours des essais par des particules sèches. L'effet des caractéristiques liées aux particules (taille, quantité, etc.) et liés à la surface (texture) sont abordés.

Le chapitre 6 consiste à corréler l'évolution du frottement aux phénomènes physiques établis pour les particules solides sèches à l'interface par des observations dans l'aire de contact.

Le chapitre 7 est consacré à la modélisation de la relation entre le frottement et le taux de recouvrement de la surface par des particules sèches.

Le chapitre 8 est dédié à l'étude du comportement des particules mouillées à l'interface pneu /chaussée. L'effet des caractéristiques liées aux particules (taille, quantité, etc.) et liées à la surface (texture) sont également abordés.

Le chapitre 9 récapitule l'ensemble des résultats obtenus et propose des perspectives de recherches.

Chapitre 2

État de l'art

Plan du chapitre

2.1. Introduction.....	20
2.2. Contaminants	20
2.2.1. Définitions	20
2.2.2. Nature	21
2.2.3. Cycles géochimiques des particules	23
2.2.3.1. Phase de dépôt	23
2.2.3.2. Phase de lessivage.....	25
2.3. Adhérence en présence d'eau.....	26
2.3.1. Définitions	26
2.3.2. Mécanismes	28
2.3.2.1. Génération des forces de frottement	28
2.3.2.2. Lubrification en présence d'eau	29
2.3.3. Facteurs influents.....	29
2.3.3.1. Echelles de texture	30
2.3.3.2. Macrotexture et vitesse	30
2.3.3.3. Microtexture.....	31
2.3.3.4. Eau	32
2.3.4. Méthodes de mesure	33
2.3.4.1. Mesure d'un coefficient de frottement.....	33
2.3.4.2. Mesure de la texture.....	35
2.4. Adhérence en présence d'autres contaminants que l'eau	38
2.4.1. Description des phénomènes	38
2.4.2. Influence du type de contaminants	39
2.4.3. Cas particulier des contaminants particuliers.....	40
2.4.3.1. Influence du dépôt des particules.....	40
2.4.3.2. Influence du lessivage des particules	41
2.4.4. Bilan des travaux existants	42
2.5. Apports de la tribologie	43
2.5.1. Approche du troisième corps.....	43
2.5.1.1. Définition	43
2.5.1.2. Triplet tribologique	44
2.5.1.3. Mécanismes d'accommodation.....	44
2.5.1.4. Circuit tribologique	46
2.5.2. Lubrification sèche	47
2.5.2.1. Régimes de lubrification et courbe de Stribeck	47
2.5.2.2. Extension de la courbe de Stribeck au cas des lubrifiants solides.....	48
2.5.2.3. Mécanismes de lubrification	49
2.6. Synthèse.....	51

2.1.Introduction

Cet état de l'art est divisé en quatre parties :

- Le paragraphe 2.2 est consacré à la présentation du type de contaminants étudiés dans la thèse. On verra la provenance de ces contaminants, leurs caractéristiques et leur cycle de vie depuis le dépôt sur la route jusqu'au lessivage par l'eau de pluie.
- Le paragraphe 2.3 introduit des notions de base sur l'adhérence des chaussées comme les mécanismes de génération des forces de frottement et de lubrification, les facteurs influents et les méthodes de mesure.
- Le paragraphe 2.4 synthétise les travaux existants sur l'adhérence des chaussées contaminées, en s'appuyant sur des notions introduites dans les deux premiers paragraphes, pour identifier les acquis et les lacunes.
- Le paragraphe 2.5 introduit la tribologie, en particulier l'approche du troisième corps et la théorie de lubrification sèche, comme une voie prometteuse pour aller plus loin dans la compréhension des phénomènes et la prédiction du frottement.

2.2.Contaminants

2.2.1. Définitions

Les contaminants sont définis comme des corps solides ou liquides qui se déposent sur la surface d'une chaussée. Andresen et Wambold (1999) ont proposé une classification (Figure 2.1) permettant de représenter une chaussée propre ou recouverte de divers types de contaminants comme la neige ou la glace, les produits de traitement hivernaux comme le sel, etc. Cette classification ne tient pas compte d'un type de contaminants, peu abordé dans la littérature, qui se présentent sous la forme de particules solides. Ces particules proviennent de sources diverses comme l'atmosphère ou le trafic et se déposent sur la chaussée lors d'une longue période sèche ; ce type de contaminants est l'objet de la thèse.

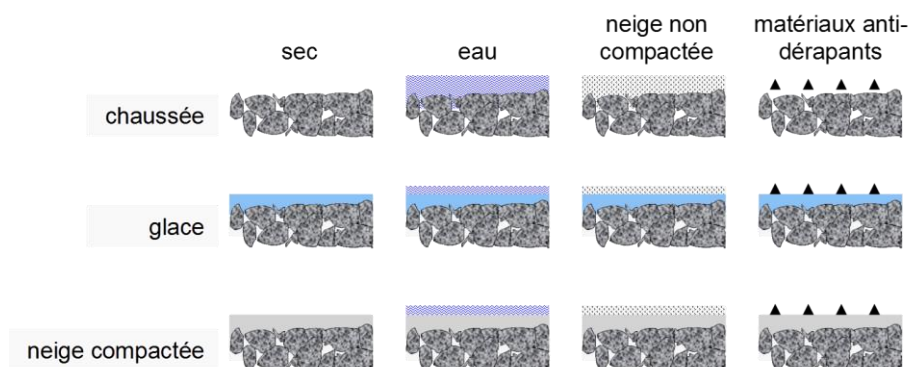


Figure 2.1 Classification d'états de surface d'après Andresen and Wambold (1999)

2.2.2. Nature

Les contaminants qui se déposent sur la surface de la chaussée sont classés en quatre grandes catégories selon le type de pollution : chronique, saisonnière, temporaire ou accidentelle (SETRA, 1997, 1995) :

- La pollution chronique se produit de manière continue avec l'utilisation de la route. Elle est issue de l'usure de la chaussée, de l'abrasion et de la corrosion des matériaux constitutifs des véhicules (les pneus, les freins, la carrosserie, etc.), la combustion du carburant, les fuites de divers liquides (huiles moteur, antigel), la corrosion des glissières de sécurité et des panneaux de signalisation, la présence d'une zone industrielle à proximité (les combustions et les rejets industriels) (SETRA, 1997).
- La pollution saisonnière est liée à la maintenance des infrastructures routières (salage, désherbage). Ces opérations nécessitent l'emploi de divers produits comme les sels et les herbicides (Choupas et al., 1995).
- La pollution temporaire est liée aux travaux de construction de la route qui produisent les poussières, les rejets d'huiles d'engin, etc.
- La pollution accidentelle est issue d'un accident de la circulation au cours duquel des produits chimiques ou pétroliers sont déversés sur la surface de la route. Du fait du caractère aléatoire et peu probable de ce type de pollution, il est difficile de la prendre en compte.

Les particules proviennent essentiellement de la pollution chronique. Les eaux de ruissellement peuvent transporter d'importantes quantités de polluants dans les bassins de décantation. Grâce aux nombreuses campagnes de mesure menées depuis la fin des années soixante en France et à l'étranger, les polluants des rejets urbains transportés par les eaux de ruissellement sont aujourd'hui assez bien connus, tant en concentration qu'en flux, et ceci en fonction des divers types de réseaux et de niveaux d'urbanisation (Legret and Pagotto, 1999; Ruban et al., 2003; Sartor and Boyd, 1972). La Figure 2. 2 synthétise les principales sources et natures de polluants en milieux routier et urbain qui s'accumulent dans un bassin.

Les résultats issus des sources bibliographiques montrent que les particules présentes dans les sédiments de l'assainissement pluvial ont des caractéristiques très variées en termes de siccité (pourcentage de matière sèche), de distribution granulométrique, de composition minéralogique, et de teneurs en matière organique (Durand et al., 2004). Vignoles (1991) a montré que 70 à 80% des particules qui se trouvent dans les sédiments ont une taille inférieure à 50 μm . Roger et al (1998) ont trouvé des résultats similaires avec plus de 86% de particules inférieures à 100 μm et environ 78% inférieures à 50 μm .

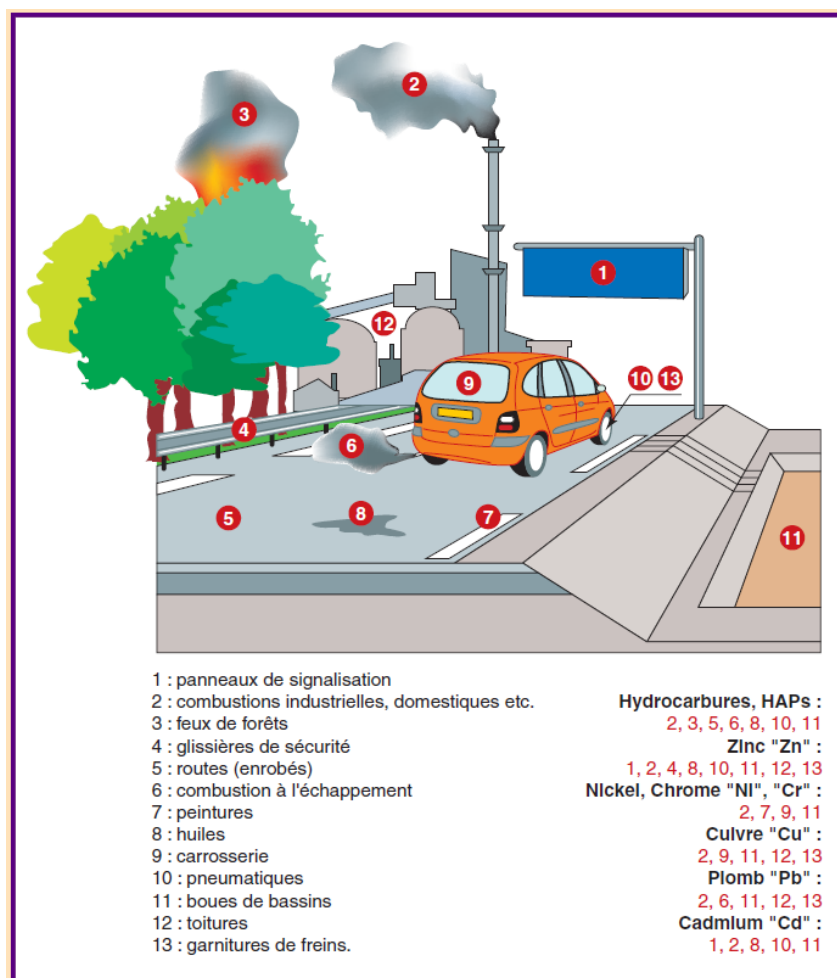


Figure 2. 2 Origine des principaux polluants rencontrés en domaine routier et urbain (Ruban et al., 2003)

Les analyses minéralogiques de ces particules sont presque inexistantes dans la littérature. Les seules informations trouvées concernent la caractérisation minéralogique des boues de bassins de décantation (Durand, 2003a; Lee, 1996; Roger et al., 1998). Les principaux minéraux rencontrés dans les sédiments sont le quartz, les feldspaths, les minéraux argileux (tels que la kaolinite, la montmorillonite, l'illite) et la calcite (Lee, 1996). D'après (Durand, 2003a), le quartz et la calcite sont les minéraux les plus présents dans les fractions fines (inférieures à 40 μm). Roger et al (1998) ont également trouvé que les pourcentages en argile, quartz et calcite sont largement majoritaires par rapports aux autres éléments sur toutes les fractions de taille des particules. Il trouve également que les particules inférieures à 50 μm sont composées d'argile (56%), de quartz (15%), de calcaire (15%), de matière organique (9%), de feldspaths (5%) et de dolomite (2%).

La répartition des minéraux contenus dans les sédiments transportés lors de l'une des précipitations étudiées par Roger et al (1998) est présentée dans le Tableau 2.1. La fraction restante de sédiments non présentée dans ce tableau est constituée de la matière organique et de l'argile. D'après Roger et al (1998), les particules qui ont une taille comprise entre 50 et 100 μm contiennent plus de quartz et moins d'argile par rapport à la fraction la plus fine.

Tableau 2.1 Evaluation semi quantitative par diffraction rayon X de la quantité (%) des minéraux cristallisés dans les sédiments (Roger et al., 1998)

Fraction de taille μm	Albite NaAlSi ₃ O ₈	Orthoclase KAlSi ₃ O ₈	Gypse CaSO ₄	Quartz SiO ₂	Calcite CaCO ₃	Dolomite (Ca,Mg)(CO ₃) ₂	Total
%							
500-1000	5	8	0	30	24	1	68
200-500	4	8	0	37	19	1	70
100-200	5	9	2	35	14	3	69
50-100	7	0	3	29	11	4	54
<50	4	0	2	14	12	2	34

2.2.3. Cycles géochimiques des particules

Les particules se déposent sur la surface de chaussée pendant les périodes sèches et sont évacuées par l'eau de ruissellement pendant la pluie. Ces cycles de « dépôt » et de « lessivage » sont appelés des cycles géochimiques.

2.2.3.1. Phase de dépôt

Le dépôt est un mécanisme très complexe du fait qu'il est influencé par de nombreuses variables comme la météorologie, le trafic, la rugosité de surface et l'utilisation du terrain (zone résidentielle, présence d'usines, etc.) (Egodawatta, 2007).

Liu et al (2011) ont trouvé que les sites industriels induisent une variation plus importante de la taille des particules comparée aux sites commerciaux et résidentiels (Figure 2.3 et 0).

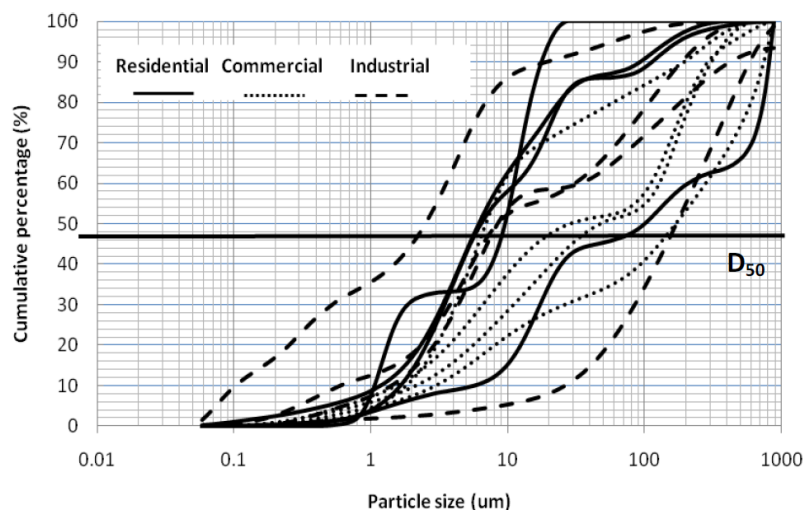


Figure 2.3 Variabilité de la distribution de taille des particules (Liu et al., 2011)

Tableau 2.2 Les paramètres de la distribution de taille des particules (Liu et al., 2011)

Paramètre	Résidentiel	Commercial	Industriel
Plage de variabilité du diamètre D_{50} (μm)	6.63-103.57	7.72-163.77	2.65-190.8
Moyenne de taille (μm)	31.87	62.57	52.54

Egodawatta (2007) a constaté que la taille des particules diminue avec l'augmentation du nombre de jours secs (Figure 2.4). Wijesiri et al (2015) trouvent que la fraction des particules de taille inférieure à 150 μm diminue avec l'augmentation du nombre de jours secs, alors que celles de taille supérieure à 150 μm augmente sur la même période.

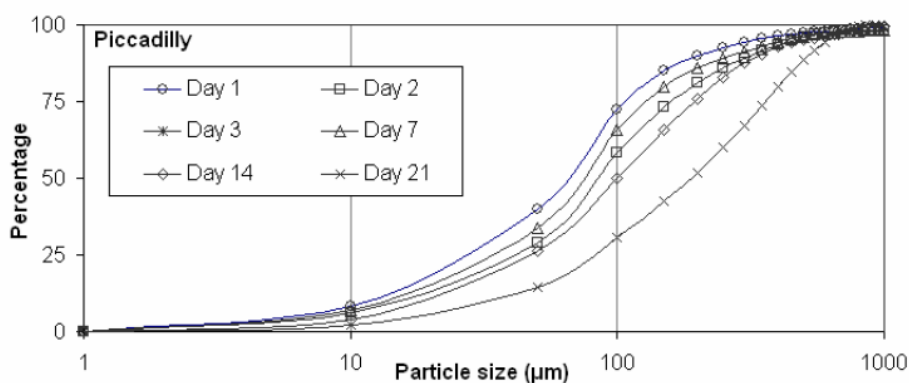


Figure 2.4 Variation de la distribution de la taille des particules en fonction du nombre de jours secs (Egodawatta, 2007)

Plusieurs études ont indiqué que les particules grossières présentent un comportement différent de celui des particules fines durant le processus de dépôt. Les particules grossières se déposent

rapidement sur la surface de la route, alors que les particules fines peuvent rester plus longtemps en suspension dans l'atmosphère en raison d'une vitesse de sédimentation plus lente (Kayhanian et al., 2007; Roger et al., 1998). Roesner (1982) a noté que la distribution des particules peut évoluer pendant le processus de dépôt à cause d'une variation de la fraction de particules fines. D'après Namdeo et al (1999) et Novotny et al (1985), cette variation est due au vent et aux turbulences générées par le trafic qui mettent en suspension les particules les plus fines.

A partir de la connaissance des mécanismes de dépôts et des facteurs influents, des modèles ont été développés pour prédire la concentration des particules sur la surface de la route (notations d'origine des auteurs) :

Modèle de Egodawatta (2007)

$$C = aD^b \quad (2.1)$$

Avec C est la concentration de dépôt (g/m^2) ; D est le nombre des jours secs ; a et b sont des coefficients à ajuster.

Modèle de Liu et al (2011)

$$M = \frac{A}{D} \times (1 - e^{-Dt}) \quad (2.2)$$

Avec M est l'accumulation de masse de polluants en fonction de temps (g/m^2) ; t est le nombre de jours secs (j) ; A est le taux de dépôt ($\text{g/m}^2/\text{j}$) ; D est un coefficient représentant l'enlèvement des polluants de la surface par plusieurs mécanismes comme le vent, le trafic, le balayage des rues, la dégradation chimique et biologique et le lavage par la pluie.

2.2.3.2. Phase de lessivage

En phase de lessivage, la relation entre l'intensité et la durée de précipitation et l'évolution de la concentration des particules est étudiée. Des travaux menés par Egodawatta et al (2007), Pitt (1987) et Vaze and Chiew (2003), montrent que la concentration des particules sur la route durant une précipitation d'intensité constante peut être représentée par une fonction exponentielle :

$$L(t) = L_0(1 - e^{-kI_c t}) \quad (2.3)$$

Où L(t) est la masse de particules lavées après un temps t ; L_0 est la masse initiale des particules en surface ; k est le coefficient de lessivage ; I_c est l'intensité de la pluie.

Sartor and Boyd (1972) ont trouvé que le coefficient k est indépendant de l'intensité de la pluie et de la taille des particules. Cependant, ce coefficient varie en fonction de la texture de la chaussée.

D'après Egodawatta et al (2007), une précipitation a la capacité de laver seulement une fraction de polluants. La Figure 2.5 montre que la fraction de taille la plus importante des particules lavées en phase de lessivage est comprise entre 0 et 200 μm . L'eau de ruissellement emportera donc de préférence des particules de taille inférieure à 200 μm . On voit également que les pluies fines (20 mm/h) laissent les particules en place ; cette observation explique pourquoi le mélange visqueux d'eau et de particules est plus susceptible de se produire sous une pluie fine.

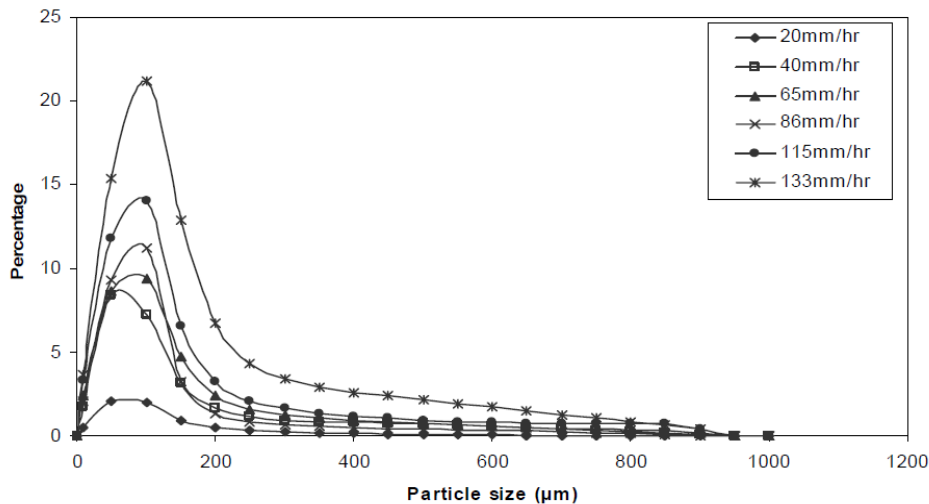


Figure 2.5 Variation de la distribution de la taille des particules (Egodawatta and Goonetilleke, 2008)

Le modèle de lessivage a été modifié par l'introduction d'un « facteur de capacité » (C_F), comme présenté ci-dessous :

$$F_L = \frac{L}{L_0} = C_F(1 - e^{-kI_c t}) \quad (2.4)$$

Où C_F prend une valeur de 0 à 1 qui dépend de l'intensité de la pluie.

Egodawatta et al (2007) ont constaté que l'énergie cinétique de la pluie et la turbulence créées en ruissellement sont des facteurs importants qui influent sur C_F . Une intensité de pluie forte peut mobiliser les particules grossières par la création d'une turbulence forte. Basé sur la Figure 2.5, ces auteurs ont défini C_F pour trois gammes d'intensités de pluie : $I_c < 40$ mm/h ; $40 < I_c < 90$ mm/h ; et $I_c > 90$ mm/h.

2.3. Adhérence en présence d'eau

2.3.1. Définitions

Le terme « adhérence » est largement utilisé dans la littérature, néanmoins, sa définition ne fait pas l'unanimité même parmi les experts. La définition adoptée dans le cadre de nos travaux est la suivante : « L'adhérence désigne des forces de contact développées à l'interface entre le pneumatique et la surface de chaussée permettant de conserver la trajectoire désirée d'un véhicule lors d'une manœuvre de conduite » (Do, 2010).

Le coefficient de frottement est une grandeur conventionnelle qui illustre le potentiel d'adhérence qu'offre un couple gomme/sol. Deux composantes de l'adhérence sont à distinguer : l'adhérence transversale évaluée au travers d'un coefficient de frottement transversal et l'adhérence longitudinale, évaluée par un coefficient de frottement longitudinal. La composante longitudinale F_x se manifeste en situation d'accélération ou de freinage en ligne droite. La composante transversale de l'adhérence F_y 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. Dans la suite, on s'intéressera uniquement à la composante longitudinale de l'adhérence.

Le coefficient de frottement « μ », qui représente l'adhérence, est défini par la formule suivante :

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad (2.5)$$

Avec F_x est la force de frottement ; F_z est la force verticale exercée entre le pneumatique et la surface de chaussée.

Au moment du freinage, la vitesse angulaire des roues diminue et la vitesse de roulement du pneu devient inférieure à la vitesse de défilement du sol : pour compenser cette différence, les pneus commencent à glisser selon un certain taux de glissement. Il est défini par le rapport entre la vitesse de glissement pneu/sol et la vitesse d'avancement du véhicule :

$$s = \frac{V - wr}{V} \quad (2.6)$$

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

Lors du freinage, le taux de glissement peut varier entre 0 et 1 et peut être exprimé en pourcentage. Lorsqu'il est égal à 1, il s'agit d'un freinage en roue bloquée où la vitesse de rotation de la roue est nulle. La Figure 2.6 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, des propriétés de la gomme du pneu et de la présence de contaminants sur la chaussée.

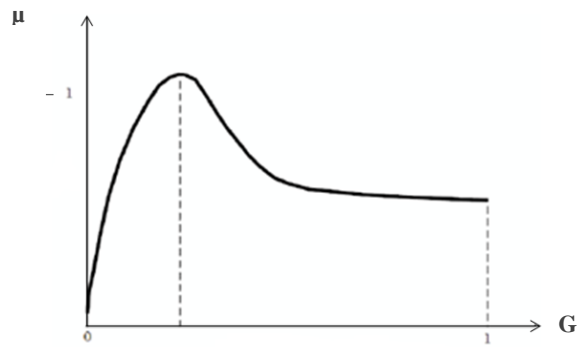


Figure 2.6 Évolution typique du Coefficient de frottement transversal en fonction du taux de glissement

2.3.2. Mécanismes

2.3.2.1. Génération des forces de frottement

Dans le phénomène d'adhérence, deux mécanismes de sollicitation interviennent sous l'effet d'un glissement relatif entre le pneu et le sol :

- Phénomène d'indentation : ce phénomène est lié aux déformations locales et répétées de la bande de roulement provoquées par les aspérités de la surface. La dissymétrie de l'enveloppement des aspérités par la gomme, due au caractère viscoélastique de la gomme, entraîne une répartition dissymétrique du champ de pressions de contact. Cette dissymétrie donne ainsi naissance à une composante verticale qui équilibre la charge normale et une composante horizontale qui résiste au mouvement du pneumatique (Figure 2.7a). Ce phénomène est connu aussi sous le nom d'hystérésis.
- Phénomène d'adhésion : Le contact direct entre la gomme et la surface sur laquelle elle glisse provoque une adhésion entre ces deux corps due aux liaisons moléculaires à l'interface du contact. Sous l'effet du mouvement relatif entre le pneu et la chaussée, ces liaisons se créent, s'étirent, se rompent et se recréent plus loin. Ces cycles répétés d'étirement et de rupture dissipent de l'énergie, et créent une force qui s'oppose au mouvement du pneu (Figure 2.7b). Ces mécanismes interviennent sur les échelles de texture du sol les plus petites (l'échelle nanométrique).

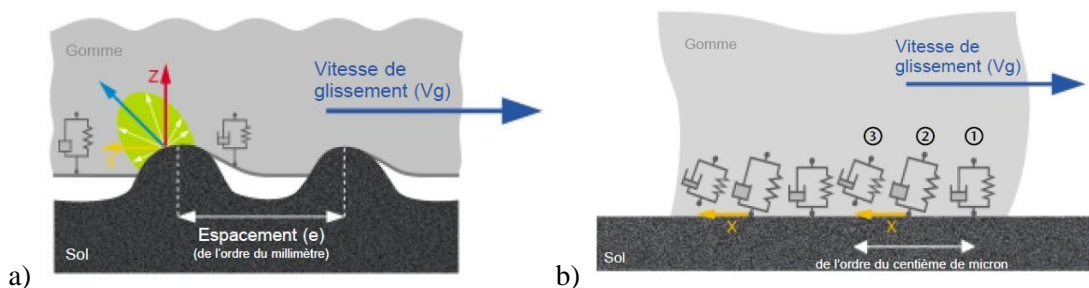


Figure 2.7 Mécanismes physiques à l'origine de la génération d'adhérence (MICHELIN, 2001) : a) mécanisme d'indentation, b) mécanisme d'adhésion.

2.3.2.2. Lubrification en présence d'eau

En présence d'eau, l'aire de contact pneumatique/chaussée est décomposée schématiquement en trois zones (Figure 2.8):

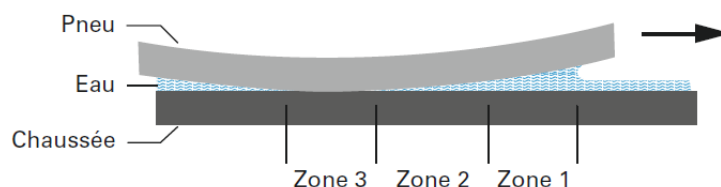


Figure 2.8 Aire de contact entre pneumatique et chaussée en présence d'eau (Do, 2005).

- La zone 1 est celle où l'eau s'accumule devant le pneu et exerce une pression tendant à le soulever ; il s'agit du phénomène d'aquaplanage.
- La zone 2 est celle où l'eau est évacuée progressivement jusqu'à ce que le film d'eau devienne discontinu. Le film d'eau devient mince mais il empêche toujours le contact entre le pneu et le revêtement ; il s'agit du phénomène de viscoplanage. Le terme « visco » est utilisé pour différencier la perte de contact par un film mince ($\approx 100\mu\text{m}$) de l'hydroplanage où le film d'eau dépasse le millimètre.
- La zone 3 est celle où le contact est établi entre le pneumatique et les aspérités de la chaussée. Les forces de frottement sont générées dans cette zone.

2.3.3. Facteurs influents

Le frottement généré dans le contact entre le pneu et la chaussée dépend de nombreux paramètres qui influent directement sur les phénomènes d'adhérence. La liste suivante, non exhaustive, présente ces principaux facteurs influents de l'adhérence :

- la surface.
- Paramètres liés au pneu : structure et dimensions du pneu, pression de gonflage, sculpture de la bande de roulement, composition de la gomme.
- Paramètres liés aux conditions du contact : mouillage (hauteurs de film d'eau), contaminations autres que l'eau, vitesse du véhicule, taux de glissement du pneumatique, température.
- Autres paramètres liés au véhicule : comportement dynamique du véhicule, répartition des charges à la roue, distribution du freinage entre les pneus.

On se concentre dans cette partie, plus particulièrement, sur les conditions de surface de chaussée, notamment, la texture avec ses deux échelles et la présence d'eau.

2.3.3.1. Echelles de texture

Les surfaces des chaussées sont rugueuses et présentent donc une texture. Cette dernière provient de celle des granulats (sable et gravillons) et du mode de mise en œuvre du revêtement. Elle est donc composée d'aspérités de tailles variables, qui peuvent être observées à deux échelles : une échelle à la dimension des granulats, visible à l'œil nu, et une échelle de rugosité sur les granulats, non visible, mais sensible au toucher. Les deux échelles dites « de texture » sont ainsi définies : la macrotexture et la microtexture (Figure 2.9) :

- La macrotexture correspond à des irrégularités de surface dont les dimensions sont comprises entre 0,1 mm et 20 mm verticalement et entre 0,5 mm et 50 mm horizontalement (ISO, 1997).
- La microtexture correspond à des irrégularités de surface dont les dimensions sont inférieures à 0,5 mm verticalement et horizontalement (ISO, 1997).

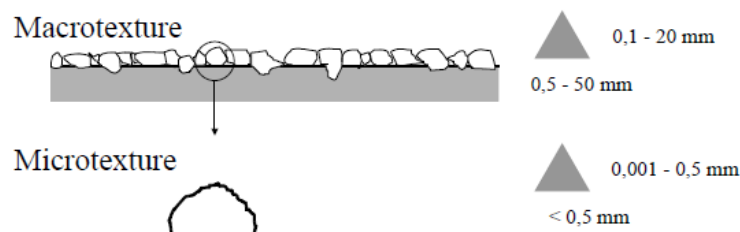


Figure 2.9 Schéma représentatif des deux échelles de texture (ISO, 1997).

Le rôle de la macrotexture, conjointement avec la profondeur des sculptures de la bande de roulement du pneu, est d'évacuer la quantité d'eau dans la zone 1 de l'aire de contact (Figure 2.8). Ce drainage se fait à travers des vides entre les granulats pour les chaussées. Une fois que le film d'eau épais est évacué par la macrotexture, il reste un film d'eau mince dans la zone 2 (Figure 2.8) et, localement dans la zone 3 (Figure 2.8), de l'eau est aspirée au sommet des aspérités. Ces films d'eau résiduels ne peuvent être brisés que par les fines aspérités qui constituent la microtexture. Ces aspérités empêchent ainsi l'effet lubrifiant de l'eau et permet le rétablissement d'un contact direct entre la gomme et la surface de la chaussée. Les forces de frottement sont ensuite générées par l'interaction entre la gomme du pneu et la microtexture de la surface.

2.3.3.2. Macrotexture et vitesse

La Figure 2.10 montre des variations typiques de l'adhérence avec la vitesse pour différentes macro- et microtextures. On voit qu'une faible macrotexture induit une décroissance rapide de l'adhérence avec la vitesse alors qu'une forte macrotexture permet de maintenir l'adhérence lorsque la vitesse augmente.

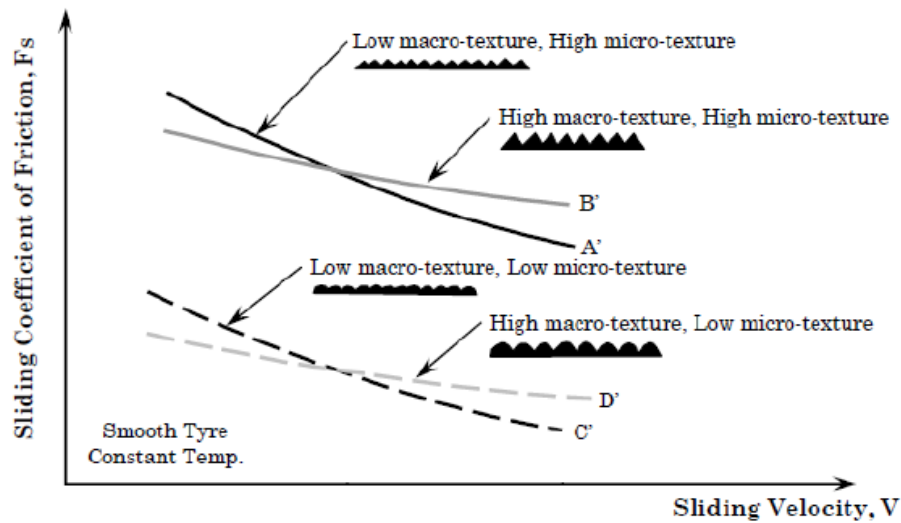


Figure 2.10 Influence de la texture sur le frottement pneu/chaussée (Hall et al., 2006)

2.3.3.3. Microtexture

Selon Moore (1971), la microtexture est l'échelle la plus importante de la texture pour parer à l'érosion de l'aire de contact par viscoplanage. L'auteur a étudié le rapport entre l'épaisseur du film d'eau résiduel h_{res} et la hauteur moyenne des aspérités à l'échelle de la microtexture h_{mic} . Un premier critère de contact est donc d'avoir $h_{res}/h_{mic} > 1$. Moore a ensuite montré que la valeur du rapport h_{res}/h_{mic} dépend de la forme des aspérités : h_{res} est plus élevé pour les aspérités plus arrondies et augmente à mesure que la vitesse de glissement relative augmente (Moore, 1975) ; à l'inverse, une forme conique des aspérités favorise plus la pénétration des aspérités dans la gomme et la rupture des films d'eau résiduels, ce qui favoriserait donc plus l'adhérence qu'une forme arrondie ou sphérique.

L'étude de l'effet de la microtexture sur le frottement pneu/chaussée est basée sur trois principaux types de paramètres caractérisant la microtexture du revêtement routier, à savoir : hauteur, forme et densité. Un compromis de ces trois paramètres est nécessaire pour rétablir un contact direct entre le pneu et la surface de la chaussée sans user excessivement le pneu.

La hauteur des aspérités est généralement représentée par R_q (hauteur quadratique moyenne), appelé aussi « RMS » (Root Mean Square : hauteur quadratique moyenne). Do et al (2013) ont étudié la relation entre le coefficient de frottement et le RMS de la microtexture des chaussées sèches et mouillées. Ils ont montré que le frottement diminue avec l'augmentation du RMS de la surface sèche et, inversement, il augmente avec l'augmentation du RMS des surfaces mouillées. En effet, le frottement d'une surface sèche dépend de l'aire de contact disponible qui diminue lorsque la rugosité de la surface augmente (Figure 2.11). Pour les surfaces mouillées, on constate que le frottement augmente nettement au-dessus d'un seuil de RMS (environ $6\mu m$) pour 0,3 et 0,5mm de profondeur d'eau. Cependant, aucune augmentation nette n'est observée pour 1 mm de profondeur d'eau ; on

suppose que, pour les niveaux de microtexture étudiés par ces auteurs, de nombreuses aspérités sont masquées à cette épaisseur d'eau et donc leur contribution au frottement serait négligeable.

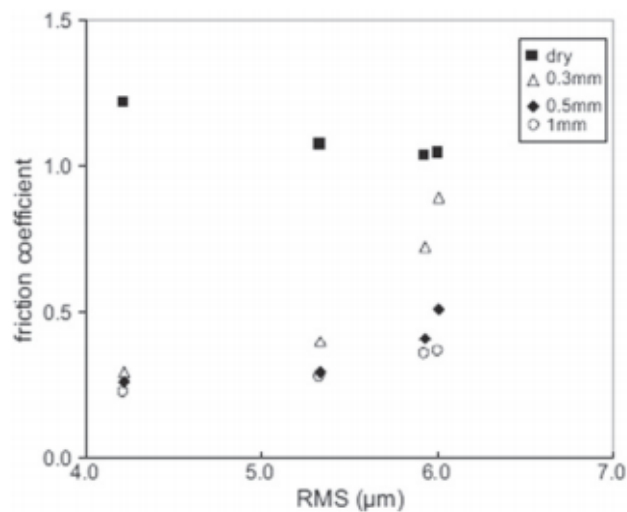


Figure 2.11 Variation du coefficient du frottement en fonction de la microtexture (Do et al., 2013).

Le paramètre de hauteur RMS peut être utilisé pour évaluer les mécanismes de lubrification ou donner une estimation générale sur la hauteur des aspérités. Il n'est pas suffisant pour décrire la microtexture et prédire l'adhérence des chaussées. Une description locale de la microtexture paraît plus pertinente. La description locale de la microtexture revient à caractériser les aspérités par des descripteurs de forme qui contribuent à la répartition de la pression du contact et à l'évacuation de l'eau. Greenwood (1984) a introduit la courbure des aspérités comme descripteur local des aspérités. Elle est définie comme l'inverse du rayon du cercle qui entoure l'aspérité. De nombreux auteurs ont considéré les aspérités de surface comme des triangles et ont cherché à caractériser leur forme et à la corréler au coefficient de frottement. Forster (1981) a défini les sommets et les vallées sur un profil comme des maximum et minimum locaux et il a caractérisé la forme des aspérités par l'angle aux sommets. Celle-ci a été bien corrélée au frottement. Zahouani et al (2000) ont adapté la méthode de combinaison de motifs (Fahl C F, 1982) aux surfaces routières. Ils définissent un « indenteur » comme une aspérité formée par un sommet et les deux vallées voisines. La microtexture est caractérisée ainsi par l'angle aux sommets et aussi par le relief. Celui-ci est caractérisé par l'effet combiné de la hauteur et de l'espacement des aspérités. Il a été montré que le frottement est lié à ces paramètres de forme.

2.3.3.4. Eau

Lorsque l'une des surfaces de contact est mouillée, les liaisons moléculaires deviennent négligeables. On admet donc généralement que le frottement pneu/chaussée en présence d'eau provient uniquement de la déformation de la gomme par des aspérités de chaussée (Do, 2005). Ce mécanisme d'indentation est également perturbé dès que la hauteur d'eau est suffisante pour couvrir les rugosités de la chaussée.

L'évolution des hauteurs d'eau sur les chaussées présente un intérêt pour la compréhension de leur influence sur la contrôlabilité des véhicules. Do et al (2013) ont étudié la variation de l'adhérence en fonction de la hauteur d'eau avec trois vitesses données (Figure 2.12a) et quatre différents niveaux de microtexture (lisse E0 et rugueuse pour E1, E2 et E3) (Figure 2.12b).

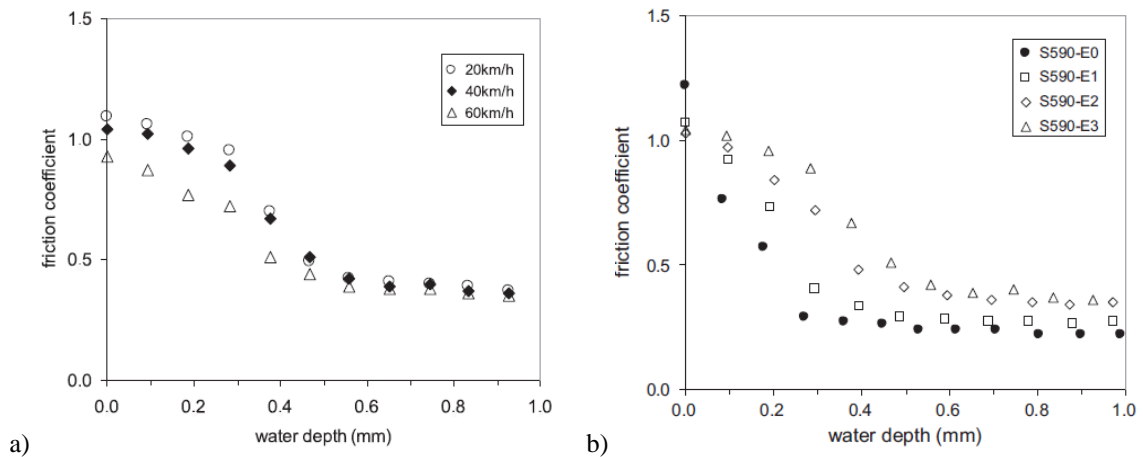


Figure 2.12 Evolution de l'adhérence en fonction de la hauteur d'eau : a) avec différentes vitesses, b) avec différentes microtexture (Do et al., 2013).

L'allure des graphes dans les Figure 2.12 et Figure 2.12 rappelle celle de la courbe de Stribeck (voir 2.5.2.1). Si on se réfère aux trois régimes de lubrification décrits par cette courbe, on voit qu'à faible vitesse de glissement et faible hauteur d'eau, le contact pneu/chaussée est plutôt dans le régime de lubrification limite. Cependant, une absence de microtexture (E0) entraîne aussitôt le contact dans un régime de lubrification mixte. Il existe aussi une hauteur d'eau critique (environ 0,1 mm) qui entraîne le contact dans un régime de lubrification mixte quels que soient les niveaux de microtexture et de vitesse.

Dans un contact pneu/chaussée, il est rare de pouvoir observer la courbe complète de Stribeck ; on observe la plupart du temps le régime mixte de lubrification. De ce fait, la variation de l'adhérence avec la vitesse est souvent présentée sous la forme des courbes de la Figure 2.10.

2.3.4. Méthodes de mesure

Il existe de nombreux moyens pour mesurer l'adhérence des chaussées. La classification utilisée ici consiste à séparer les appareils qui mesurent un coefficient de frottement de ceux qui mesurent (ou estiment) les deux échelles de macro- et microtexture.

2.3.4.1. Mesure d'un coefficient de frottement

Chaque appareil de mesure a des caractéristiques spécifiques (vitesse, taux de glissement, gomme, etc.) et, compte tenu de la dépendance des forces de frottement de nombreux facteurs (2.3.3), il est essentiel de savoir que les valeurs de coefficient de frottement obtenues ne sont pas toujours comparables. Comme il existe de nombreux appareils, cet état de l'art se limitera à quelques exemples pour illustrer cette variété.

Pendule Skid Resistance Tester (SRT)

Le pendule SRT est un appareil statique, permettant 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 sur une chaussée (Figure 2.13). La mesure est normalisée par une norme européenne (NF EN 13036-4). Le pendule SRT porte, à l'extrémité de son bras articulé, un patin de caoutchouc frottant pendant l'essai sur la surface à mesurer. Pendant le frottement, un ressort applique le patin sur cette surface avec une force connue. Un dispositif de réglage permet de maintenir la longueur de frottement dans les limites déterminées. La hauteur maximale de remontée de pendule est repérée par une aiguille placée devant un cadran gradué directement en « coefficient de frottement mesurés par le pendule ».

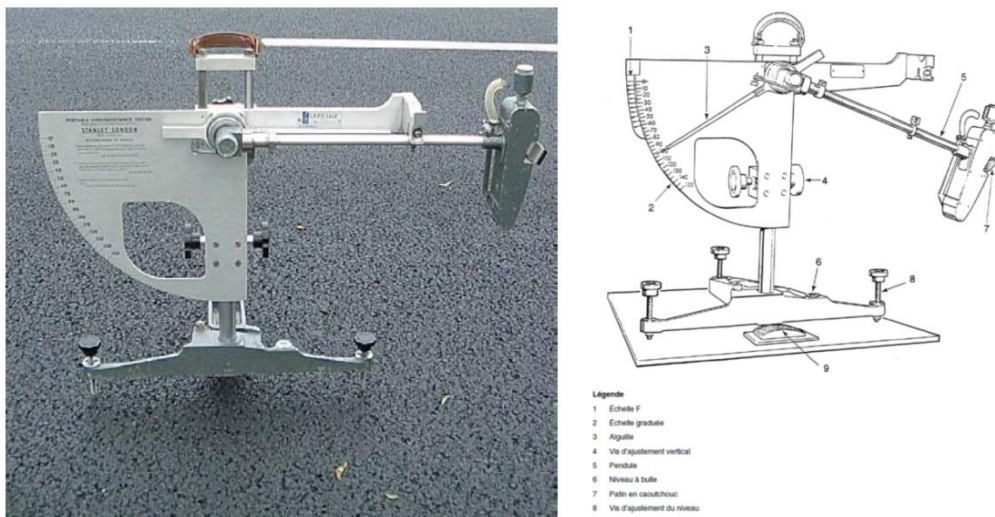


Figure 2.13 Pendule SRT.

Dynamic Friction Tester (DFT)

Le DFT est un dispositif permettant d'effectuer une mesure ponctuelle de coefficient de frottement sur une surface aussi bien en laboratoire que sur le terrain. La mesure est normalisée par une norme américaine (ASTM E1911). Il est composé d'une unité de mesure (Figure 2.14) et d'une unité de contrôle. L'unité de mesure se compose d'un plateau rotatif circulaire, équipé de trois patins de gommes spécifiques. La charge statique appliquée sur chaque patin lorsqu'il rentre en contact avec la surface du revêtement est de 11,8 N. Au cours d'un essai standard, le disque supportant les trois patins d'essais est accéléré jusqu'à la vitesse de 80 km/h, la surface à tester est mouillée (jusqu'à obtenir une épaisseur de film d'eau de l'ordre de 1 mm) puis le moteur est coupé et les patins sont mis en contact avec la surface à tester. La vitesse du disque décroît alors jusqu'à arrêt complet sous

l'effet des forces de frottement générées à l'interface patins/revêtement. Ce dispositif permet ainsi de simuler le comportement d'un pain de gomme de pneumatique, roue bloquée.

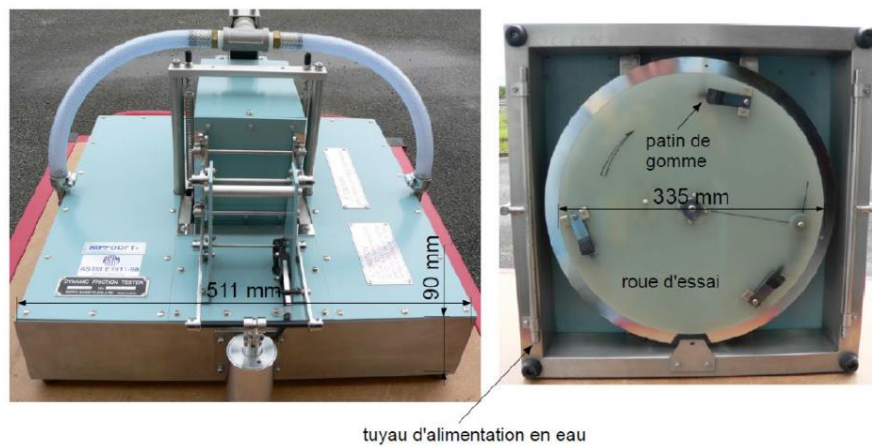


Figure 2.14 Dynamic Friction Tester DFT.

ADHERA

L'équipement est constitué d'une remorque monoroue, tractée par un véhicule aménagé pouvant atteindre une vitesse de 120 km/h (Figure 2.15). Les mesures sont normalement effectuées dans le flot de la circulation. La roue de la remorque, chargée de 2500 N et équipée d'un pneumatique lisse, est tractée à vitesse constante par le véhicule assurant le mouillage du revêtement. La roue est bloquée sur une longueur de 20 m de la zone à tester ; on mesure le couple moyen des forces tendant à la réentraîner, ce qui permet d'estimer les forces de frottement. Cet appareil est utilisé pour des études particulières (zones d'accidents, évaluation de nouvelles formules d'enrobé, etc.) et n'est pas adapté aux mesures à grand rendement.



Figure 2.15 ADHERA (Gothié, 2005).

2.3.4.2. Mesure de la texture

Mesure des indicateurs de texture

Pour la microtexture, compte tenu de son influence plus visible à faible vitesse (même si sa présence est nécessaire à toutes les vitesses), une mesure de coefficient de frottement à faible vitesse de glissement (< 40 km/h, comme la mesure au pendule SRT) est utilisée comme un indicateur indirect de la microtexture.

La macrotexture peut être évaluée par une profondeur moyenne de texture (PMT). L'essai est normalisé (NF EN 13036-1) et consiste à mesurer le diamètre D d'une tache circulaire formée par un volume V connu de billes de verre calibrées, versées et arasées sur la surface à caractériser. La méthode de mesure est présentée dans la Figure 2.16. La PMT est calculé alors en divisant le volume V par la surface circulaire correspondant au diamètre D , soit $PMT = V/(\pi D^2/4)$.

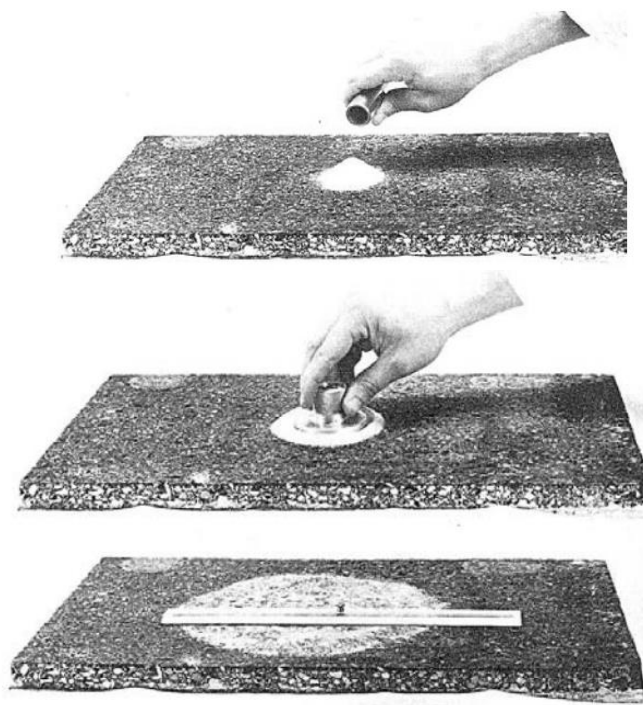


Figure 2.16 Mesure volumique dite « à tache » (Gothié, 2005).

L'essai à la tâche ne permet pas d'évaluer la macrotexture sur un long itinéraire routier. Pour pallier à cet inconvénient, l'appareil RUGO a été développé. Cet appareil se compose d'un émetteur à rayon laser et d'un potentiomètre optique (Figure 2.17) et est installé sur un véhicule roulant entre 30 et 100 km/h. Un algorithme permet calculer, à partir d'un profil de hauteurs, le paramètre de profondeur moyenne de profil (PMP) qui est corrélé à la PMT (NF EN ISO 13473-1).

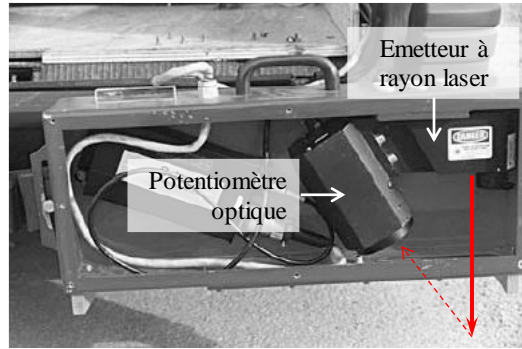


Figure 2.17 Capteur laser de l'appareil RUGO (Gothié, 2005).

Mesure des profils ou cartographies de hauteurs

Les méthodes de mesure citées ci-dessus sont utilisées dans un cadre opérationnel et ne permettent d'accéder aux aspérités appartenant à l'échelle de la microtexture. Pour des analyses plus approfondies, on a recours à des capteurs à hautes résolutions qui ne peuvent être utilisés qu'en laboratoire sur des échantillons à dimensions réduites (20 cm x 20 cm comme ordre de grandeur).

Dans le cadre de cette thèse, les cartographies de hauteurs des surfaces étudiées ont été mesurées avec le capteur Infinite Focus d'Alicona. C'est une unité de mesure optique tridimensionnelle de forme et de rugosité de surface à haute résolution verticale (Figure 2.18). Cette machine utilise le principe de la variation focale, où un 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 change progressivement lors d'un mouvement de ce dernier, la variation de contraste point par point est calculée afin de déduire la position de chaque point.

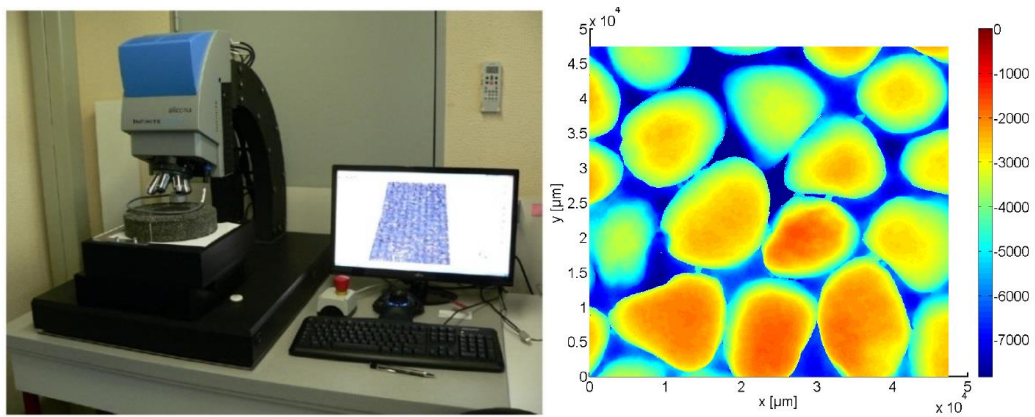


Figure 2.18 a) Capteur Infinite Focus de Alicona, b) Exemple de cartographie de hauteurs.

2.4. Adhérence en présence d'autres contaminants que l'eau

Les paragraphes précédents ont permis de mieux connaître la provenance et la composition des contaminants (2.2) et d'introduire des notions générales sur l'adhérence (2.3). Dans ce paragraphe, les travaux existants sur l'adhérence des chaussées contaminées seront présentés. Comme les études sur l'adhérence traitent généralement du cas de l'eau, ce paragraphe est dédié aux contaminants autres que l'eau, en particulier les particules.

2.4.1. Description des phénomènes

Bennis et De Witt (2003), comme d'autres auteurs comme Bird and Scott (1936) et Persson et al (2005), ont fourni une représentation qualitative de l'adhérence d'une chaussée contaminée durant une période sèche suivie d'une précipitation (Figure 2.19).

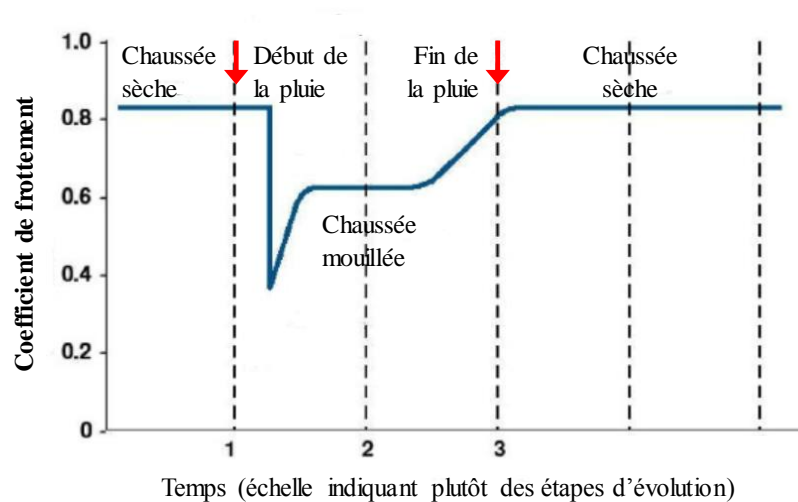


Figure 2.19 Variation de l'adhérence d'une chaussée contaminée pendant une période sèche suivie d'une précipitation (d'après Bennis and De Wit, 2003).

Pendant la période sèche (dépôt des contaminants), le coefficient de frottement reste stable. Il chute ensuite brutalement à la transition entre les périodes sèche et pluvieuse jusqu'à atteindre un minimum (étape 1). Dès que la chaussée est lavée par l'eau de pluie, le coefficient de frottement remonte et se stabilise (étape 2). Après la pluie, la chaussée sèche et le coefficient de frottement remonte à son niveau initial (étape 3). Persson et al (2005) attribue la chute brutale du coefficient de frottement (étape 1) à la viscosité du mélange d'eau et de particules. La remontée du coefficient de frottement dans l'étape 2 s'expliquerait par l'enlèvement des particules par l'eau de ruissellement et diminuant ainsi la viscosité du mélange. La remontée dans l'étape 3 est due au séchage de la chaussée et restituant le contact direct entre le pneu et la chaussée.

On remarque que, malgré l'apparition du graphe de la Figure 2.19 dans de nombreuses publications, la nature du contaminant n'est pas communiquée. En particulier, la valeur de la viscosité

du mélange d'eau et de particules n'est pas connue. Il n'y a donc pas de consensus sur les types de contaminants à étudier. De ce fait, la littérature sur les contaminants autres que l'eau est dispersée et, malgré l'importance de ces contaminants dans l'accidentologie routière, il est difficile d'en établir un état de l'art structuré comme dans le cas de l'eau avec des étapes comme les mécanismes, les facteurs influents et les méthodes de mesure. Les paragraphes suivants montrent donc un bilan des travaux antérieurs sur l'influence du type de contaminants et fait ensuite un focus sur le cas particulier des particules qui font l'objet de cette thèse.

2.4.2. Influence du type de contaminants

Lambourn et Viner (2006) ont conduit des expérimentations sur routes également en variant davantage les contaminants. Ces auteurs ont utilisé un appareil similaire à ADHERA (2.3.4.1) et testé deux surfaces (enrobé bitumineux et béton) recouvertes des contaminants suivants : eau, huile de moteur (seule ou mélangée avec l'eau ou des produits absorbants), argile mélangée avec de l'eau, et du sable grossier (taille non précisée). Sans pouvoir faire des mesures à sec (à cause de l'endommagement des pneus d'essais), ces auteurs ont constaté une chute de l'adhérence par rapport à un état mouillé (coefficient de frottement $\mu = 0,68$) lorsque la chaussée est contaminée par de l'huile ($\mu = 0,01$ sur l'enrobé et $0,24$ sur le béton), de l'argile mouillée (μ de $0,28$ et $0,38$ respectivement), ou du sable (μ de $0,14$ et $0,25$ respectivement).

Tyfour (2009) a étudié en laboratoire l'effet de trois types des contaminants en les mélangeant avec de l'eau et les déposant sur la surface d'un enrobé. Les contaminants utilisés sont : une poudre de silice, une poudre de particules de pneu et une huile minérale (les particules sont de taille de 0 à $200 \mu\text{m}$ et la concentration dans l'eau est de 3%). Cet auteur a trouvé que la chute la plus significative du coefficient de frottement est associée au mélange eau-huile. L'effet des particules de silice est plus marquant que celui des particules de pneus (Figure 2.20).

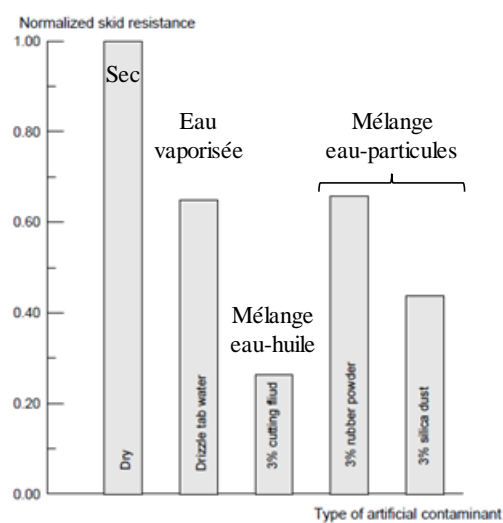


Figure 2.20 Frottement d'une surface contaminée (Tyfour, 2009)

2.4.3. Cas particulier des contaminants particulaires

2.4.3.1. Influence du dépôt des particules

Hill et Henry (1981) ont réalisé des mesures de frottement à l'aide d'un appareil similaire à ADHERA (2.3.4.1) sur les mêmes sections routières à des périodes différentes définies par le nombre de jours secs après une précipitation. Ces auteurs ont trouvé que le frottement diminue lorsque le nombre de jours secs augmente ; le minimum est atteint après 3 jours secs (Figure 2.21a). Le coefficient de frottement reste ensuite stable pour des périodes sèches allant de 3 à 10 jours (la remontée observée n'est pas significative compte tenu de la précision de ce type d'appareil).

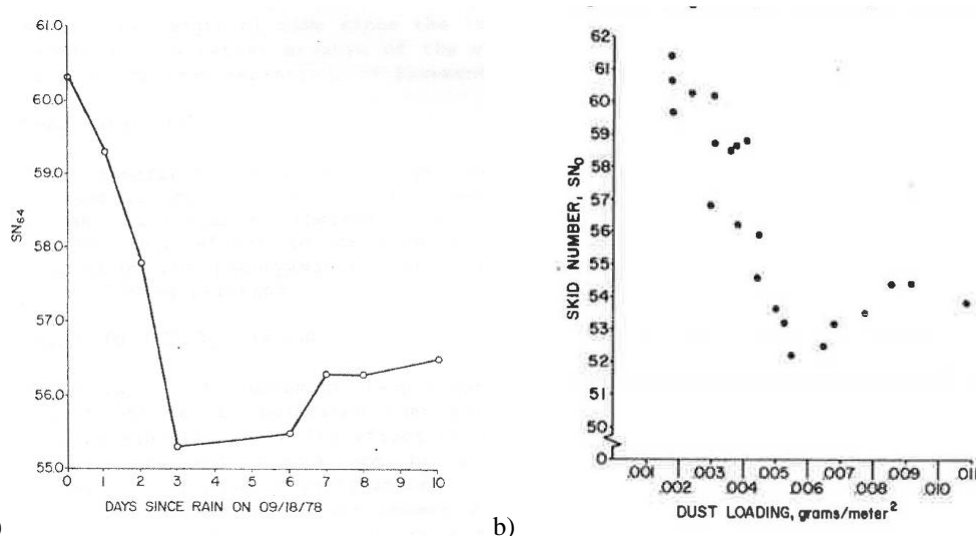


Figure 2.21 Evolution de l'adhérence en fonction a) du nombre de jours secs (Hill and Henry, 1981) et b) de la concentration des particules (Shakely et al., 1980) (coefficient de frottement longitudinal mesuré en présence d'eau avec une roue bloquée ; l'unité SN utilisée correspond à un coefficient de frottement multiplié par 100 et 64 indique la vitesse de glissement en miles/h soit environ 100 km/h)

Cenek et al (2004) confirme la relation entre le frottement et le nombre de jours secs à partir de leurs mesures dans la région de Wellington en Nouvelle Zélande. Les résultats trouvés par Cenek et coauteurs montrent qu'il y a une chute d'au moins 10% du coefficient de frottement après 8 à 11 jours secs. Au-delà de cette période, le frottement se stabilise. On voit que, malgré des tendances similaires, les études ne concordent pas sur le nombre de jours secs correspondant à un minimum de niveau d'adhérence. D'autres facteurs sont donc à prendre en compte.

Shakely et al (1980), en menant des expérimentations similaires à celles de Hill et Henry (1981), a trouvé une relation entre le frottement et la concentration de particules sur la surface de la chaussée. La Figure 2.21b montre que le coefficient de frottement chute lorsque la concentration de particules augmente. Un minimum est atteint pour une concentration d'environ 6 g/m² ; au-delà, le coefficient de frottement reste stable (comme dans le graphe de la Figure 2.21a, la remontée pour les concentrations supérieures n'est pas significative).

Ping et al (2010) ont étudié l'effet du taux de recouvrement de la surface de chaussée par des contaminants sur l'adhérence en utilisant quatre types de contaminants (huile de moteur ; sable de taille variable entre 0,01mm et 0,2mm ; particules friables de taille variable entre 0,5mm et 2mm ; et des particules fines de terre). Les taux de recouvrement étudiés sont montrés dans la Figure 2.22. Ces auteurs ont trouvé que les contaminants réduisent l'adhérence et que la dégradation de l'adhérence est plus importante quand le taux de recouvrement augmente. Pour le cas des particules friables (proches de celles étudiées dans cette thèse), le coefficient de frottement à sec diminue de 15% en moyenne lorsqu'on passe du cas a) au cas b) et jusqu'à 45% dans le cas d). Sur une surface mouillée, la diminution est moins importante (7% et 17% pour les cas b) et d) respectivement). Les mêmes tendances sont observées avec une contamination par du sable, avec une réduction moins importante (32% contre 45% dans le cas d) par exemple).

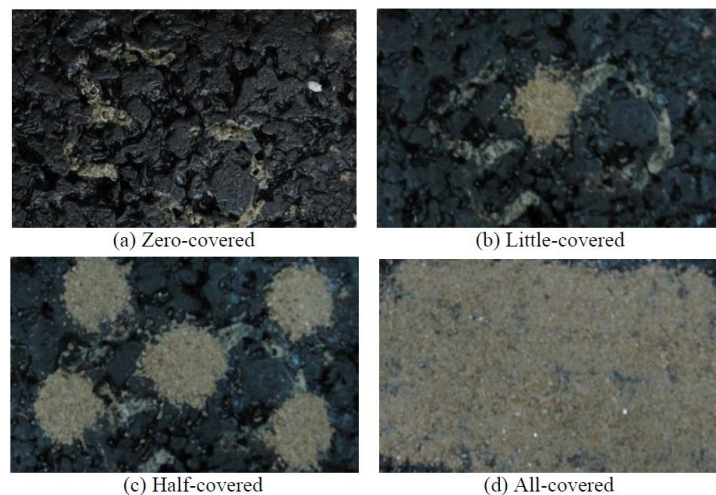


Figure 2.22 Taux de recouvrement étudiés par (Ping et al., 2010)

2.4.3.2. Influence du lessivage des particules

La conduite des expérimentations permettant de confirmer la courbe hypothétique tracée dans la Figure 2.19 dépend des conditions météorologiques. Il était difficile d'évaluer l'adhérence due au dépôt des particules et il est encore plus difficile d'obtenir des informations sur l'impact de leur lessivage. Shakely et al (1980) ont simulé ce lessivage en brossant localement les surfaces testées. Ces auteurs ont observé une augmentation du coefficient de frottement après brossage (Figure 2.23a ; BPN : coefficient de frottement mesuré au pendule SRT). Wilson (2013) a reproduit un graphe de la littérature (source introuvable) montrant une augmentation du coefficient de frottement avec la durée de la pluie (Figure 2.23b).

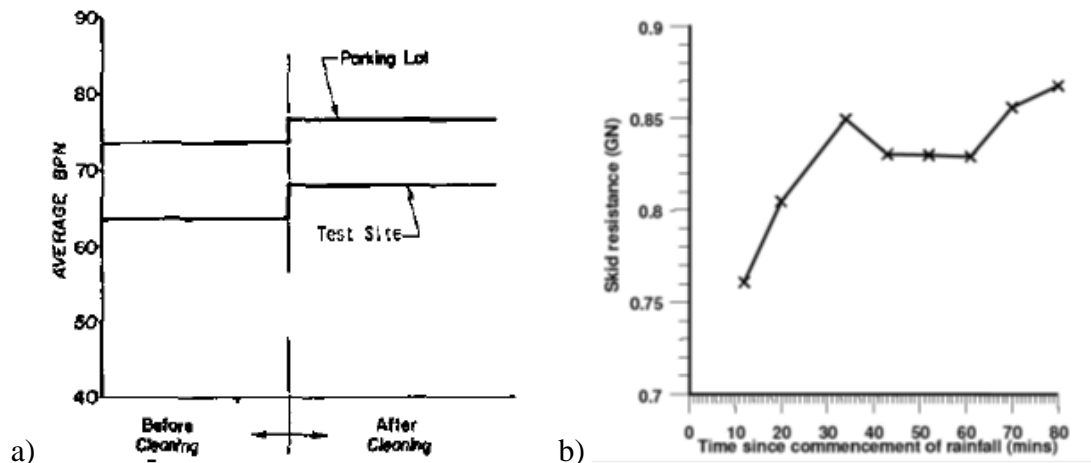


Figure 2.23 Influence du lessivage des chaussées sur l'adhérence : a) Mesures avant/après nettoyage d'une surface contaminée (Shakely et al., 1980) ; b) Suivi de l'évolution de l'adhérence avec la durée de la pluie (Wilson, 2013)

Ces expérimentations confirment donc la remontée de l'adhérence d'une chaussée contaminée par des particules sous la pluie. Cette conclusion peut paraître surprenante car il est généralement admis que l'adhérence diminue quand il pleut. En réalité, il y a bien une réduction de l'adhérence quand il pleut par rapport à une chaussée sèche. Les résultats de la Figure 2.23 permettent de voir l'évolution de l'adhérence sous la pluie et d'expliquer les observations d'Eisenberg (2004) qui a noté que l'occurrence des accidents pendant un jour de pluie dépend de la météorologie des jours précédents : les accidents augmentent s'ils sont précédés d'une période sèche et diminuent si le jour étudié est précédé de pluies.

2.4.4. Bilan des travaux existants

Les travaux existants confirment l'effet néfaste des contaminants sur l'adhérence des chaussées. On voit aussi qu'il existe une large gamme de contaminants pouvant affecter l'adhérence. De ce fait, les études sont éparpillées et, malgré des données expérimentales cumulées depuis des années, il n'y a pas de consensus sur les facteurs influents. Le nombre de jours secs écoulés depuis la dernière pluie est le paramètre le plus cité. La concentration de particules sur la surface de la chaussée est aussi un paramètre important, probablement due au lien établi avec les cycles de dépôt des contaminants (2.2.3.1). Deux autres facteurs semblent être importants également : il s'agit du taux de recouvrement de la surface par les contaminants et de l'état hydrique de la surface (sec/mouillé) de chaussée.

En termes de conduite des expérimentations, on voit qu'il manque un protocole établi comme dans le cas de l'eau (par exemple, mesures systématiques de coefficient de frottement en fonction de la vitesse, de la macrotecture ou de la hauteur d'eau). Enfin, la plupart des études ont été menées sur routes. Quelques études en laboratoire ont été trouvées mais elles se limitent à des constats à partir des mesures de coefficient de frottement.

2.5. Apports de la tribologie

La tribologie désigne la science qui étudie les phénomènes de frottement, de lubrification et d'usure entre deux corps en contact animés d'un mouvement relatif. Il s'agit d'une science pluridisciplinaire (mécanique, chimie, thermodynamique, science des matériaux, etc.).

La synthèse des travaux sur l'adhérence des chaussées contaminées montre la limite des approches actuelles en termes de compréhension des phénomènes et de prédiction. Pour aller plus loin, il est nécessaire focaliser les efforts sur l'interface entre le pneu et la chaussée en présence des particules. Une compréhension des phénomènes à cette échelle (mouvements des particules, interactions entre les particules et le pneu et la chaussée) permettrait de modéliser le frottement lubrifié à l'échelle du contact. La tribologie s'impose donc naturellement comme une voie prometteuse pour atteindre les objectifs cités.

Dans ce paragraphe, deux approches de la tribologie qui semblent prometteuses pour l'étude de l'interface pneu/particules/chaussée seront développées : l'une, approche du troisième corps, serait appropriée pour l'étude de l'interface ; et l'autre, lubrification sèche, serait appropriée pour la prédiction du frottement.

2.5.1. Approche du troisième corps

2.5.1.1. Définition

Le troisième corps est défini comme le volume de matières qui sépare deux solides en contact (premiers corps). Ces matières, dont la composition chimique est différente de celle des constituants des premiers corps, proviennent de l'usure des premiers corps et/ou d'une alimentation externe ; un troisième corps est dit « naturel » dans le premier cas et « artificiel » dans le second. Dans le troisième corps naturel, Denape et al (2001) différencient deux structures désignées comme des « écrans » : écran statique (épaisseur : 0,3 – 100nm) constitué de films (gaz adsorbés, oxydation, etc.) formés par l'interaction entre les surfaces des premiers corps et leur environnement ; et écran dynamique (épaisseur : 0,1 – 100µm) constitué de particules

Longtemps limité à l'estimation – avec la loi d'Archard (1953) par exemple – d'un volume d'usure, le troisième corps peut en réalité remplir d'autres fonctions comme (Godet, 1984) :

- La transmission des charges imposées par le système mécanique (voir le concept du triplet tribologique dans 2.5.1.2) d'un premier corps à l'autre.
- L'accommodation de la différence de vitesses entre les premiers corps.
- La séparation des premiers corps, afin d'éviter leur interaction directe ce qui contribue à la diminution de leur dégradation. Un troisième corps peut donc agir comme un lubrifiant solide.

Au concept du troisième corps initié par Godet s'ajoutent des travaux de Berthier qui a introduit d'autres notions comme le triplet tribologique, le circuit tribologique et les mécanismes d'accommodation (Berthier et al., 1989; Berthier, 1990). Ces ajouts permettent de développer une véritable théorie – « approche du troisième corps » – avec, comme pour d'autres théories de lubrification, des outils de description physique des phénomènes et de prédiction (force normale, frottement, etc.).

2.5.1.2. Triplet tribologique

Un triplet tribologique est composé de trois éléments distincts qui constituent le contact : le système mécanique, les premiers corps et le troisième corps (Figure 2.24). Le système mécanique détermine les conditions de contact (charges, environnement – température, humidité relative, etc. –, vitesses, etc.). A l'échelle d'un laboratoire, ce système peut être un tribomètre pion-disque ou un pendule SRT (2.3.4.1) comme dans cette thèse. A l'échelle 1, il peut s'agir d'un contact pneu/chaussée. Les premiers corps sont les solides en contact. Ils s'accommodent aux sollicitations transmises par le système mécanique (charges, vitesses) ; cette accommodation induit des déformations et des dégradations comme le détachement de matières (particules d'usure), la fissuration, la transformation tribologique des surfaces, etc. Enfin, le troisième corps est défini comme le volume de matière qui sépare les premiers corps.

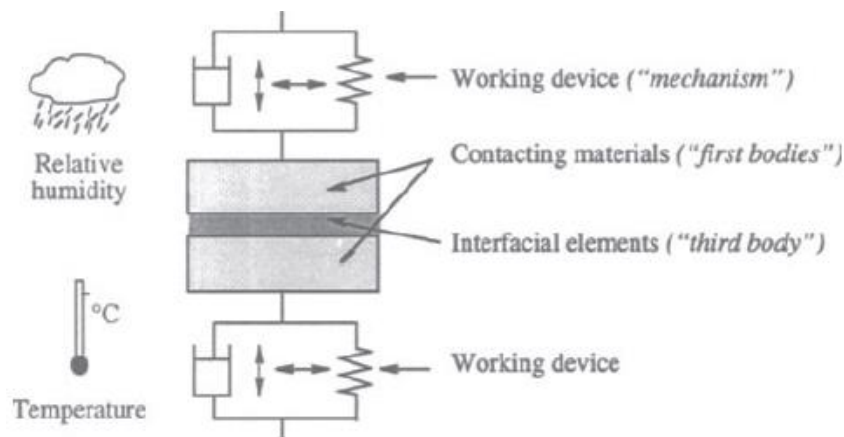


Figure 2.24 Triplet tribologique (d'après Denape et al., 2001)

2.5.1.3. Mécanismes d'accommodation

Berthier et al (1989) ont défini des mécanismes d'accommodation pour tenir compte de la variété de modes de déformation et de dégradation des premiers corps. Selon ces auteurs, un mécanisme d'accommodation est lié à un « site » et un « mode d'accommodation ». Ils ont défini 6 sites et 5 modes comme illustrés dans la Figure 2.25.

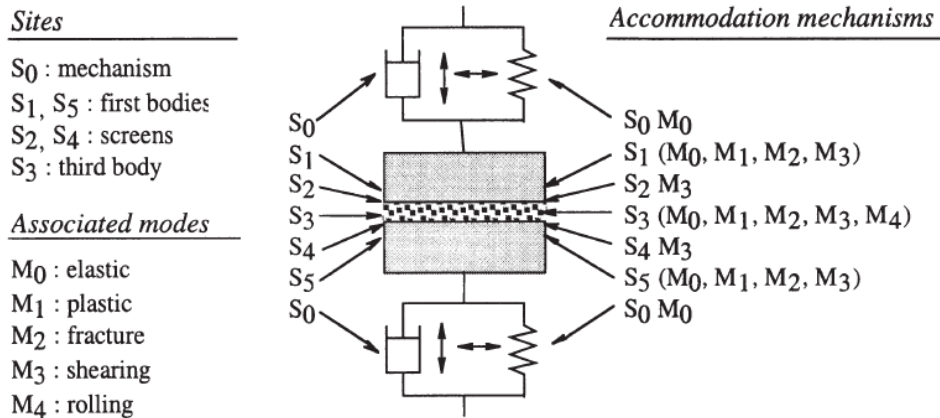


Figure 2.25 Définitions des sites et des modes d'accommodation (d'après Denape et al., 2001)

Les 6 sites sont : S_0 : le système mécanique ; S_1 et S_5 : les premiers corps ; S_2 et S_4 : les écrans statiques ; S_3 : le troisième corps. Les 4 modes sont : M_0 : la déformation élastique ; M_1 : la déformation plastique ; M_2 : la rupture ; M_3 : le cisaillement ; M_4 : le roulement.

Toutes les combinaisons entre les sites et les modes d'accommodation ne sont pas observables. D'après Denape et al (2001), neuf sont fréquemment observés (Figure 2.26) : $(S_0 + S_1)M_0$: déformation élastique des solides ; S_1M_1 : déformation plastique sans perte de matière ; S_1M_2 : fissuration en surface ; S_1M_3 : cisaillement en surface induisant des détachements de matières ; S_2M_3 : cisaillement dans l'écran statique ; S_3M_1 : déformation plastique du troisième corps ; S_3M_2 : fissuration dans la couche du troisième corps ; S_3M_3 : cisaillement dans la couche du troisième corps ; S_3M_4 : roulement des particules constituant le troisième corps.

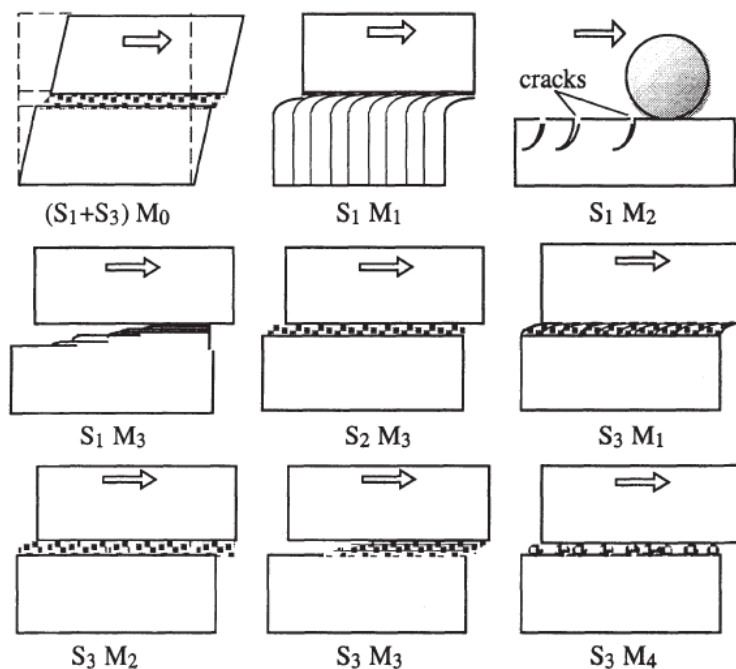


Figure 2.26 Mécanismes d'accommodation couramment observés (d'après Denape et al., 2001)

2.5.1.4. Circuit tribologique

Les mécanismes d'accommodation décrits dans le paragraphe précédent induisent une circulation du troisième corps dans le contact. La notion de circuit tribologique a donc été introduite pour décrire les différents flux de troisième corps activés dans la zone du contact. Cinq flux ont été identifiés et présentés dans la Figure 2.27.

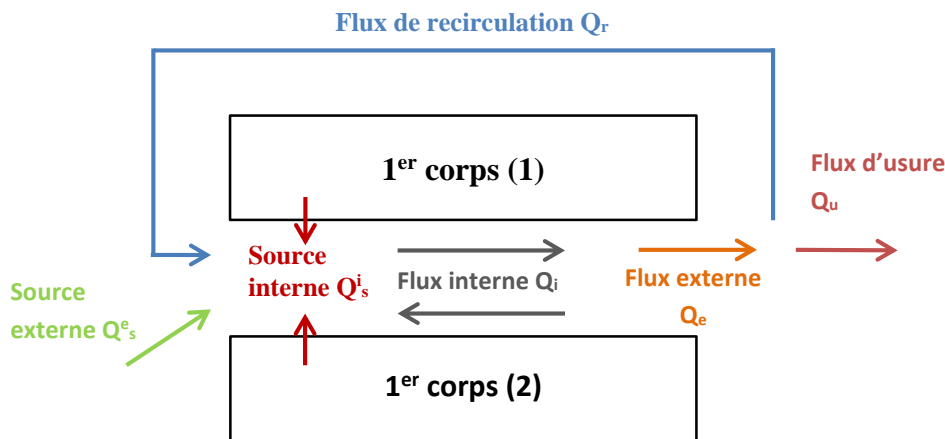


Figure 2.27 Circuit tribologique pour un contact élémentaire bidimensionnel (d'après Descartes and Berthier, 2002)

Le flux de source interne (Q_s^i) correspond au détachement des particules dû à la fissuration, les transformations tribologiques de surface (TTS), etc. Cela engendre la formation d'un troisième corps naturel. Le flux de source externe (Q_s^e) provient de l'introduction d'un troisième corps artificiel entre les deux premiers corps. Le flux interne (Q_i) est le flux de troisième corps circulant entre les deux premiers corps (les particules piégées). Le flux externe (Q_e) est le flux de troisième corps qui s'échappe du contact. Ce flux se divise en deux composantes : le flux de recirculation (Q_r) qui représente le troisième corps éjecté et puis réinjecté dans le contact ; et le flux d'usure (Q_u) qui représente le troisième corps définitivement éjecté du contact.

Le circuit tribologique aide à établir un équilibre des masses entre ce qui rentre et ce qui sort du contact. L'équilibre des masses de ce système nécessite que la quantité des particules dans le contact (M_i) par unité du temps ($\frac{dM_i}{dt}$) soit égale à la différence entre le flux source (Q_s) ($Q_s^i + Q_s^e$) et le flux d'usure (Q_u) (Descartes and Berthier, 2002).

Dans le cas d'un contact fermé (pas d'éjection, $Q_u = 0$), le flux source (Q_s) est inversement proportionnel à la quantité du troisième corps dans le contact (M_i). En effet, quand la quantité du troisième corps augmente, les contraintes dans les premiers corps diminuent. Dans ce cas, la quantité de troisième corps tend vers un maximum (M_i^{max}) où le flux source s'arrête (Denape, 2014). Dans le cas d'un contact ouvert, l'éjection diminue la quantité du troisième corps piégé dans le contact. De ce fait, les contraintes dans les premiers corps et le flux source (Q_s) augmentent jusqu'à atteindre une

stabilisation à une certaine quantité de troisième corps (M_i^{stab}). Cela montre que le flux d'éjection contrôle le flux source. Par ailleurs, une quantité minimum (M_i^{min}) est nécessaire pour activer l'éjection. Quand le flux source est égale au flux usure ($Q_s = Q_u$) et la quantité de troisième corps se stabilise entre les deux extrêmes M_i^{min} et M_i^{max} , le stade de stabilisation est atteint (Denape, 2014).

2.5.2. Lubrification sèche

L'approche du troisième corps permet de connaître la provenance et la structure de la couche de matières qui s'interpose entre les premiers corps, ainsi que les mouvements de matières et leur interaction avec les premiers corps. Dans ce paragraphe, on va s'intéresser à un mode de lubrification semblable à celui induit par des particules : il s'agit de la lubrification sèche.

2.5.2.1. Régimes de lubrification et courbe de Stribeck

La courbe de Stribeck développée dans le cas des lubrifiants liquides permet d'appréhender les différents régimes de lubrification que l'on peut rencontrer dans un contact. Cette courbe présente l'évolution du coefficient de frottement μ en fonction des paramètres comme : la vitesse de glissement (V), la viscosité du lubrifiant (η), la pression de contact (p), l'épaisseur du film lubrifiant (h) (Figure 2.28).

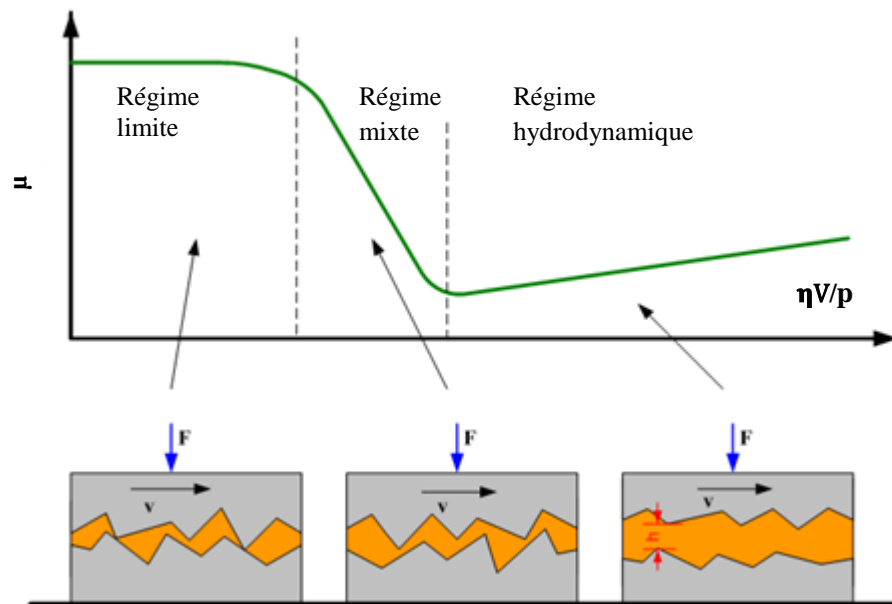


Figure 2.28 Schéma d'une courbe de Stribeck délimitant les différents régimes de lubrification

La courbe de Stribeck peut être divisée en trois zones distinctes correspondant à trois régimes de lubrification :

- le régime limite : dans ce régime, l'épaisseur du film de lubrifiant est réduite à l'échelle des molécules du lubrifiant. La surface de contact entre les premiers corps est comparable à celle obtenue en condition sèche. Cependant, le coefficient de frottement, tout en dépendant de la distribution des aspérités de surface, est différent de celui en condition sèche et dépend de la nature du lubrifiant.
- le régime hydrodynamique : dans ce régime, le lubrifiant sépare complètement les premiers corps.
- Le régime mixte : dans ce régime, le contact est porté par des aspérités de surface et par le lubrifiant, d'où le nom « mixte ».

2.5.2.2. Extension de la courbe de Stribeck au cas des lubrifiants solides

Heshmat (1994) a étudié la lubrification sèche par des particules de disulfure de molybdène (MoS_2). Il a démontré qu'en régime de frottement à sec, ces particules se manifestent comme un film continu avec les caractéristiques de vitesse et de cisaillement d'un film fluide, à condition que les particules soient de tailles très fines (1-10 μm). Heshmat (1994) a proposé une courbe de Stribeck étendue (Figure 2.29) pour un lubrifiant MoS_2 avec deux différences par rapport à une courbe classique : 1) dans le régime « sec » (dry friction), le coefficient de frottement est inférieur à celui qu'on obtiendrait lorsque la composante d'adhésion du frottement est mobilisée ; 2) ajout d'un régime appelé « cisaillement limite » (limiting shear stress) où l'augmentation du coefficient de frottement est liée à une contrainte de cisaillement limite caractéristique du film de lubrifiant qui n'est pas dépassée.

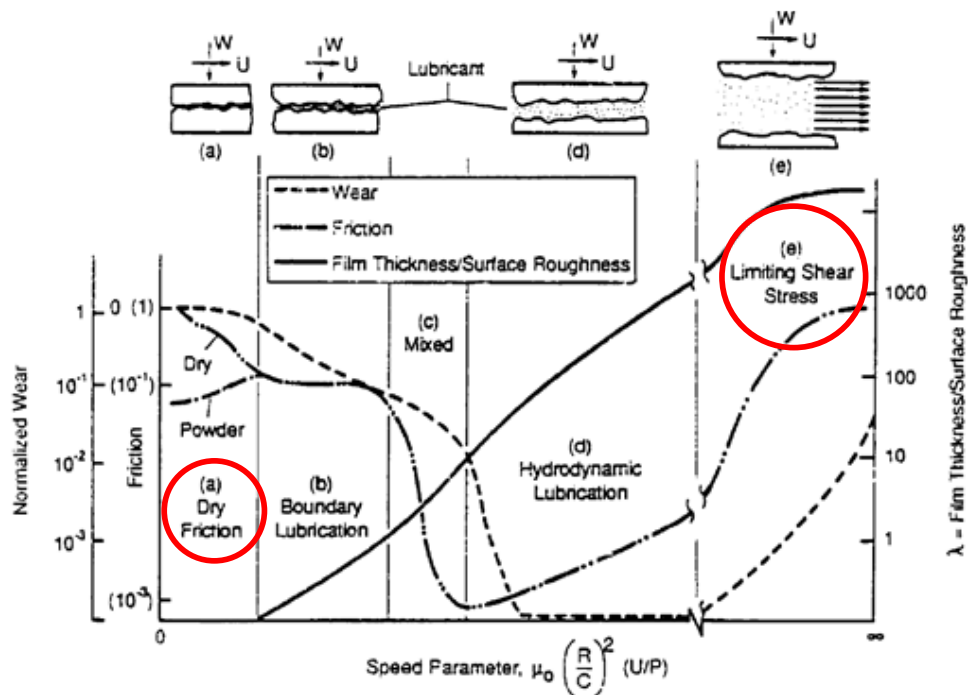


Figure 2.29 Courbe de Stribeck étendue proposée par (Heshmat, 1994)

2.5.2.3. Mécanismes de lubrification

D'après la Figure 2.30, on voit que le frottement et les régimes de lubrification sont liés au rapport entre l'épaisseur du film de lubrifiant solide et la rugosité des surfaces en contact. L'évolution du frottement dépend aussi de la rhéologie du troisième corps. La rhéologie du troisième corps peut être décrite phénoménologiquement à travers les notions de cohésion et de ductilité des particules. La cohésion d'un troisième corps caractérise sa capacité de compactage ; on parlera de troisième corps avec une faible cohésion s'il s'apparente à de la poudre et très cohésif s'il est très compact. En ce qui concerne la notion de ductilité, celle-ci permet de caractériser la facilité avec laquelle le troisième corps s'étale dans le contact.

Singer et Pollock (1991) ont trouvé qu'il existe une épaisseur optimale du film de lubrifiant solide (environ 1µm dans cet exemple) pour laquelle le frottement atteint son minimum (Figure 2.30). Si l'épaisseur du film est inférieure à l'épaisseur optimale, les aspérités de surface rompent le film et le contact direct entre les deux surfaces (en métal dans cet exemple) induit une augmentation du coefficient de frottement. Dans le cas d'un film plus épais, le coefficient de frottement augmente légèrement à cause du labourage du film de poudre.

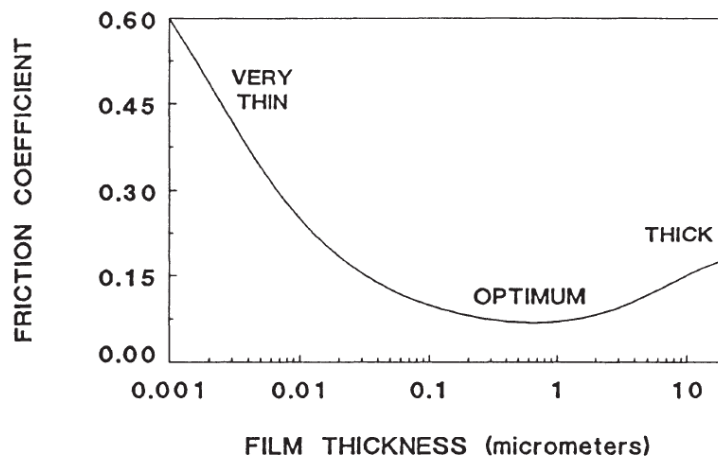


Figure 2.30 L'effet de l'épaisseur du film de lubrifiant solide sur le frottement (Singer and Pollock, 1991)

Ives and Peterson (1985) ont décrit trois manières possibles par lesquelles le glissement est accommodé entre un corps en mouvement et un substrat recouvert par un film de particules (Figure 2.31).

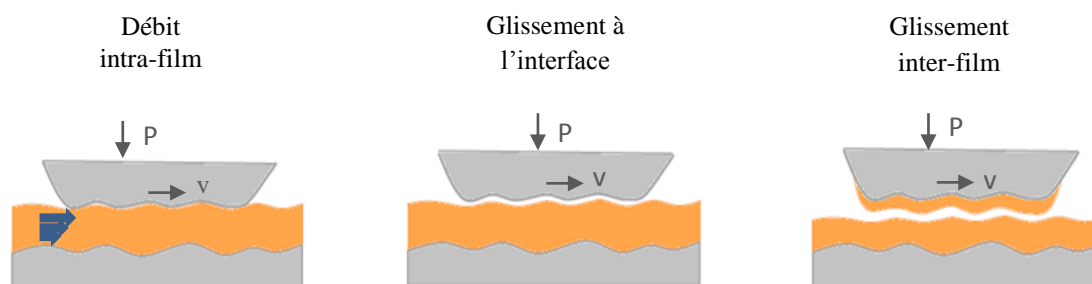


Figure 2.31 Représentation schématique des trois manières auquel le glissement est accommodé entre une contre face et un substrat recouvert par un film de particules (d'après Ives et Peterson)

- Le débit intra-film intervient lorsque le film adhère fortement aux deux surfaces et s'écoule comme un fluide visqueux. Ce type de comportement est généralement associé à la lubrification par des matériaux non cristallins.
- Le glissement à l'interface permet aux deux surfaces originales de glisser l'une sur l'autre. Ce mécanisme se produit lorsqu'il n'y a pas d'adhésion à l'interface.
- Le glissement inter-film se produit lorsque le lubrifiant adhère aux deux surfaces et la force de cisaillement sépare le film de particules en deux films distincts qui glissent l'un sur l'autre.

Loo-Morrey (2006) a également cité trois mécanismes de lubrification qui interviennent en présence d'un contaminant solide dans la zone de contact entre le patin de gomme d'un pendule SRT (2.3.4.1) et la surface testée : le glissement (qui présente le glissement à l'interface), le cisaillement (qui présente glissement inter-film) et le roulement. D'après cet auteur, le mécanisme de roulement intervient dans le cas des particules grossières, quand la rugosité de la surface est plus faible que le diamètre des particules, notamment, quand les contraintes de cisaillement sont plus faibles au niveau de l'interface particule-surface.

D'après Loo-Morrey (2006), lorsque la taille des particules est importante, le mécanisme de roulement sera dominant. Il admet que l'introduction des particules fines à l'interface des surfaces de contact peut diminuer significativement le frottement donc les particules semblent avoir un effet similaire à celui d'un film de fluide sur une surface lisse. Cet auteur a ainsi relevé que les particules de différentes tailles n'ont pas le même comportement. Les particules grossières présentent un comportement distinct par rapport aux particules fines. Les contaminants secs ayant des tailles de particules inférieures ou égales à $50\mu\text{m}$ (comme le talc, la farine, etc.) ont un niveau de cohésion plus important et ils sont donc susceptibles de s'agglomérer et de favoriser le mécanisme de glissement à l'interface de contact (Loo-Morrey, 2006). D'après Mills et al (2009), il existe une taille des particules critique à partir de laquelle les particules se comportent d'une façon plus discrète et elles seront capables de rouler à l'interface de contact indépendamment des autres particules. Le diamètre critique identifié, ou la limite de cohésion, est $\sim 50\text{-}55\ \mu\text{m}$ (Loo-Morrey, 2006; Mills et al., 2009).

2.6.Synthèse

Les particules déposées sur la surface de chaussée se comportent comme un lubrifiant et peuvent faire varier le frottement entre pneu et chaussée. Les travaux sur l'adhérence pneu/chaussée se sont essentiellement intéressés au cas des chaussées contaminées par l'eau, la neige et la glace. Peu ont été consacrés au cas des chaussées contaminées par des particules. Cette thèse vise à combler cette lacune en cherchant à comprendre comment les particules contribuent à dégrader l'adhérence et quels sont les phénomènes physiques qui interviennent à l'interface pneu/chaussée.

L'état de l'art a montré la grande variété de contaminants (autres que l'eau) étudiés dans la littérature et, de ce fait, l'absence de bases solides en termes de protocole d'essais ou de connaissance des facteurs influents et des mécanismes. Il conforte donc le choix de cette thèse d'étudier un seul type de contaminant – les particules – et de focaliser les efforts sur le cas sec. Cet état de l'art a permis également de choisir une approche de recherche différente des études antérieures en exploitant l'approche du troisième corps, pour la compréhension des mécanismes de lubrification induits par les particules, et la théorie de lubrification sèche, pour prédire le frottement entre le pneu et la chaussée.

Chapitre 3

Démarche

Plan du chapitre

3.1	Limites de l'état de l'art	54
3.2	Démarche adoptée	54
3.3	Programme de travail	55

3.1.Limites de l'état de l'art

Les recherches bibliographiques ont montré que l'étude de l'adhérence en présence des particules sur la chaussée reste très marginale comparée aux travaux sur l'influence de l'eau et des contaminants hivernaux comme la neige et le verglas. Les travaux qui ont pu être recensés ont dans un premier temps mis en évidence le lien entre le dépôt des particules, leur mélange avec l'eau de pluie et la dégradation de l'adhérence (Shakely et al., 1980; Hill et Henry, 1981). Ensuite, l'effet de la taille des particules a été étudié sous l'angle de l'abrasion et du polissage des granulats (Wilson, 2006) afin d'expliquer au moins partiellement les variations saisonnières de l'adhérence qui sont observées depuis de nombreuses années par les gestionnaires d'infrastructures.

Ces travaux ont fourni des connaissances qui restent néanmoins partielles de par leur manque de précisions sur le rôle de la texture des revêtements de chaussée et ses interactions avec les caractéristiques des particules (taille, quantité), sur la viscosité du mélange d'eau (de pluie) et de particules, etc. Le phénomène étudié – adhérence des chaussées contaminées – est complexe et les facteurs influents sont nombreux. En termes d'expérimentation, il est nécessaire de réaliser des essais dans des conditions contrôlées en laboratoire en suivant un protocole à définir et permettant d'observer les différents phénomènes physiques se produisant à l'interface. Sur le plan théorique, l'interprétation des données recueillies, à partir des essais à réaliser ou ceux des études antérieures, serait enrichie si l'on disposait d'une meilleure compréhension de ce qui se passe dans l'aire de contact entre le pneu et la chaussée en présence des particules.

3.2.Démarche adoptée

L'approche du troisième corps, par la nature des corps étudiés et la disponibilité des outils développés depuis de nombreuses années, est apparue naturellement comme le point de départ permettant de construire la démarche de la thèse. Basé sur les recommandations de Godet (1984) pour toute étude de troisième corps, les travaux de la thèse ont été développés suivant trois axes complémentaires :

1. Rhéologie du troisième corps : dans cet axe, on cherche à caractériser les particules par des analyses physico-chimiques, granulométriques et mécaniques.
2. Comportement du troisième corps à l'interface avec les premiers corps : le comportement est évalué à différentes échelles : à l'échelle du contact par des mesures de frottement et des visualisations par caméra rapide ; et à l'échelle des particules par des observations au microscope électronique à balayage. Cette démarche a été appliquée intégralement à l'étude du contact sec (particules seules comme troisième corps). Pour des raisons expérimentales, elle s'est limitée à des mesures de frottement pour le contact mouillé (mélange d'eau et de particules comme troisième corps).
3. Prédiction du frottement : une compréhension des flux de particules (axe 2) en fonction de leurs caractéristiques (axe 1) permettant de développer un modèle de frottement dont la

validation est basée sur les mesures réalisées dans l'axe 2. La modélisation est basée sur des théories de lubrification, en particulier celle mobilisant des particules poudreuses.

La démarche ci-dessus est ambitieuse car elle vise à étudier les contaminations sèche et en présence d'eau et à aller jusqu'à une modélisation du frottement. Pour produire un ensemble cohérent de résultats en trois années, il a fallu adopter les hypothèses de travail suivantes :

- Les expérimentations ont été menées essentiellement en laboratoire. Les équipements d'essais (pendule SRT en particulier) et les simulations des processus comme le dépôt des particules ou la pluie comportent donc des limitations (par exemple, l'absence du vent dans le dépôt des particules ou de différentes intensités pluviométriques).
- Sur les particules, seules les interactions mécaniques avec la texture de la surface de chaussée sont étudiées. On exclut donc l'étude des liaisons chimiques et celle des interactions particule/particule.
- Sur les surfaces, l'usage des surfaces « modèles » a été adopté pour étudier séparément l'influence de la microtexture et de la macrotexture.

3.3. Programme de travail

Suivant la démarche présentée dans 3.2, un programme de travail a été mis en place. Il est présenté dans la Figure 3.1.

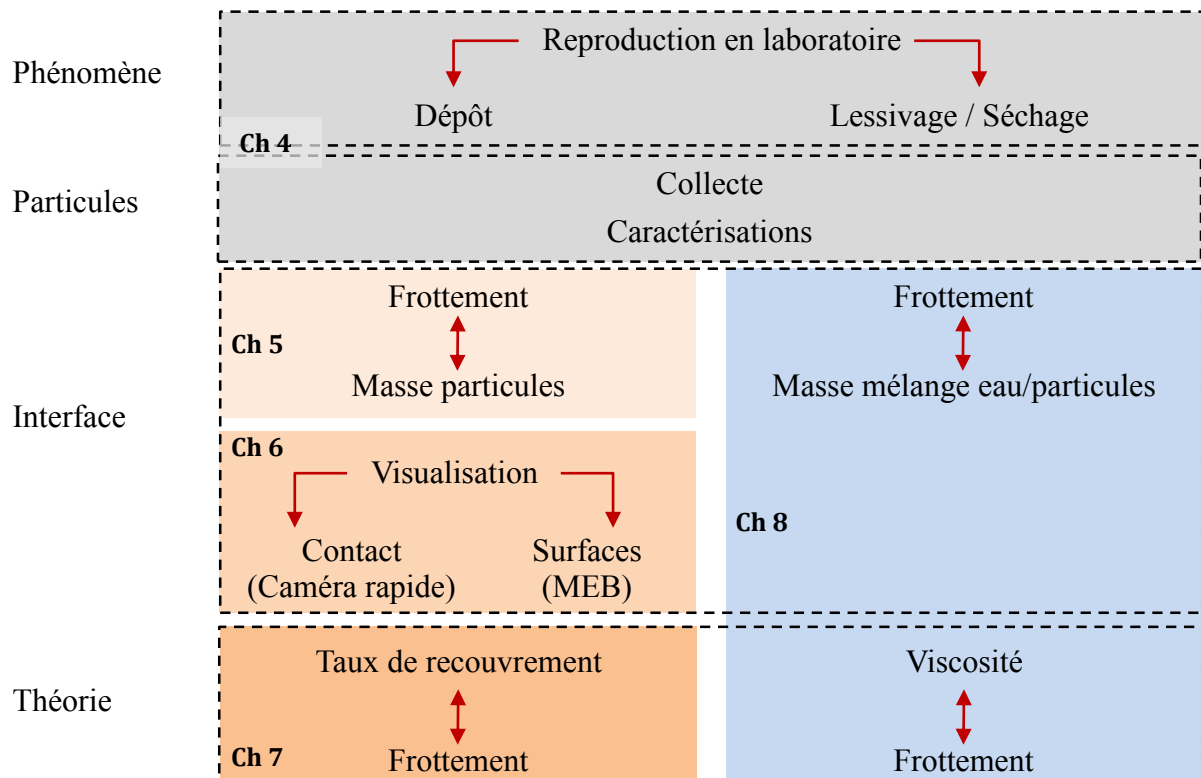


Figure 3.1 Programme de travail

Une première partie de la thèse est consacrée à l'étude du comportement des particules sèches à l'interface pneu/chaussée. Un plan d'expérience est proposé pour évaluer les interactions entre les particules et la texture de la surface (Chapitre 4). Des expérimentations sont menées en laboratoire sur des surfaces à texture contrôlée et des particules naturelles de différentes tailles (allant de quelques micromètres jusqu'à 100 μ m) (Chapitre 5). Ces expérimentations sont réalisées de façon à simuler les phénomènes rencontrés sur une surface de chaussée contaminée : le dépôt des particules, leur compactage par le trafic et le glissement des pneus sur la surface contaminée ; les protocoles sont présentés dans le Chapitre 4. Le comportement des particules à l'interface pneu/chaussée est évalué à différentes échelles : globalement par des mesures de coefficient de frottement au pendule SRT et de masses de particules avant et après une mesure de frottement (Chapitre 5) ; dans l'aire de contact par des analyses de flux de circulation et des visualisations à l'aide d'une caméra rapide (Chapitre 6) ; et au niveau des particules par des observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) des surfaces contaminées (Chapitre 6).

Les analyses des flux de particules analysées permettent poser des hypothèses pertinentes pour modéliser le taux de recouvrement de la texture par les particules. Ceci permettra de développer un modèle capable à prédire le frottement par rapport au taux de recouvrement de la surface par des particules (Chapitre 7).

Une deuxième partie de la thèse est consacrée à l'étude du comportement des particules mouillées à l'interface pneu /chaussée. Les expérimentations permettent, en plus de ce qui est fait dans le cas des particules sèches, de simuler une pluviométrie contrôlée (Chapitre 4). Le comportement du mélange de particules et d'eau à l'interface pneu/chaussée sera évalué par des mesures de frottement au pendule SRT et de masses du mélange avant et après une mesure de frottement (Chapitre 8). Les analyses sont basées sur des approches développées dans le domaine des suspensions colloïdales permettant de caractériser le mélange d'eau et de particules, en particulier la viscosité de l'ensemble. Le traçage du coefficient de frottement en fonction de cette viscosité permet de déterminer différents régimes de lubrification en fonction des caractéristiques des particules dans le mélange et de la texture de la surface (Chapitre 8). Enfin, une première tentative d'estimation empirique du coefficient de frottement est réalisée.

Chapitre 4

Programme expérimental

Plan du chapitre

4.1. Introduction.....	60
4.2. Particules.....	60
4.2.1. Prélèvement.....	60
4.2.2. Caractérisation.....	63
4.3. Surfaces étudiées.....	70
4.3.1. Choix du type de surface.....	70
4.3.2. Fabrication et caractérisation.....	70
4.4. Appareils de mesure.....	73
4.4.1. Mesures de frottement.....	73
4.4.2. Mesures de cartographies de hauteurs.....	74
4.4.3. Caméra rapide.....	75
4.4.4. Microscope Electronique à Balayage.....	76
4.5. Plan d'expérience.....	77
4.6. Protocoles.....	78
4.6.1. Simulation de la phase de dépôt des particules.....	79
4.6.2. Simulation des phases de lessivage et de séchage.....	80
4.6.3. Mesure de frottement.....	82
4.6.4. Observations au MEB.....	85
4.6.5. Observations par la caméra rapide.....	87

4.1.Introduction

Comme les recherches bibliographiques l'ont montré, il existe peu d'études traitant de l'adhérence des chaussées contaminées par des particules. Par conséquent, les données issues d'expérimentation sont elles aussi limitées. Cette thèse s'appuie donc sur un vaste plan d'expérience permettant de collecter les mesures nécessaires à l'étude. L'objectif de ce plan d'expérience est de caractériser puis observer le comportement des particules présentes sur la surface en frottement et leurs interactions avec la texture de la surface. Trois approches expérimentales complémentaires sont développées dans cette thèse :

- La première approche vise à évaluer le frottement à l'interface pneu/chaussée en conditions connues et contrôlées par des essais en laboratoire.
- La deuxième approche vise à comprendre les phénomènes se produisant à l'interface, les mouvements des particules et les interactions entre les particules et le pneu et la chaussée par des visualisations à la caméra rapide en laboratoire.
- La troisième approche vise à comprendre les phénomènes de recouvrement de la surface d'essai par des particules par des observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB).

La première partie de ce chapitre est dédiée à la description et à la caractérisation des matériaux utilisés lors des investigations expérimentales, en termes de particules et de surfaces d'essais. Les appareils utilisés sont décrits dans une deuxième partie. La troisième partie consiste alors à détailler les trois protocoles expérimentaux développés correspondant aux trois approches.

4.2. Particules

4.2.1. Prélèvement

Le site de prélèvement choisi dans le cadre de cette thèse est le pont de Cheviré localisé au Sud-Ouest de Nantes à proximité d'une zone industrielle (Figure 4.1 Site d'étude). La longueur du pont est de 1562 m. Il est constitué de deux chaussées à trois voies avec un séparateur central en béton. Le trafic est de 92 000 véhicules/ jour avec 8,5% de poids-lourds (AURAN, 2014). Le choix de ce site est justifié par le fait qu'il a fait l'objet de plusieurs campagnes de suivi et d'analyse depuis les années 90 (Durand, 2003b; Durin, 2006; El-Mufleh, 2011; Legret and Pagotto, 1999; Ruban et al., 2003).

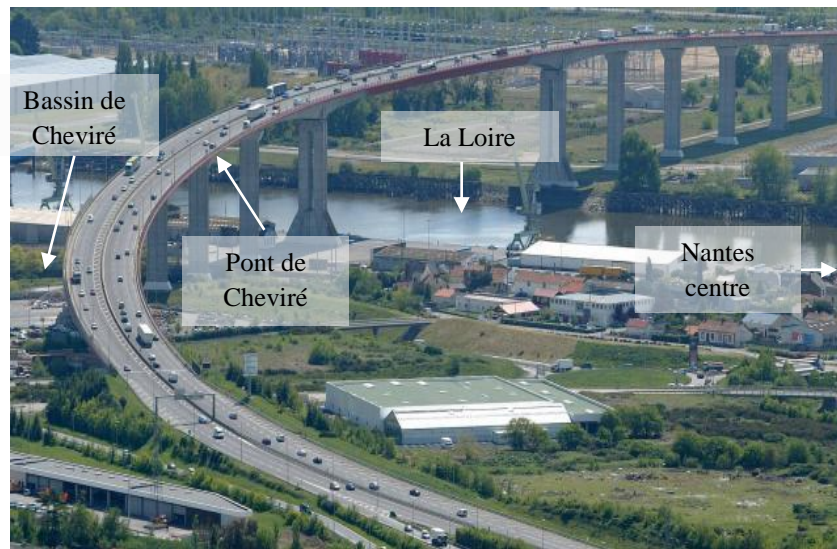


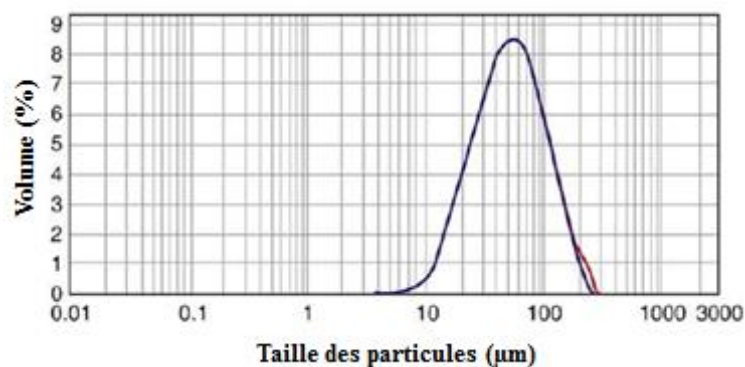
Figure 4.1 Site d'étude

Les particules sont prélevées dans le bassin de décantation recueillant les eaux de ruissellement issues du pont. Le prélèvement de particules directement sur la surface de la chaussée s'est avéré trop complexe pour deux raisons :

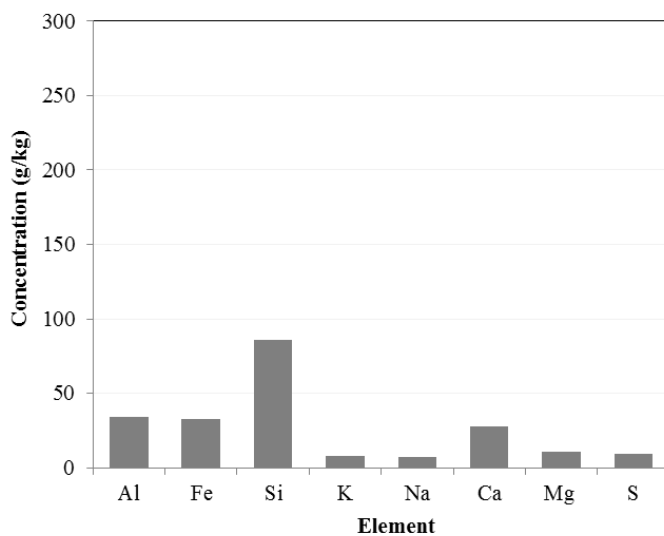
- Le trafic sur le pont est élevé et il aurait été nécessaire de couper la route pendant plusieurs heures pour réaliser les prélèvements.
- La méthode de prélèvement par aspiration, utilisée dans la littérature pour quantifier la concentration des particules sur une route (Egodawatta, 2007; Wilson, 2013) ne permet pas de récupérer une quantité suffisante de particules pour les analyses en laboratoire (centaines de grammes).

Les résultats issus des sources bibliographiques montrent que les particules présentes dans les sédiments de l'assainissement pluvial sont liées en grande partie à la pollution d'origine routière (Chebbo, 1992; Durand, 2003b; Legret and Pagotto, 1999; Pagotto, 1999; Ruban et al., 2003). Ces sédiments sont transportés par les eaux de ruissellement dans des gouttières et dirigés par la suite dans les bassins de décantation. L'extraction des particules à partir des sédiments des bassins de retentions des eaux pluviales constitue donc une solution viable pour obtenir des particules en quantité suffisante et possédant des caractéristiques proches de celles prélevées directement sur la route.

Une comparaison pourrait être faite avec des données extraites de la littérature. A titre d'exemple, Kreider et al (2010) ont caractérisé des particules collectées par aspiration de la surface de la route. La méthode de collecte utilisée permet de retenir les particules déposés sur la surface ayant une taille comprise 0,3 à 100µm. La composition chimique et la distribution de la taille de ces particules sont mesurées. Les principaux éléments chimiques détectés et la distribution de taille sont présentés dans la figure 4.2.



a)



b)

Figure 4.2 Distribution de taille (a) et concentration en éléments majeurs (b) des particules collectées de la surface de la route (Kreider et al., 2010)

Durand (2003) a analysé les sédiments prélevés dans le bassin de Chevire. Cet auteur trouve que 80% de particules ont une taille inférieure à 100µm, avec un D50 inférieur à 38µm. Les principaux éléments chimiques détectés et la distribution de tailles des particules sont présentés dans la . Les particules prélevées dans le bassin de Chevire sont constituées d'une concentration plus importante de quartz que les particules prélevées sur la route par Kreider et al (2010). Néanmoins, les mêmes éléments chimiques sont détectés (Figures 4.2b et 4.3).

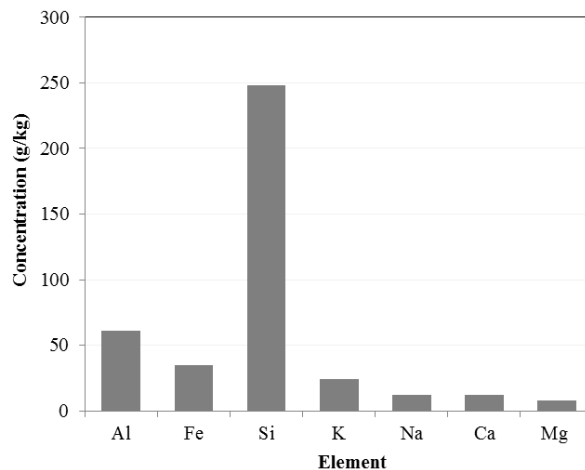


Figure 4.3 Concentration en éléments majeurs des particules prélevées de bassin de Cheviré (Durand, 2003)

Afin d'avoir les particules les plus représentatives de celles qui se trouvent sur la route, les prélèvements sont réalisés au niveau des buses d'arrivée des eaux de ruissellement au bassin (Figure 4.4). Les sédiments ont été ensuite mélangés pour avoir une composition homogène puis mis à l'étuve en laboratoire à une température de 40°C pendant 4 jours.

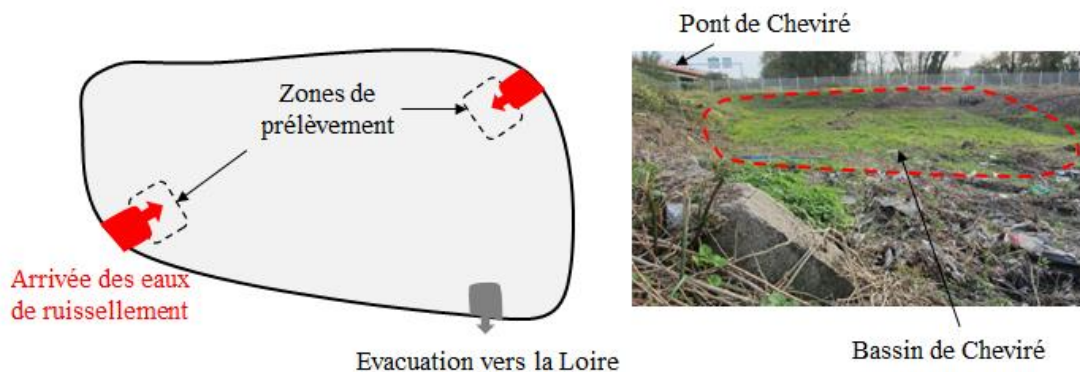


Figure 4.4 Bassins de prélèvement près du pont de Cheviré

4.2.2. Caractérisation

Les particules fines dont la taille est inférieure à 100µm sont sélectionnées pour cette étude. Ce choix est justifié par le fait que les fractions grossières sont rapidement évacuées de la surface de la route (par le vent par exemple) ou écrasées par le trafic pour devenir plus fines (Kayhanian et al., 2007; Roger et al., 1998). Les particules fines sont plus susceptibles de rester à la surface (par un effet de piégeage comme nous verrons plus loin) et peuvent ainsi avoir un effet sur l'adhérence.

Les sédiments prélevés sont tamisés afin d'avoir des fines de taille inférieure à 100µm. L'opération de tamisage est réalisée selon la norme (NF EN 933-1, 2012) (tamisage par voie sèche). Afin de ne pas modifier la nature des particules, l'étape de lavage proposée par la norme n'a pas été appliquée. Cinq fractions de tailles sont testées pour chaque type de particules : 0-

40 μm , 40-50 μm , 50-80 μm , 80-100 μm et la fraction complète 0-100 μm . Le tamisage est effectué par vibration d'une colonne constituée par l'emboîtement de plusieurs tamis (correspondant aux fractions de taille souhaités), en les classant de haut en bas dans l'ordre de mailles décroissantes.

Le choix de la séparation des particules en plusieurs classes de taille est basé sur des études antérieures (Mills et al., 2009) qui indiquent que les mécanismes de lubrification (glissement, roulement, cisaillement) induits par une couche de particules dépendent principalement de l'épaisseur de cette couche et de la taille des particules. Ces mêmes auteurs indiquent une taille critique, qui est d'environ 50-60 μm , en dessous de laquelle le mécanisme de glissement prédomine. Au-dessus de cette taille, c'est le mécanisme de roulement qui prédomine. En prenant 50 μm comme valeur limite, les fractions 0-40 μm et 40-50 μm correspondent donc aux particules « fines » et les fractions 50-80 μm et 80-100 μm aux particules « grossières ».

4.2.2.1. *Distribution de la taille*

La mesure de la distribution de la taille des particules est réalisée par granulométrie à diffraction laser, à l'aide de l'appareil Malvern® Mastersizer 2000 permettant la mesure des particules de taille comprise entre 0,02 et 2000 μm . L'analyse par diffraction laser donne un diamètre équivalent pour chaque particule représentant le diamètre de la sphère équivalente ayant le même volume que la particule. Cette méthode d'analyse donne une distribution de taille des particules pondérée en volume. L'annexe A fournit des précisions sur la mesure et l'analyse par diffraction laser.

La Figure 4.5 montre la proportion de chaque classe de taille des particules (avant fractionnement) dans la fraction complète (0-100 μm) des particules de Cheviré. On observe que la fraction de tailles fines (0-40 μm) est majoritaire avec 58% en volume.

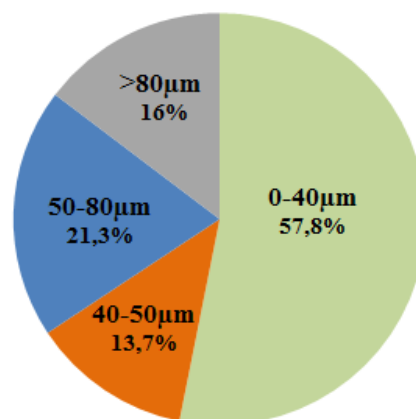


Figure 4.5 Répartition (%) des classes de taille des particules dans la fraction 0-100 μm

Les répartitions granulométriques pour chaque fraction de taille sont présentées en échelle logarithmique dans la Figure 4.6. Les distributions correspondant à chaque fraction de taille suivent un monomode où la partie centrale de chaque distribution présente la taille de particules

majoritaire de chaque fraction de taille. Les résultats trouvés montrent que les tailles des particules respectent les classes de taille souhaitées.

Les particules des fractions 50-80 μm et 80-100 μm ont une distribution de taille proche. En effet la forme des particules n'est pas toujours sphérique. Une forme allongée de ces dernières incite à considérer les résultats de tamisage et d'analyse obtenus avec beaucoup de précaution. En tamisage, les particules ayant une forme allongée peuvent passer au travers des mailles de taille correspondant au diamètre le plus petit ou le plus grand.

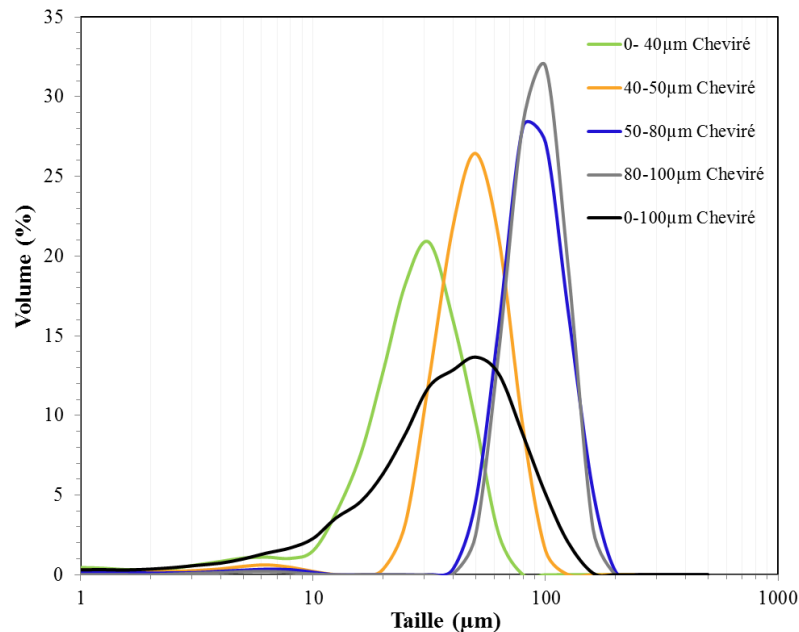


Figure 4.6 Distribution de tailles (pondérée en volume) des particules de Cheviré après tamisage

A partir de la distribution de taille, plusieurs paramètres statistiques peuvent être extraits tels que :

- La médiane ou la taille D_{50} , pour laquelle la fonction cumulative est égale à 50%.
- Les valeurs de taille D_{10} et D_{90} pour lesquelles la fonction cumulative est égale 10% et 90 % respectivement.
- Le diamètre moyen en surface ($D_{3,2}$).
- Le diamètre moyen en volume ($D_{4,3}$).

Ces paramètres sont présentés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Paramètres de taille des particules de Cheviré

	<i>D50</i>	<i>D10</i>	<i>D90</i>	<i>D3,2</i>	<i>D4,3</i>
0-40µm	32,7	14,0	51,7	17	32
40-50µm	53,7	33,5	81	29	54,8
50-80µm	79,4	53,3	115	48,2	81,4
80-100µm	103	73,0	141	87,2	105
0-100µm	43,8	12,7	92,3	20,5	48,8

4.2.2.2. *Masse volumique*

La masse volumique des particules de Cheviré est déterminée suivant la méthode du pycnomètre à bouchon capillaire, conformément à la norme NF EN 1097-7. La méthode consiste à mesurer la masse volumique absolue des particules par pesés dans l'eau déminéralisée à une température de 25°C avec un volume constant. Cet essai est réalisé sur toutes les fractions de taille des particules de Cheviré sauf la fraction 0-100µm pour un manque de quantité de cette fraction. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Masse volumique absolue des particules de Cheviré

	<i>0-40µm</i>	<i>40-50µm</i>	<i>50-80µm</i>	<i>80-100µm</i>
Masse volumique absolue (t/m ³)	2,53	2,55	2,67	2,57

4.2.2.3. *Composition chimique*

Des analyses chimiques sont réalisées sur toutes les fractions de taille. La détermination des éléments est réalisée par spectrométrie d'émission optique couplée à une torche à plasma (ICP-OES) selon la norme (NF EN ISO 11885, 2009). L'échantillon est calciné à 450 °C pendant 3 heures puis minéralisé par une attaque totale à l'acide fluorhydrique (HF) et l'acide hydrochlorique (HClO₄) à une température de 160°C. Pour la détection du silicium, l'attaque totale est remplacée par une fusion alcaline au tétraborate de lithium. Les éléments majeurs (Al, Fe, Mn, Si, Ca, K, Mg, Na, P) et traces (Pb, Cu, Cd, Zn, Ni, Cr) sont par la suite dosés par la méthode de ICP-OES. Les résultats de ces analyses sont présentés dans la Figure 4.7. Seuls, les éléments ayant une concentration importante sont présentés.

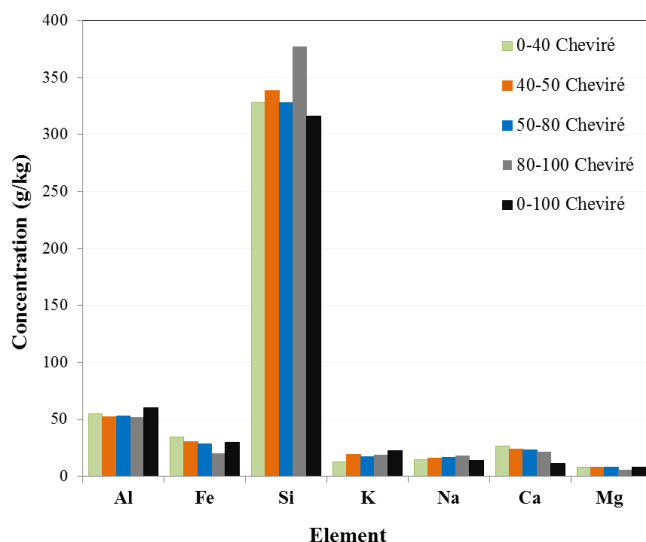


Figure 4.7 Composition chimique des particules de Cheviré

Les analyses chimiques montrent que la composition chimique des particules est similaire pour toutes les fractions de taille. Les particules sont composées essentiellement de la silice (Si) qui est un élément minéral dur. La présence de cet élément pourrait être attribuée au trafic qui entraîne un dépôt important des débris des pneus et de la chaussée. La présence de manganèse (Mg), de sodium (Na), et de potassium (K) peut être expliquée par la présence des sites industriels situés à proximité du pont (Figure 4.1). La présence de quelques éléments métalliques comme l'aluminium (Al) et le fer (Fe) peut être attribuée à l'usure des disques de frein et des pneumatiques ainsi qu'à l'oxydation des carrosseries des voitures.

4.2.2.4. Composition minéralogique

Les analyses chimiques donnent seulement les éléments chimiques présents dans les particules. Pour identifier les caractéristiques mécaniques de ces particules, comme la dureté, il est important d'identifier la minéralogie de ces particules.

Des analyses minéralogiques sont réalisées par diffraction des rayons X (DRX) à l'aide d'un diffractomètre de poudre Bruker® "D8 Advance" ayant une géométrie Bragg-Brentano ($\theta/2\theta$). La fraction minérale est constituée de minéraux cristallisés et amorphes. L'analyse en diffraction des rayons X permet l'identification des minéraux cristallisés. L'identification de ces phases a été réalisée en utilisant le logiciel de traitement de données EVA et les fichiers de diffraction des poudres (PDF) issus des bases de données incluses dans ce logiciel. Un exemple de diffractogramme avec les phases identifiées est présenté dans la Figure 4.8. Une estimation semi-quantitative des phases cristallines présentes dans les particules, basée sur la hauteur relative des pics, est présentée dans le Tableau 4.3.

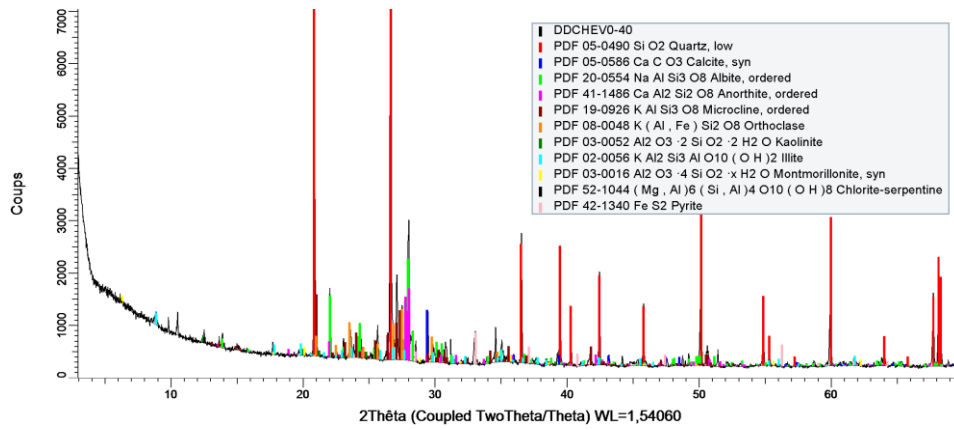


Figure 4.8 Diffractogramme avec les phases identifiées (Cheviré 0-40µm)

La répartition des groupes principaux de minéraux constituant chaque fraction de taille des particules de Cheviré est présentée dans la Figure 4.9.

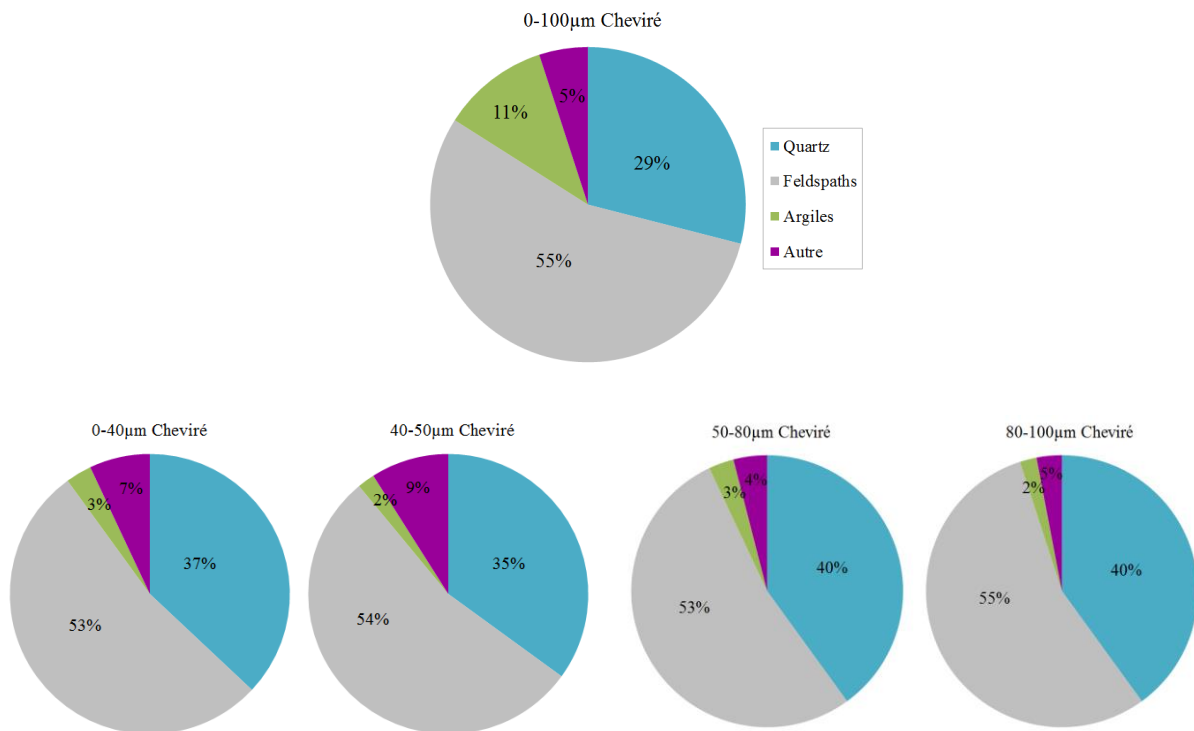


Figure 4.9 Quantité (%) des minéraux dans les particules de Cheviré (toutes les fractions de taille)

Les principaux minéraux constitutifs des particules de Cheviré sont le quartz, l'albite (feldspath sodique) et l'anorthite (feldspath calcique). On trouve également des traces d'orthoclase et de microcline (feldspaths potassiques), des minéraux argileux (l'illite, la kaolinite et la montmorillonite), du chlorite, de la calcite et de la pyrite (disulfure de fer). La fraction complète (0-100µm) est constituée d'environ 30% de quartz, 55% de feldspath et d'environ 12% de minéraux argileux. Sur toutes les fractions de taille, la proportion des feldspaths est la même (53%-

56%). Cependant, la proportion de chaque type de feldspath varie d'une fraction à l'autre. La proportion de quartz et d'argile sur les fractions de taille est plus faible que sur la fraction complète ($\approx 38\%$ de quartz et moins de 3% d'argile). Sur la fraction 0-40 μm , on trouve une quantité plus importante de calcite (3,5%) et de pyrite (3%). On constate qu'une quantité d'argile présente dans la fraction complète des particules a disparue après le fractionnement par tamisage. La seule explication trouvée est que ces particules argileuses ont probablement adhéré sur les tamis utilisés.

Tableau 4.3 Evaluation semi quantitative par diffraction rayon X de la quantité (%) des minéraux cristallisés dans les particules

	<i>Chevire</i> 0-40 μm	<i>Chevire</i> 40-50 μm	<i>Chevire</i> 50-80 μm	<i>Chevire</i> 80-100 μm	<i>Chevire</i> 0-100 μm
Quartz (SiO ₂)	37	35	40	40	29
Albite (NaAlSi ₃ O ₈)	14	27	27	8	16
Anorthite (CaAl ₂ Si ₂ O ₂)	24	18	24	39	25
Orthoclase (KAlSi ₃ O ₈)	7	4	3	3	8
Illite (KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂)	2	1	2	<1	7
Microcline (KAlSi ₃ O ₈)	8	5	2	5	6
Chlorite (Mg, Al) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	<1	<1	<1	<1	2.5
Kaolinite (Al ₂ O ₃ 2SiO ₂ 2H ₂ O)	1	<1	<1	<1	4
Montmorillonite (Al ₂ O ₃ 4SiO ₂ 2H ₂ O)	1	1	1	<1	<1
Calcite (CaCO ₃)	3.5	1	1	1	<1
Pyrite (FeS ₂)	3	7	<1	<1	<1

Les analyses physico-chimiques ont montré que les particules sont relativement fines, avec plus de 71% des particules inférieures à 50 μm . La composition chimique est toutefois similaire pour toutes les fractions de tailles. Ces particules sont essentiellement constituées de Si, et peu d'Al, Fe, K, Na et de Ca. Les analyses minéralogiques ont montré que les particules de Cheviré sont constituées principalement de feldspaths, considéré comme un minéral dur. D'après l'échelle de Mohr (échelle de dureté spécifique pour les minéraux avec une classification de 1 à 10), la dureté du feldspath est comprise entre 6 et 6,5. La quantité des minéraux argileux est considérablement plus importante dans le cas de la fraction 0-100 μm . Ces minéraux, considérés comme des particules très tendres avec une dureté de 2 sur l'échelle de Mohr, sont plus susceptibles de se cisailer sous un effort mécanique. Même si leurs quantité est faible dans les autres fractions de taille, elle est suffisante pour influencer le comportement global des particules en contact.

4.3. Surfaces étudiées

4.3.1. Choix du type de surface

L'un des principaux objectifs de la thèse est de comprendre le mouvement des particules à l'interface pneu/chaussée. A l'échelle du contact entre un pavé de gomme (représentatif d'un élément de la bande de roulement du pneu) et les aspérités de la chaussée, ce mouvement dépend de la texture de la surface de chaussée qui, selon Fillot et al (2007) et Mills et al (2009), peut stocker ou piéger les particules et donc influe sur leurs flux. Pour bien comprendre l'influence de la texture, il était donc nécessaire de disposer des surfaces qui disposent d'une part uniquement de la microtexture et, d'autre part, de la micro- et de la macrotexture. Cette progression en termes d'échelles de texture permet de bien saisir le rôle de chaque échelle. Elle impose en retour, pour assurer une transposition des connaissances du premier type de surface au second, d'avoir la même microtexture sur les deux types de surfaces étudiées.

Pour satisfaire les deux conditions requises (progression en termes d'échelles, même microtexture), la seule possibilité est d'utiliser des surfaces « modèles » sur lesquelles on applique des traitements pour reproduire la micro- et la macrotexture. Les traitements envisagés sont un grenailage pour reproduire de la microtexture et un striage pour reproduire de la macrotexture. Le choix initial des plaques lisses de granite (pour avoir un matériau proche de celui utilisé pour les matériaux de chaussée) s'est avéré infructueux à cause de la dureté de la roche qui ne permettait pas de produire un striage reproductible. Le matériau choisi est finalement l'aluminium qui se prête bien aux opérations d'usinage.

Le choix de l'aluminium est discutable car on peut se poser des questions sur la représentativité des liens physico-chimiques qui peuvent être créés entre la surface de chaussée et les particules. Cependant, comme indiqué dans les hypothèses de travail (Chapitre 3), seules les interactions mécaniques sont considérées dans cette thèse. Une surface disposant d'une texture proche de celle d'une chaussée routière peut donc être considérée comme acceptable pour les besoins de la thèse.

4.3.2. Fabrication et caractérisation

Les échantillons sont des plaques rectangulaires de taille 80mm × 130mm (Figure 4.10). Ces dimensions couvrent la surface nécessaire pour mesurer le frottement avec le pendule SRT (76mm × 126mm) tout en laissant peu d'espace pour l'accumulation de particules autour de la zone de frottement. Cette disposition permet, par pesées, d'estimer les flux de particules (partie).

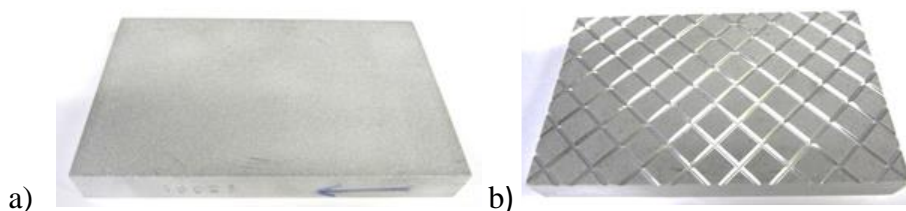


Figure 4.10 Echantillons (a : grenailé appelé « Sablé » ; b : grenailé et strié appelé « Sablé Strié »)

Les plaques à texture contrôlée sont fabriquées à partir d'aluminium. Le choix de ce matériau est basé sur sa légèreté par rapport à d'autres matériaux (comme les enrobés), ce qui nous permet de faire des mesures de masse plus précises (au milligramme près) durant les essais. Après usinage, les plaques en aluminium sont grenailées en surface pour créer une microtexture similaire à celle des granulats utilisés dans des revêtements routiers ; l'échantillon est appelé « Sablé ». Le grenailage est réalisé par la projection de corindons de taille comprise entre 0,5 et 1 mm à l'aide d'une grenailleuse automatique. Afin d'apporter de la macrotexture sur la deuxième plaque, appelée « Sablé Strié », des stries ont été réalisées par fraisage. Ces stries se présentent sous la forme de grilles de carreaux de 10 mm de côté et de 1 mm de profondeur (Figure 4.11). Elles simulent la macrotexture d'une surface composée de gravillons de 10mm en taille. L'usinage de cet échantillon a été fait soigneusement afin d'éviter la présence de bordure pouvant entraver le déplacement des particules et affecter le coefficient de frottement.

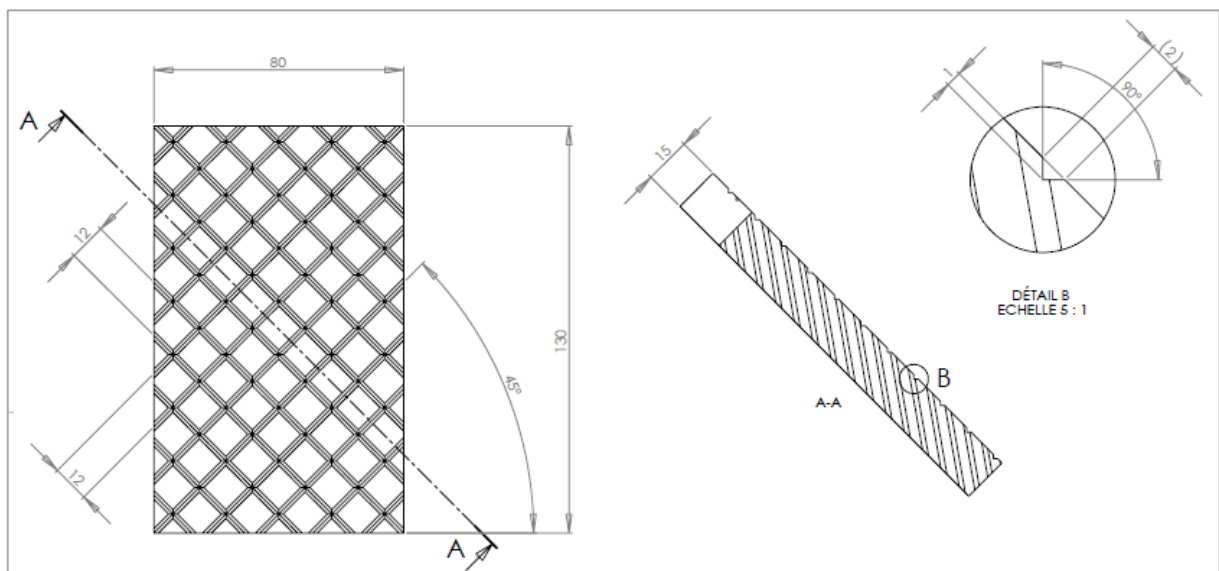


Figure 4.11 Désignations de la plaque d'aluminium Sablé Strié

Pour caractériser la microtexture, les surfaces d'essai sont cartographiées à l'aide d'un capteur optique à haute résolution (4.4.2). Trois zones de mesures de 5mm × 7mm (Figure 4.12, zones en bleu) sont réalisées sur la surface de chaque plaque avec un grossissement ×20 (caractéristiques indiquées dans Figure 4.14c).

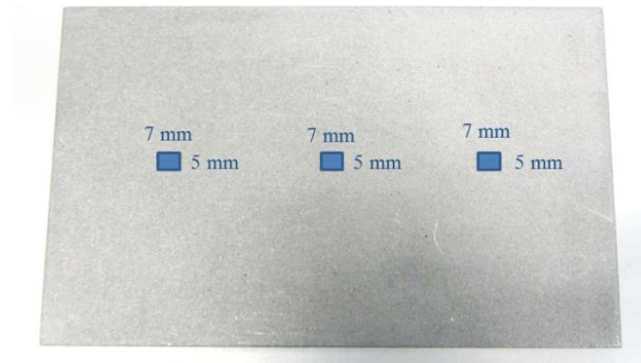


Figure 4.12 Zones de mesures de cartographies sur toutes les surfaces d'essai

L'analyse des cartographies de hauteurs est réalisée avec le logiciel MountainsMap®. Un prétraitement consiste à remplacer les valeurs aberrantes par interpolation entre les valeurs valides voisines et à redresser la surface par la méthode des moindres carrés. Pour chacune des surfaces, il a été question d'identifier des paramètres permettant de caractériser le phénomène de remplissage/piégeage de la texture par les particules. Le paramètre d'amplitude S_q (μm) qui présente la rugosité moyenne quadratique de la surface est ainsi utilisé. Les paramètres fonctionnels de volume sont généralement utilisés dans l'industrie mécanique pour caractériser la lubrification entre deux corps en contact. Ces paramètres sont calculés sur la courbe d'Abbott (à partir de deux seuils de taux de portance fixés à 10 et 80 %). On définit ainsi deux paramètres de volume de matière (V_{mp} et V_{mc} , pour les pics et le cœur) et deux paramètres de volume de vides (V_{vc} et V_{vv}).

Les paramètres normalisés (ISO 25178, 2016) pour chaque surface d'essai (moyenne de trois valeurs trouvées sur les trois zones de mesures) sont présentés dans le Tableau 4.4. On voit que la microtexture de la plaque Sablé est semblable à celle d'un granulat poli (roche calcaire).

Tableau 4.4 Paramètres de rugosité caractérisant la microtexture de la surface de l'échantillon d'aluminium

Paramètres	Sablé	Granulat poli	
$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^2(x_i, y_j)}$	S _q (μm)	13,9	16,8
V _{mp} : Volume de matière des pics V _{mc} : Volume de matière du cœur V _{vc} : Volume de vide du cœur V _{vv} : Volume de vide des vallées	V _{mp} (ml/m ²)	0,604	0,702
<p>Le graphique illustre la répartition des volumes de matière et de vide en fonction de la hauteur z (en μm) et de la largeur (en %). Les courbes de rugosité sont tracées en rouge. Les volumes sont délimités par des lignes horizontales et verticales :</p> <ul style="list-style-type: none"> V_{mp} (orange) : volume de matière des pics, situé au-dessus de la ligne mr1. V_{mc} (orange) : volume de matière du cœur, situé entre mr1 et mr2. V_{vc} (bleu clair) : volume de vide du cœur, situé entre mr1 et mr2. V_{vv} (bleu foncé) : volume de vide des vallées, situé en dessous de la ligne mr2. 	V _{mc} (ml/m ²)	12,3	12,8
	V _{vc} (ml/m ²)	15,7	17,9
	V _{vv} (ml/m ²)	1,82	2,38

4.4. Appareils de mesure

4.4.1. Mesures de frottement

Les mesures de l'adhérence sont réalisées avec le Pendule SRT (Figure 4.13) à température ambiante. Cet appareil permet de réaliser une mesure ponctuelle du frottement d'un patin de caoutchouc sur une surface. Ce dispositif, qui peut être utilisé en laboratoire sur des échantillons ou in situ sur une chaussée, est une référence dans le domaine routier. La mesure est normalisée par une norme européenne (NF EN 13036-4, 2012). Le pendule SRT porte, à l'extrémité de son bras articulé, un patin de caoutchouc frottant pendant l'essai sur la surface à mesurer avec une vitesse de glissement de l'ordre de 3 m/s. Au cours de cette phase de frottement, un ressort applique sur le patin frottant sur cette surface, une pression déterminée (0,2 MPa). Un dispositif de réglage permet de maintenir la longueur de frottement dans les limites déterminées (126 ± 1 mm). La hauteur maximale de remontée de pendule est repérée par une aiguille placée devant un cadran gradué directement en valeurs de « coefficient de frottement mesuré par le pendule ».

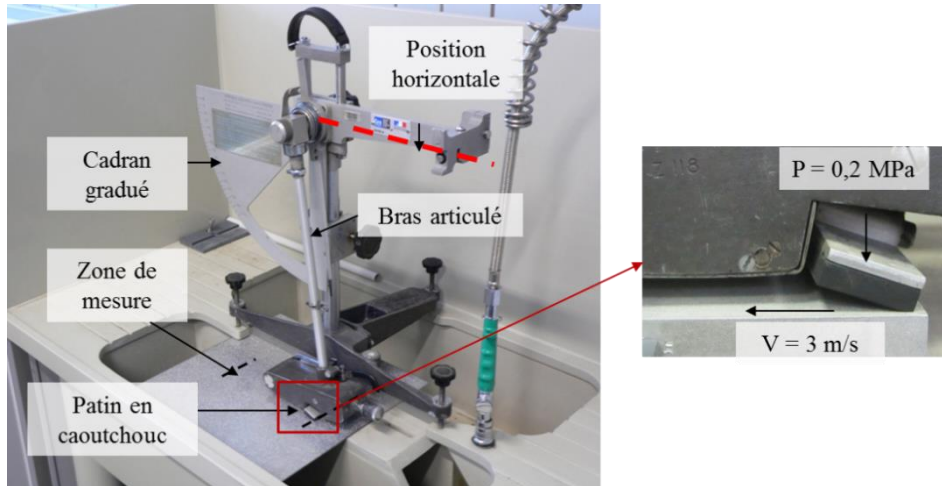
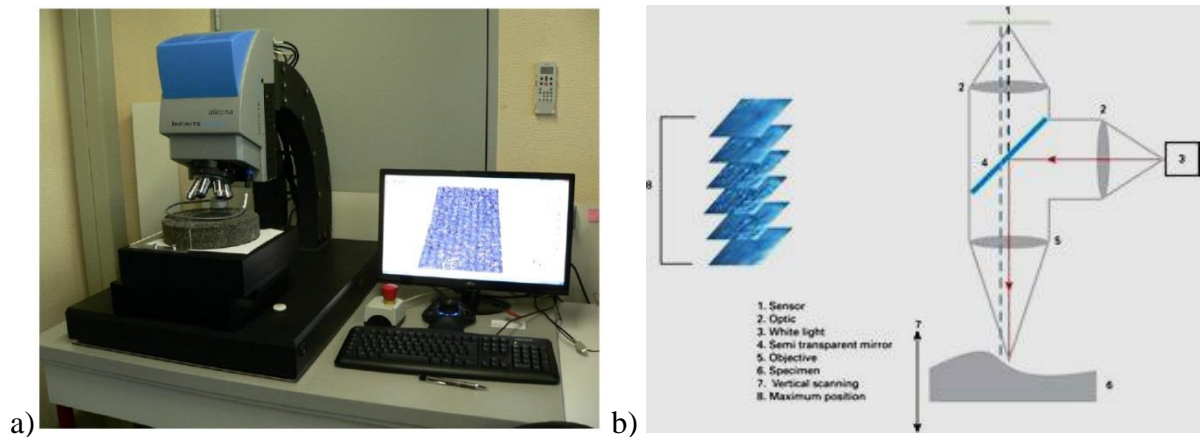


Figure 4.13 Pendule SRT et échantillon mis en place

La reproductibilité de mesure du pendule SRT annoncée dans la norme correspond à des essais en conditions humides. L'écart-type varie entre 0,014 et 0,039 en fonction de la nature et des caractéristiques du revêtement du matériau, avec un écart-type moyen de 0,026.

4.4.2. Mesures de cartographies de hauteurs

L'appareil utilisé pour les mesures de cartographies est le capteur optique à haute résolution Infinite Focus ALICONA (Figure 4.14a). C'est une unité de mesure optique tridimensionnelle de forme et de rugosité de surface à haute résolution verticale. Cette machine utilise le principe de la variation focale (Figure 4.14b), où un 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 change progressivement lors d'un mouvement de ce dernier, la variation de contraste point par point est calculée afin de déduire la position de chaque point.



		2.5x	5x	10x	20x
Min. measurable height	μm	2.3	0.41	0.1	0.05
Max. measurable height (approx.)	mm	8	22.5	16.5	18
Height step accuracy (1mm height step)	%	-	0.05	0.05	0.05
Max. measurable area	mm^2	10000	10000	10000	10000
Max. measurable profile length	mm	100	100	100	100
Min. repeatability	μm	0.8	0.12	0.03	0.01
Min. measurable roughness (Ra)	μm	7	1.2	0.3	0.15
Min. measurable roughness (Sa)	μm	3.5	0.6	0.15	0.075
Min. measurable radius	μm	20	10	8	5
Min. measurable vertical angle	$^\circ$	20	20	20	20
Max. measurable slope angle	$^\circ$	up to 87			

Figure 4.14 a) Capteur optique à haute résolution Infinite Focus b) principe de la variation focale c) caractéristiques en fonction du grossissement

4.4.3. Caméra rapide

La caméra rapide utilisée pour les prises de vidéos et d'images est la MotionBLITZ® Cube4 (Mikrotron) (Figure 4.15) avec une fréquence d'acquisition maximale de 93,000 images par seconde et une résolution de 1280×258 pixels. La taille d'un pixel est annoncée à $12 \times 12 \mu\text{m}$ pour un facteur de grossissement de 1:1. Cette caméra est associée à un objectif Sigma 105mm 1:2,8 DG MACRO à focale fixe.



Figure 4.15 Caméra MotionBLITZ® Cube4 et objectif Sigma

4.4.4. Microscope Electronique à Balayage

Le microscope utilisé pour cette étude est de type Hitachi SU5000 (Figure 4.16). Ce microscope utilise un faisceau de particules d'électrons pour illuminer un échantillon et en créer une image très agrandie (un grossissement maximal de 600000 fois en image). C'est un microscope à émission de champ (FEG) à cathode chaude avec deux conditions de fonctionnement (mode haut vide HV et mode bas vide LV) et trois détecteurs utilisés dans notre étude :

- Détecteur d'électrons secondaires (SE) : ce détecteur est essentiellement employé pour former des images permettant de visualiser la topographie de l'échantillon.
- Détecteur d'électrons rétrodiffusés (BSE) : Ce détecteur est généralement placé à la verticale de l'échantillon dans l'axe du faisceau, cela permet de récolter le maximum d'électrons rétrodiffusés et dans ce cas la vision du relief ne sera pas très bonne. Cependant, les éléments chimiques possédant un numéro atomique élevé (éléments lourds) produisent d'avantage d'électrons rétrodiffusés que ceux ayant un numéro atomique faible (éléments légers). Les zones de l'échantillon ayant un numéro atomique élevé seront donc plus blanches que celles ayant un numéro atomique faible. On appelle cela le contraste de phase. Cette particularité est fortement appréciée pour juger de l'homogénéité chimique d'un échantillon avant par exemple de l'analyser.
- Détecteur EDX Xflash Bruker fenêtre 10 mm² (EDX) : ce détecteur permet la réalisation des analyses élémentaires qualitatives et quantitatives sur des surfaces aussi petites que la taille du nanomètre en diamètre.



Figure 4.16 Microscope électronique à balayage Hitachi SU5000

4.5. Plan d'expérience

Le plan d'expérience proposé dans cette thèse vise à :

1. Evaluer l'adhérence des surfaces contaminées pendant la période sèche et sous la pluie.
2. Etudier l'effet des caractéristiques des particules (taille, concentration) et de la texture de la chaussée sur l'adhérence.

Le choix des fractions de taille des particules et des textures de surface de la chaussée est déjà discuté respectivement dans les paragraphes 4.2 et 1.3.

Pour la concentration, une valeur de 20 g/m^2 a été choisie initialement parce qu'elle représente un recouvrement visuellement similaire à celui d'une surface de chaussée contaminée après une longue période sèche.

Pour les essais à sec, pour étudier les mécanismes de lubrification – cisaillement et roulement – mentionnés dans la littérature (Mills et al., 2009) et qui dépendent de l'épaisseur du film de particules, deux autres concentrations – 10 g/m^2 et 40 g/m^2 – sont ajoutées comme des limites basse et haute respectivement. Ces valeurs sont cohérentes avec les données relevées dans la littérature. Par exemple, pour des zones urbaines, la concentration des particules varie de 20 à 55 g/m^2 selon Vaze and Chiew (2003) et de 10 à 35 g/m^2 selon Deletic and Orr (2005). Selon les données de Wang et al (2013), les concentrations étudiées correspondent à 2, 4 et 7 jours secs depuis la dernière pluie sur une route rapide avec un trafic important (Figure 4.17).

Pour les essais en présence d'eau, c'est la viscosité du mélange d'eau et de particules et son évolution sous la pluie qui sont étudiées. Par conséquent, le programme expérimental n'inclut qu'une seule concentration de particules (20 g/m^2) mais intègre différents degrés de mouillage et la phase de séchage.

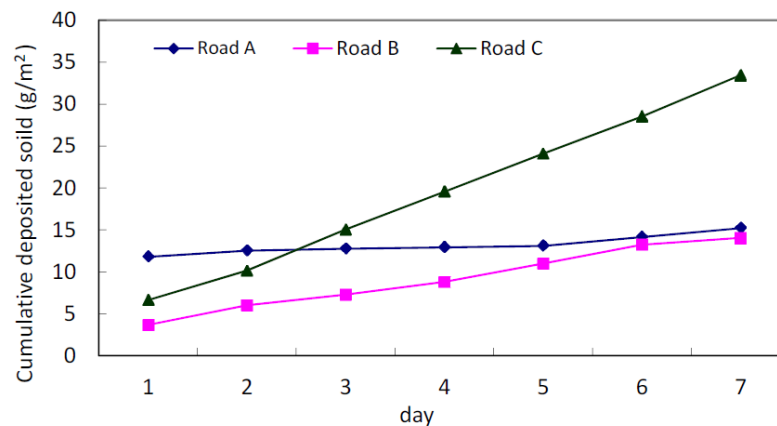


Figure 4.17 Accumulation des particules lors d'une période sèche (route A et B : trafic faible à moyen ; route C : trafic important) (Wang et al., 2013)

Le plan d'expérience est présenté dans la figure 4.18.

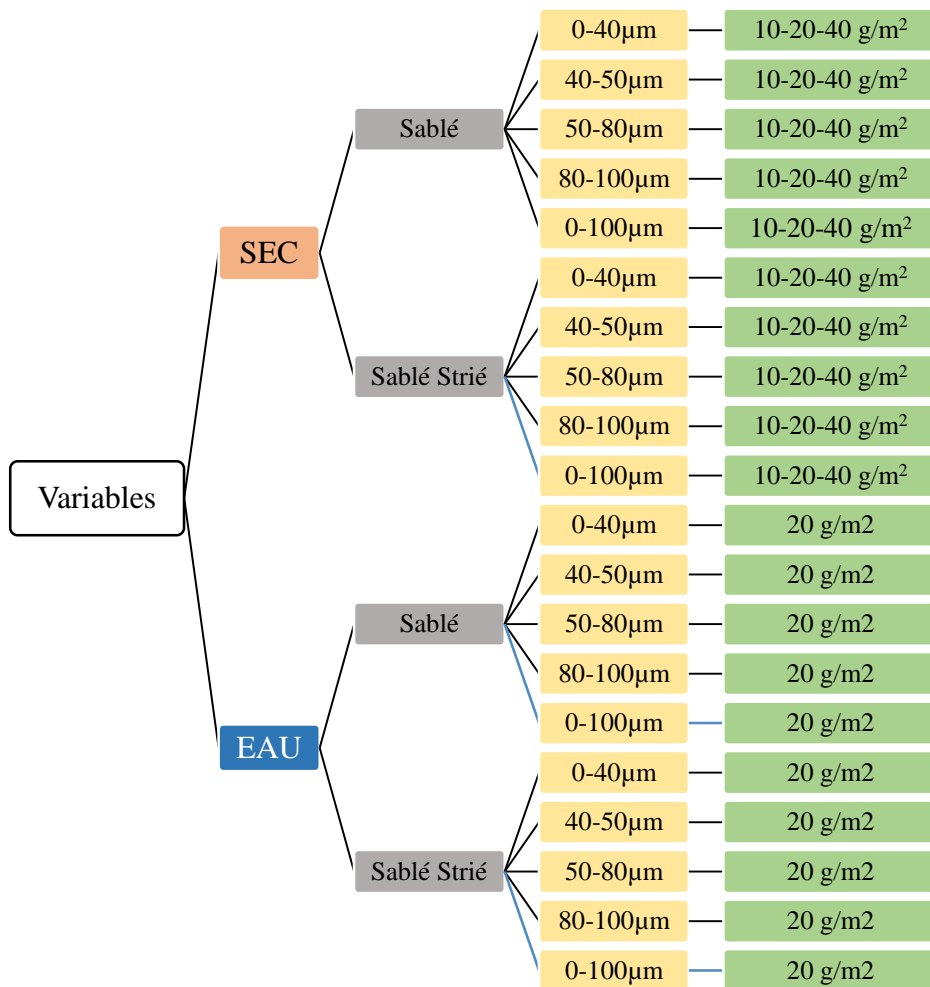


Figure 4.18 Plan d'expérience

4.6. Protocoles

Dans ce paragraphe, les protocoles sont décrits pour réaliser les tâches suivantes :

- Simulation des phases de dépôt des particules et de leur mouillage et lessivage par l'eau de pluie.
- Evaluation de l'adhérence pendant ces phases.
- Observations microscopiques de l'interface pendant la phase de dépôt.

L'observation microscopique de l'interface pendant la phase de mouillage/lessivage pose des difficultés expérimentales. En effet, l'évaporation de l'eau induit un changement d'état de surface entre le moment où l'essai est arrêté (par exemple avant ou après une mesure de frottement) et le début de l'observation, surtout lorsque celle-ci est réalisée à l'aide d'un microscope électronique. Une observation in situ requiert la présence d'instruments spécifiques comme un microscope électronique à balayage environnemental (sans pouvoir toutefois simuler la quantité de pluie voulue) et un tribomètre à introduire dans le microscope (sans pouvoir atteindre les conditions de contact – charge, vitesse, etc. – visées pour un contact pneu/chaussée). Il n'y a donc pas d'observation de l'interface en présence d'eau dans les protocoles envisagés.

4.6.1. Simulation de la phase de dépôt des particules

Le répandage des particules est réalisé manuellement sur la surface d'essai (Figure 4.19a). Les particules sont ensuite compactées manuellement (afin de simuler l'action de compactage du trafic) à l'aide d'une petite roue montée sur une tige métallique (Figure 4.19b). Les particules sont compactées par 60 passages (30 allers-retours) de la roue. Cette méthode permet d'obtenir un film de particules visuellement homogène sur la surface de l'échantillon (Figure 4.19c). Ce système a été utilisé lors des premiers essais avec la plaque Sablé.

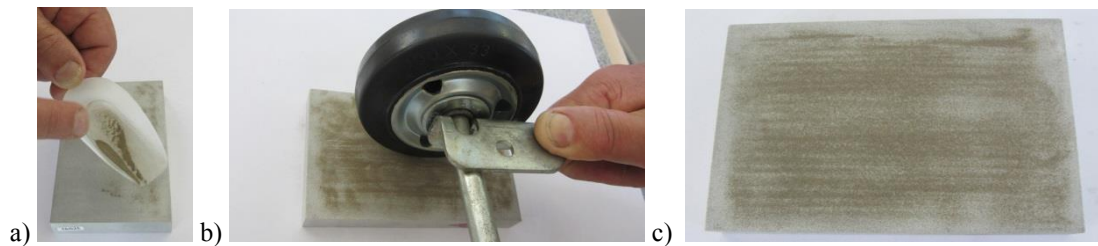


Figure 4.19 Simulation du dépôt des particules a) répandage b) ancien système de compactage utilisant de petites roues

Par la suite, un deuxième système de compactage a été développé permettant de mieux contrôler la pression de contact entre la roue et la surface testée (Figure 4.20). Il s'agit d'un rouleau en acier, ayant un poids de 6,5 kg, enveloppé d'une bande en caoutchouc. Un bras métallique est lié à ce rouleau permettant de faire avancer ce dernier sans exercer d'autres pressions que celle due à son poids. Ce système est construit de telle sorte qu'il exerce une pression proche de la pression de contact d'un pneumatique sur la surface de la chaussée (0,2MPa). La pression de contact appliquée par ce système, mesurée à l'aide d'un papier Fuji placé entre le rouleau et la surface d'essai en mesurant l'empreinte relevé par son propre poids, est égale à 0,15MPa (Figure 4.21). Cette pression est susceptible d'augmenter lorsque la surface de contact est plus faible (dans le cas les surfaces présentant des creux). Néanmoins sa valeur reste proche à la valeur souhaitée.

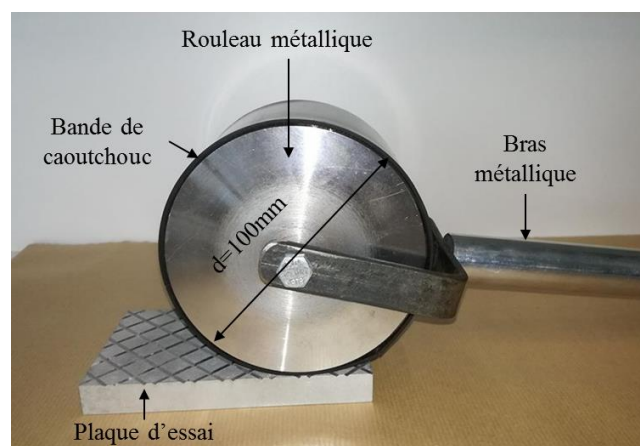


Figure 4.20 Nouveau système de compactage utilisant un rouleau

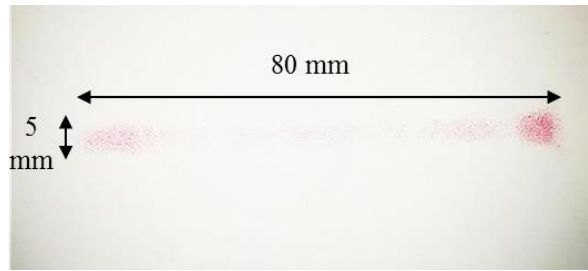


Figure 4.21 Empreinte du rouleau de compactage sur la plaque d'essai

Pour s'assurer de la transposition des résultats obtenus avec les deux systèmes de compactage, une comparaison a été faite sur des coefficients de frottement mesurés sur des surfaces contaminées dont les particules ont été compactées par les deux systèmes (Figure 4.22). L'écart-type moyen entre les deux séries de valeurs de frottement est de 0,025. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celui du pendule SRT (0,026, voir 1.4). On peut donc considérer qu'il n'y a pas de différence significative, en termes de coefficient de frottement, entre les deux systèmes de compactage développés.

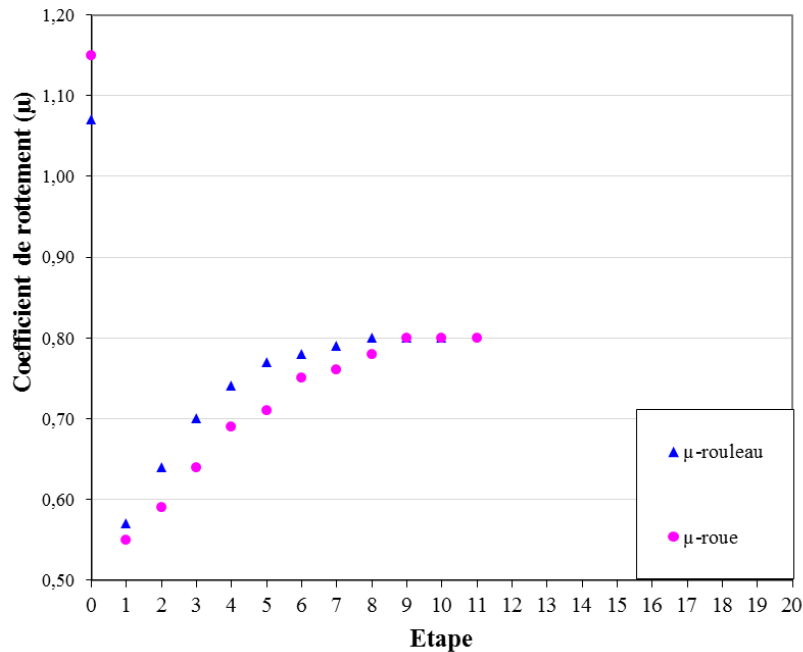


Figure 4.22 Comparaison des résultats trouvés avec les deux systèmes de compactage

4.6.2. Simulation des phases de lessivage et de séchage

Un simulateur de pluie a été développé pour mieux contrôler la quantité d'eau projetée sur la surface de l'échantillon. Il consiste en une chambre rectangulaire (53cm × 53cm × 100cm) avec une ouverture qui permet d'introduire l'échantillon et une buse placée sur la paroi verticale (Figure 4.23a). La buse permet de projeter des gouttelettes d'eau ayant une taille inférieure à 50 μm (Figure 4.23b). La buse est reliée à une pompe qui assure un débit d'eau constant. Le système développé peut simuler des précipitations de faible intensité. Cette limitation n'est pas pénalisante car l'effet des particules est le plus significatif pendant les pluies fines. Une précipitation forte lave la surface et élimine les particules assez vite et par la suite l'effet des particules sera négligeable. Une

précipitation intense engendre en revanche d'autres risques comme l'aquaplanage de par l'accumulation de fortes hauteurs d'eau sur la chaussée mais ce phénomène est en dehors du champ de cette étude.

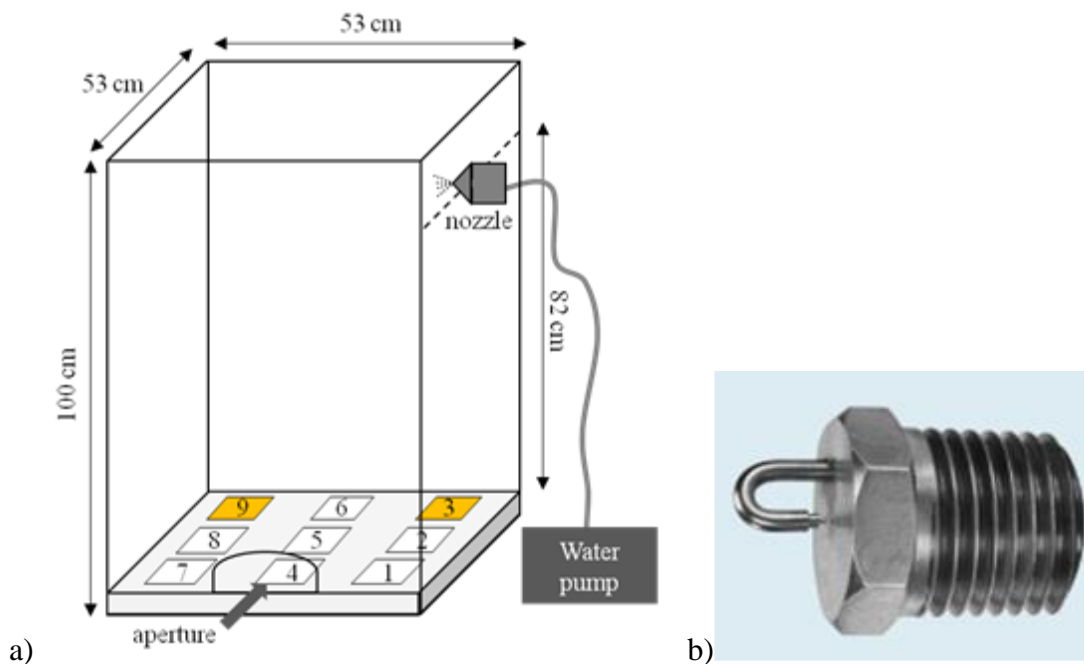


Figure 4.23 Simulateur de pluie et les positions de l'échantillon a) vue de l'ensemble b) la buse d'eau

Un calibrage du système de mouillage est nécessaire afin de définir la meilleure position de l'échantillon dans la chambre de mouillage et également la durée de précipitation nécessaire.

Le plateau horizontal de la chambre, où l'échantillon sera placé, est réparti en 9 zones, numérotées de 1 à 9 (Figure 4.23a). Des récipients circulaires de diamètre de 50 mm sont placés sur chaque position et exposés à une précipitation pendant 60 secondes. La pompe est ensuite arrêtée et les récipients sont pesés. Une profondeur d'eau équivalente est déduite par la division du volume d'eau par la surface du récipient. Le protocole est répété 5 fois et les statistiques de la profondeur d'eau (moyenne, écart-type et coefficient de variation) sont calculées pour chaque position (Figure 4.24).

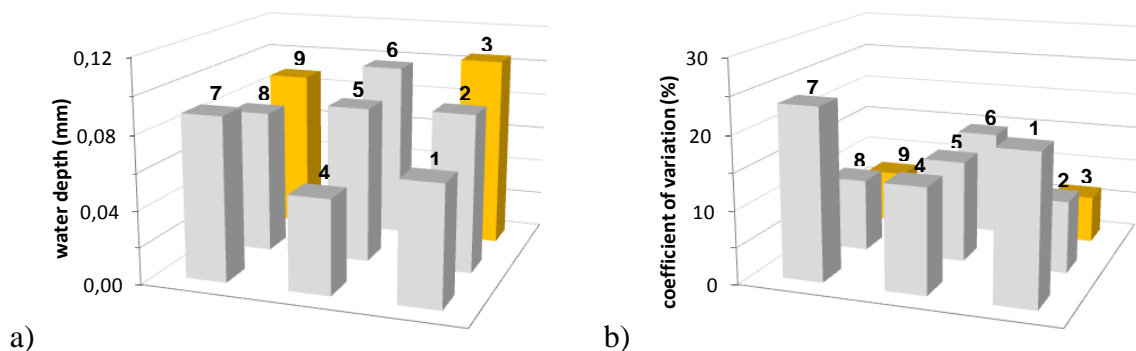


Figure 4.24 Profondeur d'eau pour chaque position après une durée de 60 secondes a) valeur moyenne b) coefficient de variation

Les positions 3 et 9 présentent des profondeurs d'eau moyennes similaires (0,09mm pour la position 9 et 0,105 mm pour la position 3) et les coefficients de variation les plus bas (respectivement 6% et 7%). La position 3 est choisie puisqu'elle offre plus de facilité pour introduire et enlever l'échantillon. La profondeur d'eau moyenne de cette position est égale à 0,105 mm pour une durée de précipitation de 60 secondes. On peut déduire qu'environ 9 secondes d'exposition est nécessaire pour obtenir une profondeur d'eau égale à 0,015 mm (profondeur d'eau jugée comme satisfaisante dans les essais préliminaires (Do et al., 2014) obtenue avec un vaporisateur manuel). Pour simplifier la procédure expérimentale, une durée de 10 secondes est choisie.

Le protocole est ensuite réalisé avec la plaque Sablé placée à la position 3. La plaque est exposée aux projections d'eau pendant 10 secondes et ensuite pesée ; l'opération est répétée 5 fois. La profondeur d'eau moyenne obtenue est égale à 0,015 mm avec un coefficient de variation de 7%. La position 3 et la durée de 10 secondes sont par la suite validées et choisies pour cette étude.

4.6.3. Mesure de frottement

Les mesures de frottement visent à évaluer l'adhérence d'une surface propre et sèche et, lorsqu'elle est contaminée par une quantité prédéfinie de particules, à suivre l'évolution de l'adhérence avec l'état de contamination. Une série d'essais est définie comme étant l'ensemble des opérations permettant de simuler des états de contamination (incluant l'état initial propre et sec) et de mesurer les coefficients de frottement correspondants.

A sec, l'état de contamination est déterminé par la quantité de particules présentes sur la surface. En présence d'eau, l'état de contamination est déterminé par la quantité de mélange d'eau et de particules sur la surface. La définition des états de contamination conduit à deux protocoles distincts pour les états sec et mouillé respectivement.

4.6.3.1. A sec

Le protocole suivi pour réaliser une série d'essais à sec est donné dans la Figure 4.25. L'état de contamination initiale est obtenu en suivant le protocole décrit dans 4.6.1. L'évolution de cet état de contamination est simulée par des passages répétés du patin du pendule SRT sur la surface de l'échantillon ; on assiste alors à une diminution de la quantité de particules présentes sur la surface. A chaque passage, le coefficient de frottement et le poids de l'échantillon sont enregistrés. La fin d'une série est définie de manière arbitraire par l'enregistrement de trois valeurs consécutives du coefficient de frottement qui ne diffèrent pas de plus de 0,01.

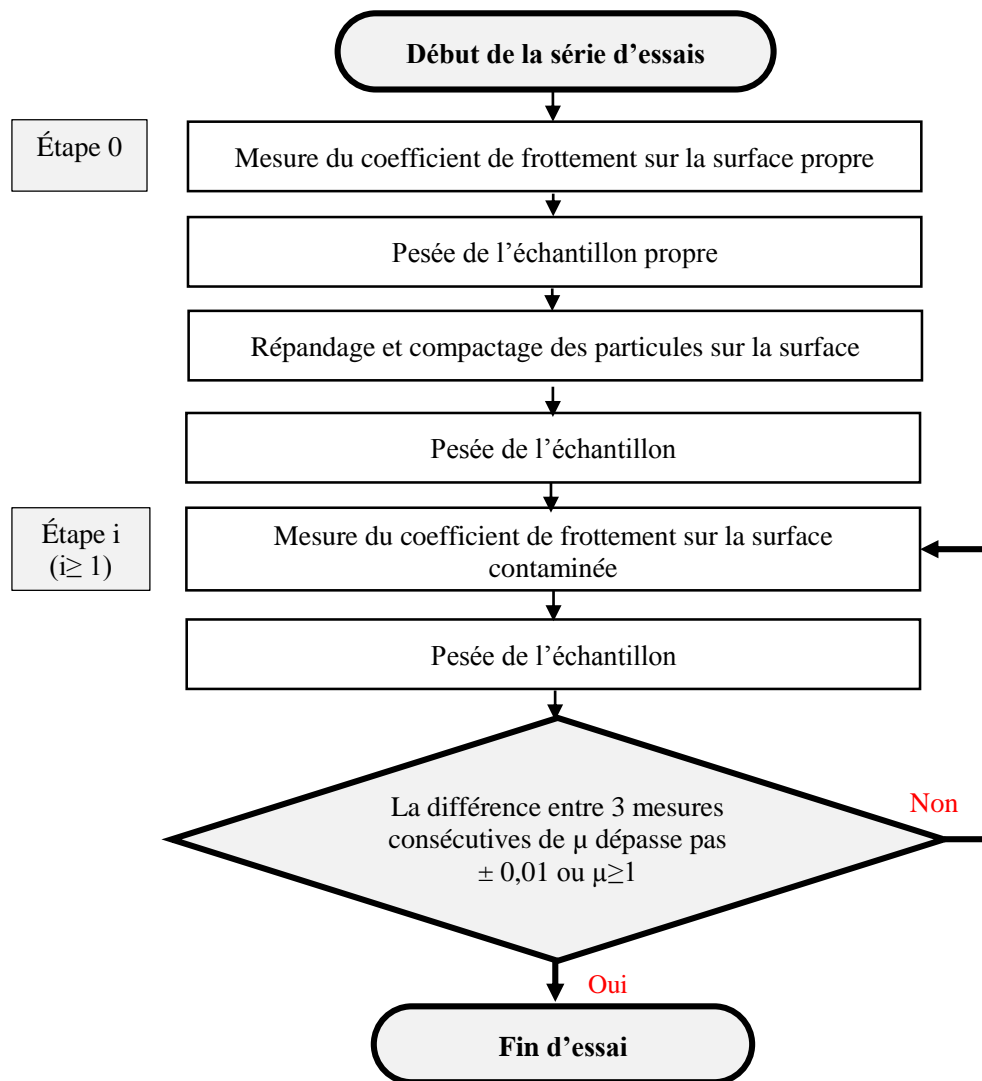


Figure 4.25 Protocole pour la réalisation d'une série d'essais à sec

4.6.3.2. En présence d'eau

Le protocole suivi pour réaliser une série d'essais en présence d'eau est donné dans la Figure 4.26. L'état de contamination initiale est obtenu en suivant le protocole décrit dans 4.6.1. L'évolution de cet état de contamination est simulée par :

- Une phase de lessivage : il s'agit de répéter des séquences consistant à ajouter l'eau pendant 10s avec le simulateur de pluie (4.6.2) puis à passer le patin du pendule SRT sur la surface de l'échantillon. Le critère d'arrêt de ces séquences est défini de manière arbitraire par l'enregistrement de trois valeurs consécutives du coefficient de frottement qui ne diffèrent pas de plus de 0,01.
- Une phase de séchage : il s'agit de répéter des séquences consistant à laisser l'échantillon sécher pendant 60s puis à passer le patin du pendule SRT sur la surface de l'échantillon. Le critère d'arrêt de ces séquences est défini de manière arbitraire par l'enregistrement de trois valeurs consécutives du coefficient de frottement qui ne diffèrent pas de plus de 0,01 ou lorsque le coefficient de frottement dépasse 1.

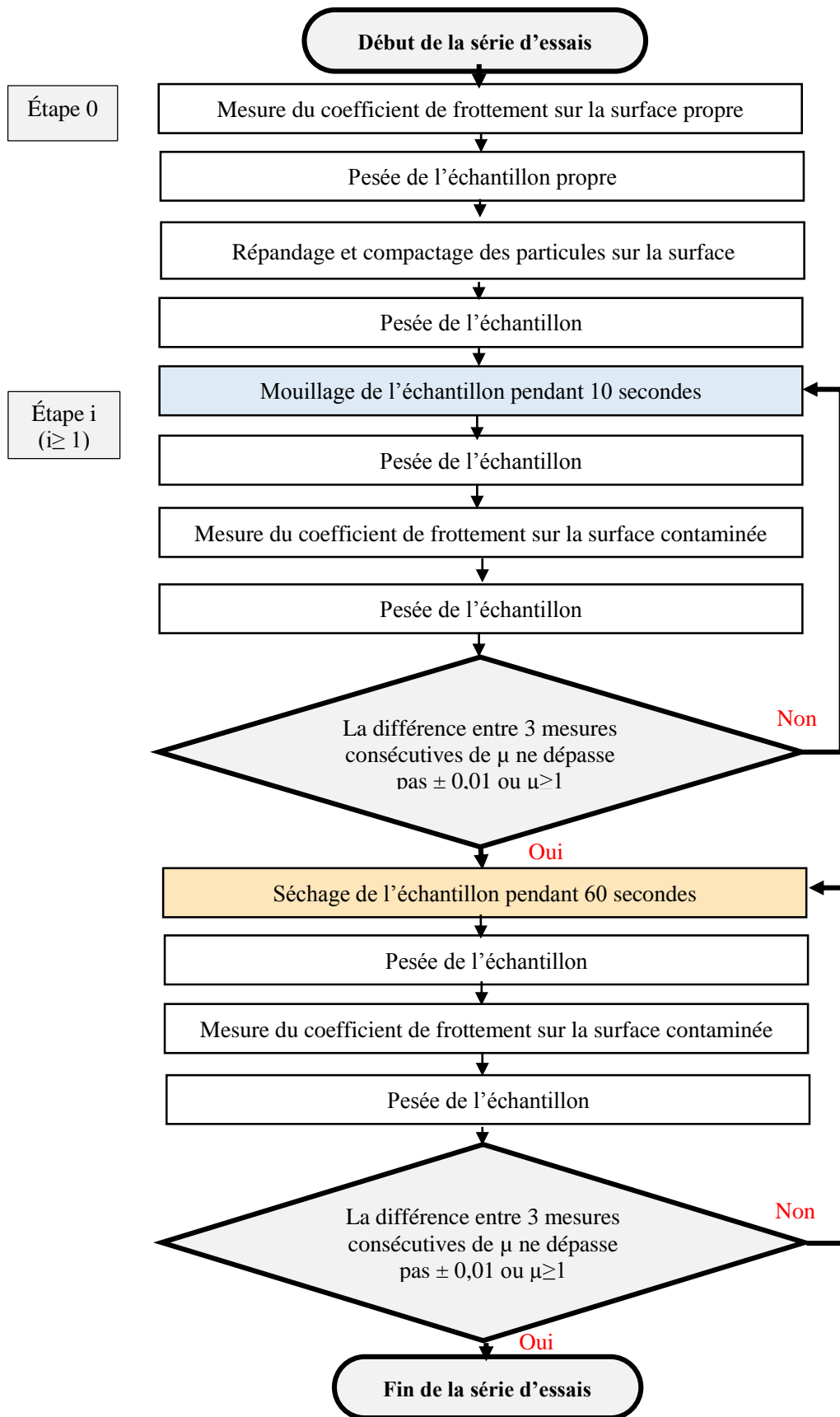


Figure 4.26 Protocole pour la réalisation d'une série d'essais en présence d'eau

4.6.3.3. *Nettoyage des surfaces*

Pendant la série d'essais et avant chaque mesure de frottement, le patin de gomme du pendule SRT est essuyé. Cela permet d'enlever la couche de contaminants qui adhère à la surface du patin lors de la mesure précédente. Cette procédure permet de focaliser les analyses seulement sur les flux de circulation et d'éjection des particules. À la fin de chaque série d'essais, l'échantillon est nettoyé à l'eau dans un bac à ultrason de type Fisherband™ pendant 5 minutes et ensuite séché à l'air ambiant pour une durée minimale de 4 heures. Il est ensuite réutilisé pour la série d'essais suivante.

4.6.4. **Observations au MEB**

Cette partie consiste à mettre en évidence le phénomène de piégeage des particules par la texture de la surface et les flux de ces particules dans le contact. Des observations microscopiques de la surface d'essai et des observations des particules éjectées en dehors du contact sont proposées.

4.6.4.1. *Techniques et montage d'observation*

Imagerie

Deux types d'électrons sont essentiels pour mener à bien ces observations. Les électrons secondaires (SE) qui donnent des informations sur les reliefs en surface des échantillons. Les électrons rétrodiffusés (BSE) nous donnent des informations sur les contrastes de densité des phases en présence.

Analyse chimique

Les particules utilisés dans notre étude sont constituées de différents types de minéraux (4.2.2). Selon le type de minéral, le comportement en frottement varie. Il est essentiel de connaître précisément l'évolution des particules, en termes de taille mais aussi en termes de nature, en fonction des passages du patin. La taille des particules est déterminée par imagerie. La nature des particules est difficile à définir in-situ. Les particules sont donc analysées au fur et à mesure de nos observations au MEB à l'aide du spectromètre de rayon X à dispersion d'énergie (appelé EDX). Avec cet instrument nous avons pu avoir une information sur les éléments chimiques présents sur chaque particule analysée et leurs proportions, à partir desquels nous définissons le type de minéral. Quelques minéraux ont des compositions chimiques simples et invariables (quartz : SiO₂, calcite : CaCO₃), mais la plupart ont une composition chimique variable, parfois dans des proportions importantes. Pour cette raison, les informations acquises par l'EDX doivent être prises par précaution.

Montage

Afin de visualiser à chaque fois la même zone de la plaque, il a été décidé de cibler la zone à la verticale de l'origine des axes \vec{x} et \vec{y} du MEB. Pour se faire, la plaque d'essai a été collée sur le porte échantillon du MEB. De cette façon, la plaque reste fixée pendant les observations MEB et pendant les mesures de frottement faites en parallèle. Une fois le porte échantillon placé dans la chambre du microscope, en respectant toujours l'emplacement de la flèche marquée sur la plaque, l'échantillon est mis à la position d'origine des axes \vec{x} et \vec{y} (0,0). Cette zone correspond aussi au centre de la plaque (au millimètre près). Afin de mieux cerner ces zones d'observations, deux grossissements sont principalement utilisés : le grossissement $\times 70$ qui correspond à une zone observée de $1,8\text{mm} \times 1,2\text{mm}$; et le grossissement $\times 300$ qui correspond à une zone d'observation de $0,42\text{mm} \times 0,32\text{mm}$.

Les particules éjectées en dehors du contact sont prélevées après le passage du patin à l'étape 1, l'étape intermédiaire et l'étape finale. Les particules sont recueillies sur des pastilles carbonées collantes placées à 5cm devant la plaque (Figure 4.27). Ces pastilles ont été métallisées en fines couches de carbone avant d'être observées au MEB afin d'améliorer la conductivité de ces particules et donc la qualité d'observation.

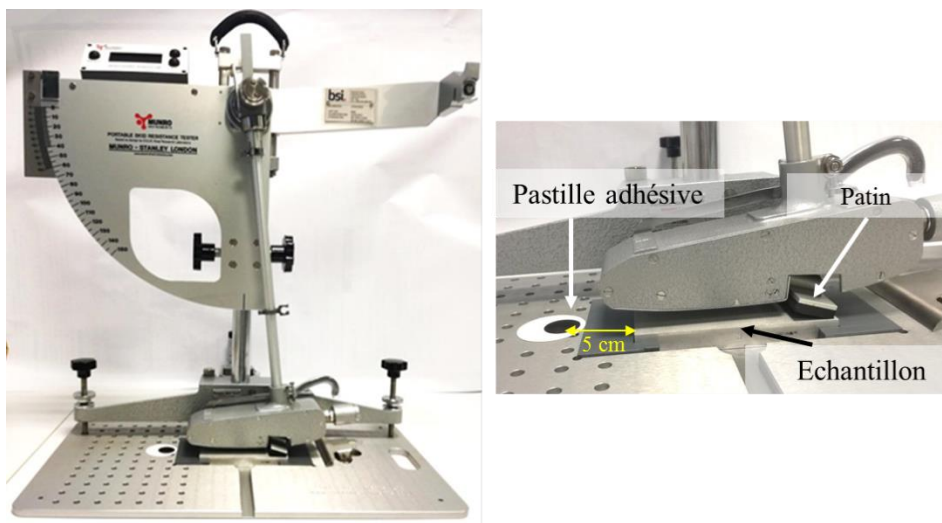


Figure 4.27 Montage d'essai

4.6.4.2. Procédure d'observation

Le protocole d'observation suit les mêmes étapes que celui des mesures de frottement à sec (4.6.3.1) en ajoutant des observations de la plaque (particules en surface) et des pastilles (particules éjectées) à cinq étapes (Figure 4.28):

- Etape 0 : surface propre ;
- Etape 0 : état initial du film des particules après le dépôt et le compactage (avant le passage du patin SRT) ;
- Etape 1 : après le premier passage du patin SRT ;

- Etape intermédiaire : après le troisième passage du patin SRT (le début de la remontée du coefficient de frottement) ;
- Etape finale : lorsque le coefficient de frottement se stabilise.

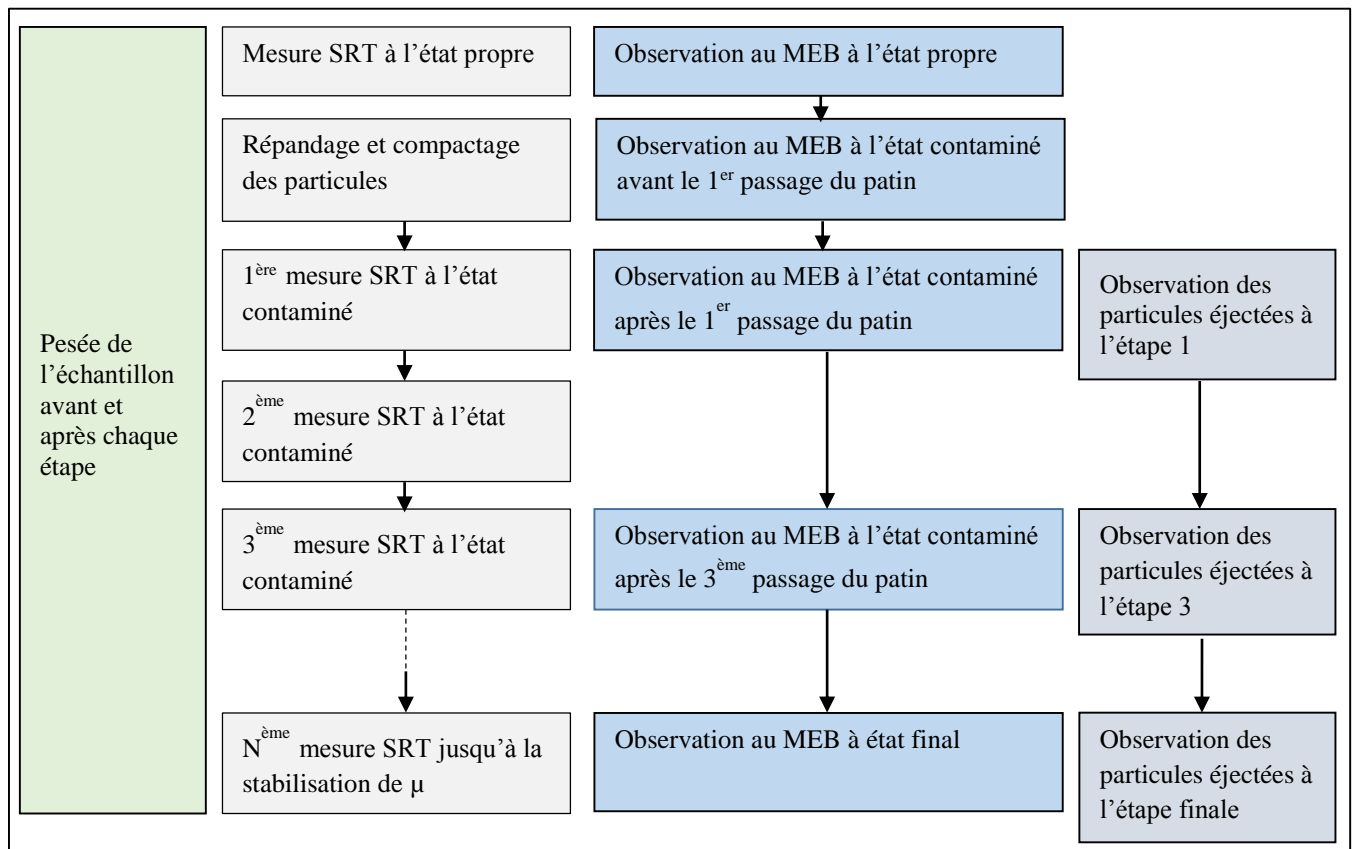


Figure 4.28 Protocole expérimental des observations au MEB

4.6.5. Observations par la caméra rapide

Cette partie consiste à visualiser le comportement dynamique des particules à l'interface, c'est à dire de s'intéresser aux mouvements relatifs de ces particules en fonction de leurs tailles et leurs interactions avec la texture de la surface par des visualisations macroscopiques. Un protocole expérimental est développé en utilisant une caméra rapide. Cet essai consiste à visualiser le long d'une petite zone du contact le passage du patin sur la surface contaminée par des particules lors d'un essai au pendule SRT.

4.6.5.1. Montage d'observation

Le montage de cet essai est composé de la plaque d'essai, du pendule SRT, de la caméra rapide associée à son objectif et des dispositifs d'éclairage. Afin d'apporter un maximum de lumière sur la zone visée par la caméra pour avoir une image claire, nette et un nombre maximal d'images par seconde, 6 spots d'éclairage à LED sont utilisés. Trois d'entre eux sont placés autour de la caméra ; deux autres sont placés de part et d'autre de la plaque dans le sens transversal. Un panneau

d'éclairage circulaire est placé en face de l'arrivée du patin. Le champ de la caméra couvre une zone d'environ $15,4 \times 31$ mm au milieu de la plaque à 5mm du bord (Figure 4.29).

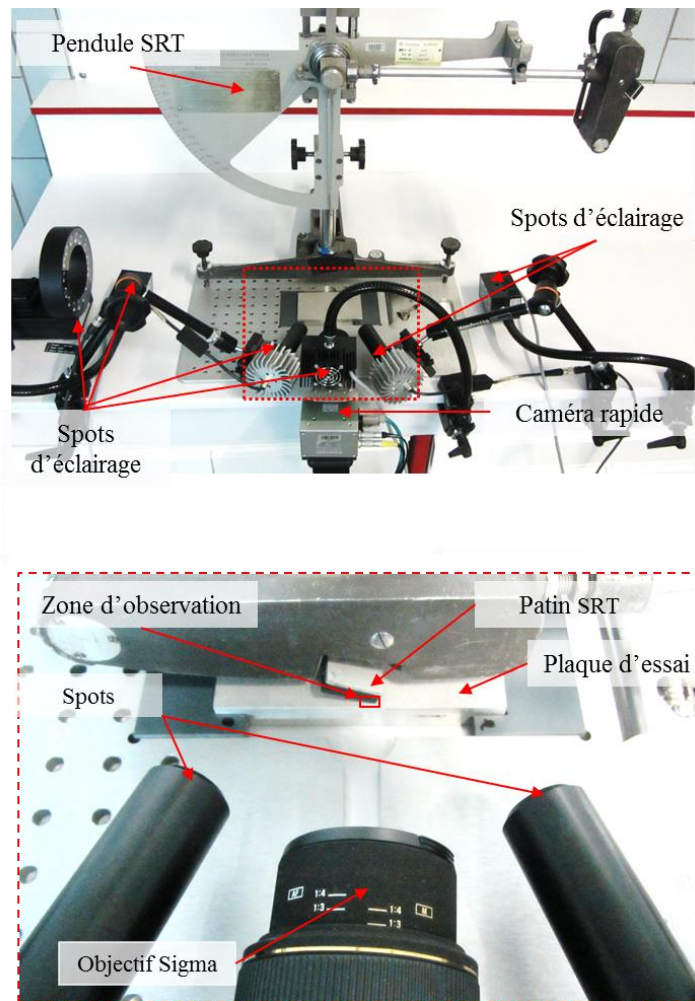


Figure 4.29 Montage de l'essai à la caméra rapide

4.6.5.2. Types de particules et de surfaces

Le mouvement des particules sur une surface rugueuse est complexe à cause des interactions particules/particules et particules/surface. Il paraissait donc nécessaire de décomposer le problème en étudiant au préalable le comportement d'une particule sur des surfaces avec/sans rugosité. Le programme d'observations comporte donc les trois configurations suivantes :

- Particule isolée sur une surface lisse.
- Particule isolée sur une surface rugueuse.
- Ensemble de particules sur une surface rugueuse.

Les particules isolées utilisées sont des billes de verre dont le diamètre est normalisé (NF EN 13036-1) ; il est compris entre 180 et 250 μ m. Les particules naturelles sont les particules de Cheviré. Quatre fractions de tailles sont choisies : 0-40 μ m ; 40-50 μ m ; 80-100 μ m et 0-100 μ m. La

fraction 50-80 μm ne fait pas partie de cet essai car son comportement en frottement est similaire à celui de la fraction 80-100 μm (chapitre 5).

La première plaque utilisée est une plaque lisse en aluminium dont la rugosité est négligeable devant la taille des billes de verre, avec un $S_q = 0,31\mu\text{m}$ (Figure 4.30). La deuxième plaque utilisée est la plaque Sablé qui apporte de la texture (présentée dans la partie 0).



Figure 4.30 Plaque d'aluminium à surface lisse

4.6.5.3. Dépôt de particules modèles

La répartition des billes sur la surface est adaptée de telle sorte qu'on ne trouve qu'une bille par cm^2 . Cette répartition permet de visualiser le comportement d'une seule particule sur la zone d'observation. La répartition est obtenue à l'aide d'un tamis ayant des mailles de 0,165mm dans lesquelles des trous ont été agrandis à distance régulière grâce à une aiguille de pénétration normalisée pour caractériser les bitumes (NF EN 1426). Chaque trou agrandi permet de faire passer une seule bille de verre. L'ensemble des matériels et un exemple de billes déposées sont montrés dans la Figure 4.31.

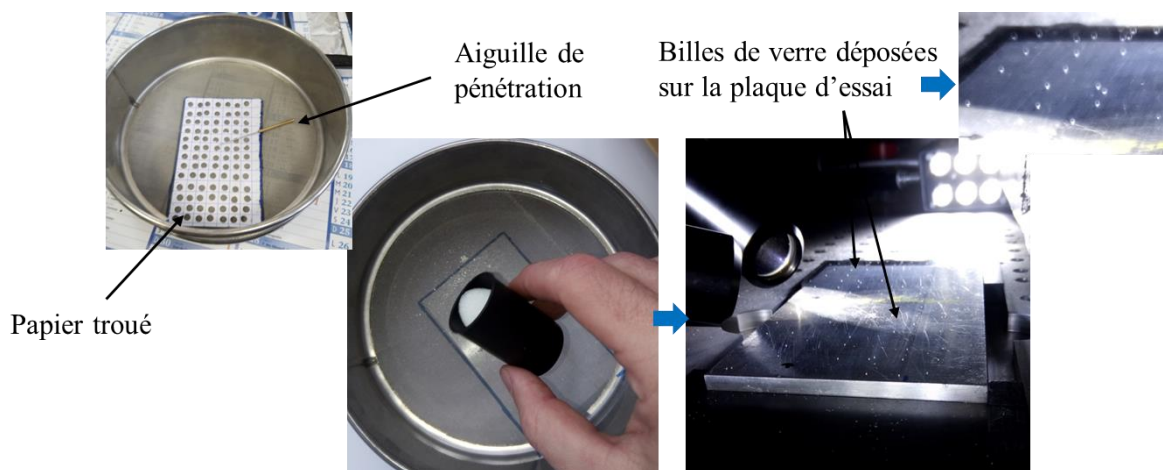


Figure 4.31 Répartition des billes de verre sur la plaque lisse

4.6.5.4. *Dépôt de particules de Cheviré*

Le répandage des particules est réalisé en suivant le même protocole que celui annoncé dans la partie 4.6.1. Pour cet essai, nous avons choisi de mettre la quantité la plus faible afin d'avoir une observation claire du comportement de ces particules. La concentration de particules choisie est donc 10 g/m².

4.6.5.5. *Procédure d'observation*

Pour chaque combinaison (surface-particules), une mesure de frottement est réalisée et le passage du patin du pendule SRT sur la surface est visualisé. Les vidéos prises par la caméra rapide sont traitées avec le logiciel GIMP. Ce logiciel de traitement d'image nous permet de connaître la distance de contact de la bille sous le patin. Pour ce faire, le nombre de pixels entre l'entrée de la bille sous le patin et sa sortie a été compté et multiplié par 12µm. Connaissant le temps entre les images, la vitesse de déplacement du patin est calculée.

Les paramètres ont été optimisés pour avoir la vision la plus claire possible. Durant l'essai, les paramètres sont les suivants :

- Fréquence d'images : 6000 images/s
- Temps maximum de l'enregistrement : 3.3s
- Vitesse d'obturation : 100µs
- Géométrie du cadre : 1280 par 171 pixels
- Ouverture de l'objectif : f-2.8
- Zoom : 1:1

Chapitre 5

Phase de dépôt – Frottement à l’interface

Plan du chapitre

5.1.	Introduction	94
5.2.	Variations du coefficient de frottement et de la masse des particules	94
5.2.1.	Calcul de la masse des particules à partir des pesées	94
5.2.2.	Répétabilité des mesures de frottement	95
5.2.3.	Evolution avec les états de contamination	95
5.3.	Influence des caractéristiques liées aux particules	96
5.3.1.	Taille	96
5.3.2.	Concentration	100
5.4.	Influence des caractéristiques de surface	101
5.4.1.	Analyse des flux de particules	102
5.4.2.	Influence de la macrotecture sur le stockage des particules	104
5.4.2.1.	Modélisation du flux de stockage	104
5.4.2.2.	Interactions entre le flux de stockage et les caractéristiques des particules	107
5.4.3.	Influence de la microtexture sur le piégeage des particules	109
5.4.3.1.	Analyse des masses de particules résiduelles	109
5.4.3.2.	Analyses des volumes de vides	111
5.5.	Conclusions	113

5.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats des essais de frottement. A travers l'analyse de ces résultats, nous cherchons à comprendre l'influence des caractéristiques des particules (taille, concentration) et des caractéristiques de la surface d'essai (microtexture, macrotexture) sur le frottement. La procédure et le protocole expérimental mis en œuvre ont été détaillés dans le chapitre 4.

5.2. Variations du coefficient de frottement et de la masse des particules

5.2.1. Calcul de la masse des particules à partir des pesées

Avant et après chaque mesure de frottement, la plaque est pesée et la quantité des particules restante sur la surface est déduite (en connaissant la masse de la plaque propre). Les pesées sont réalisées à l'aide d'une balance du type Sartorius Cubis®, ayant une précision de lecture de 0,001g. Les formules adoptées pour déterminer la masse des particules à chaque étape sont présentées ci-dessous :

$$m_{particules,i}^{avant} = m_{échantillon,i}^{avant} - m_0 \quad (5.1)$$

$$m_{particules,i}^{après} = m_{échantillon,i}^{après} - m_0 \quad (5.2)$$

$$m_{particules,i}^{avant} = m_{échantillon,(i-1)}^{après} \quad (5.3)$$

Où

$m_{particules,i}^{avant}$: masse des particules à l'étape (i) avant mesure de frottement ;

$m_{échantillon,i}^{avant}$: masse de l'échantillon à l'étape (i) avant mesure de frottement ;

m_0 : masse de l'échantillon propre et sec.

Les équations ci-dessus ne sont valables que si les pesées n'incluent pas des pertes de masses du patin de frottement et de la plaque d'aluminium. Des pesées du patin réalisées avant et après chaque série d'essais montrent que la perte de masse du patin durant les séries d'essai est négligeable (quelques microgrammes) comparée à la masse de particules utilisée (minimum 100g au début d'une série d'essais). La pesée de la plaque avant et après chaque série d'essai montre qu'il n'y a aucun changement de masse. La quantité de particules détachées du patin et de la plaque peut donc être considérée comme négligeable. Les analyses de masses ne concernent donc que la masse des particules présentes à la surface.

5.2.2. Répétabilité des mesures de frottement

Compte tenu de l'ampleur du programme expérimental et de la durée d'exécution des séries d'essais (1/2 journée par série), de la nécessité d'utiliser des particules provenant du même prélèvement et de la quantité de sédiments qu'il était possible de collecter (Chapitre 4), il n'était pas possible de répéter les séries d'essais pour toutes les configurations envisagées. Certaines configurations ont été néanmoins répétées pour nous permettre d'évaluer la robustesse du protocole d'essais. L'exemple présenté dans la Figure 5.1 montre que les séries de mesures sont très répétables (coefficient de variation – rapport écart-type/moyenne – de moins de 4% pour chaque étape dans l'exemple montré). Ces résultats confirment donc la pertinence des protocoles d'essais et permettent de conduire les analyses avec une seule répétition par configuration d'essais.

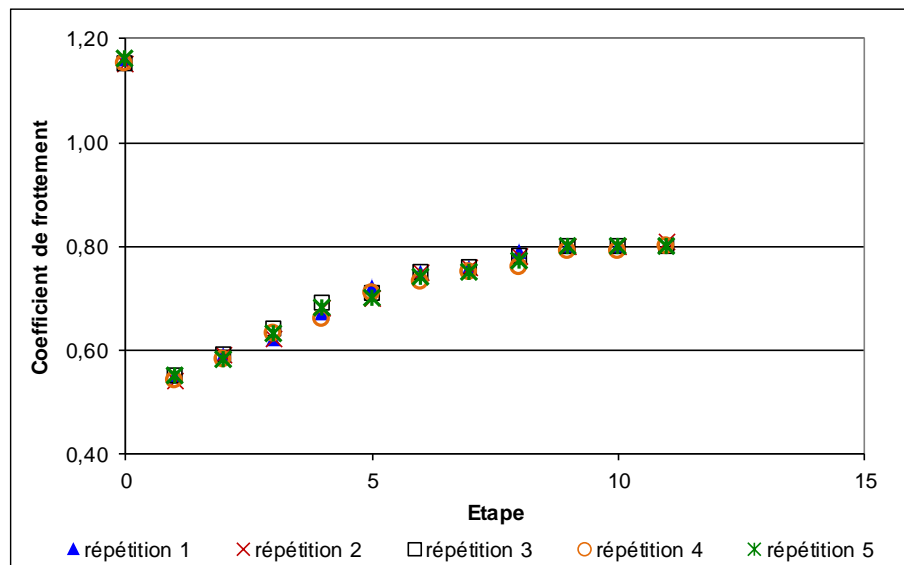


Figure 5.1 Répétition des séries d'essais (Sablé ; concentration 20g/m² ; fraction 0-40µm)

5.2.3. Evolution avec les états de contamination

Un exemple de la variation du coefficient de frottement et de la masse des particules en fonction des étapes du protocole est présenté dans la Figure 5.2. Comme l'indique le protocole expérimental, présenté dans la partie 4.6.3.1 du chapitre 4:

- l'étape 0 correspond à la mesure du coefficient de frottement à l'état propre de la surface ;
- l'étape 1 correspond à la première mesure du coefficient de frottement à l'état contaminé après le répandage et le compactage des particules sur la surface de l'échantillon ;
- les étapes suivantes correspondent aux différents passages du patin SRT jusqu'à la stabilisation du coefficient de frottement.

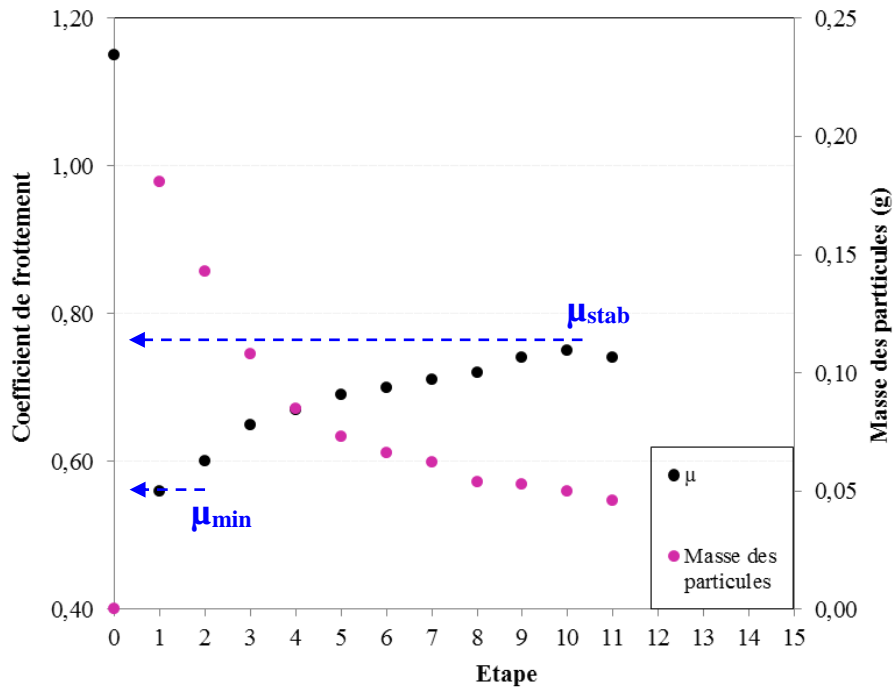


Figure 5.2 Variation typique du coefficient de frottement et de la masse des particules en fonction des étapes du protocole (Sablé Strié ; concentration 20g/m² ; fraction 0-100 μ m)

Le coefficient de frottement d'une surface propre commence par un niveau élevé ($\mu > 1$). Lorsque la surface est recouverte par des particules (à l'étape 1), le coefficient de frottement chute significativement pour atteindre son minimum ($\mu < 0,6$). Avec les passages successifs du patin de mesure sur la surface contaminée, le coefficient de frottement augmente progressivement jusqu'à ce qu'il se stabilise. Les passages successifs du patin de mesure ne permettent pas de retrouver le niveau de frottement initial (d'une surface propre).

La masse des particules diminue avec les différents passages du patin et se stabilise à la fin de l'essai. On observe que la masse des particules évolue de la même manière que le coefficient de frottement mais en sens inverse : moins de particules induit un coefficient de frottement plus important. Ces allures montrent la dépendance du coefficient de frottement de la masse des particules. Le fait que le coefficient de frottement et la masse des particules se stabilisent à un niveau différent de celui d'une surface propre montre qu'un phénomène de piégeage des particules par les aspérités de la surface intervient. L'influence des caractéristiques des particules et de la surface sont étudiées dans les parties suivantes.

5.3. Influence des caractéristiques liées aux particules

5.3.1. Taille

L'effet de la taille des particules est présenté dans la Figure 5.3 pour les deux surfaces et la concentration initiale 20g/m². Des tendances similaires sont observées pour les deux autres concentrations de particules dont les résultats sont présentés en annexe.

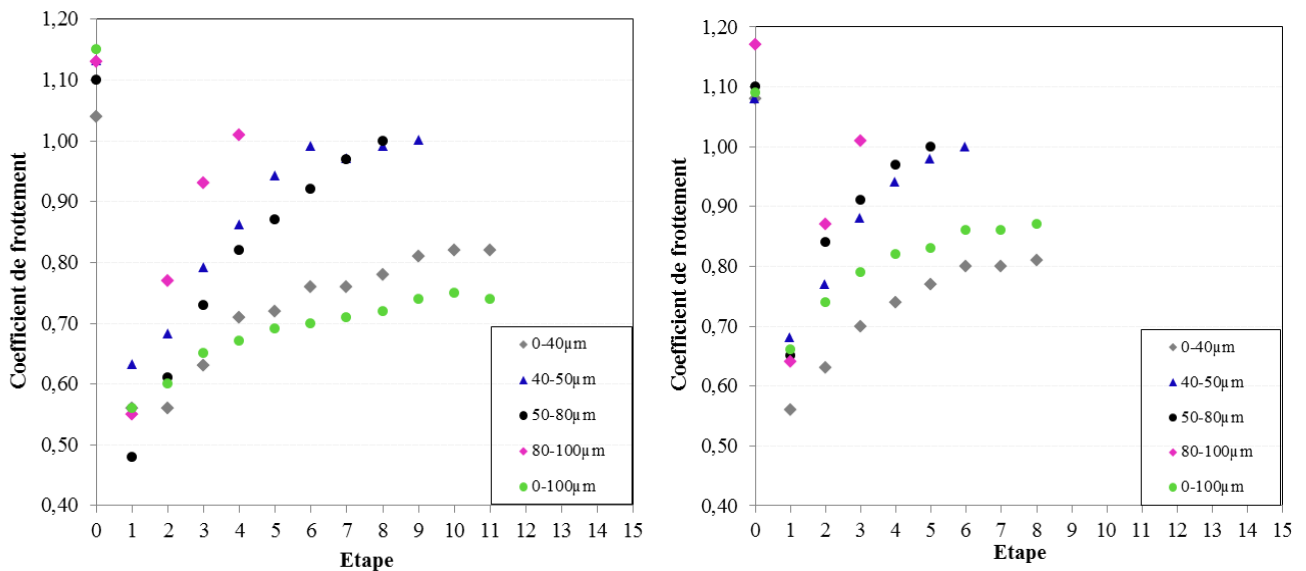


Figure 5.3 Variation du coefficient de frottement pour différentes fractions de taille : a) Sablé ; b) Sablé Strié

À l'état propre, le niveau du coefficient de frottement est variable ($1,04 < \mu < 1,15$ pour Sablé et $1,08 < \mu < 1,17$ pour Sablé Strié). En moyenne, on obtient $\mu = 1,10$ pour Sablé et $1,11$ pour Sablé Strié ; le coefficient de frottement moyen est donc considéré comme similaire pour les deux surfaces propres.

À l'état contaminé, on observe que le coefficient de frottement remonte plus rapidement quand la taille des particules est plus importante. Avec la fraction de particules grossières (80-100µm), le coefficient de frottement atteint son niveau maximal ($\mu \geq 1$) dès le troisième ou quatrième passage du patin. La variation du coefficient de frottement correspondant à la fraction 0-40µm est similaire à celle de la fraction 0-100µm : le coefficient de frottement évolue moins rapidement que pour les autres fractions de taille et se stabilise à un niveau inférieur à celui d'une surface propre ($0,76 < \mu < 0,82$). La variation du coefficient de frottement correspondant à la fraction 40-50µm est similaire à celle de la fraction 50-80µm.

Pour mieux illustrer l'effet de la taille des particules sur la variation du coefficient de frottement, les résultats sont présentés sous la forme d'histogrammes dans la Figure 5.4 et la Figure 5.5. À l'étape 1, après le répannage et le compactage des particules, la surface est supposée être recouverte de particules. Dans ce cas, le patin de gomme glisse sur une couche de particules et mesure un coefficient de frottement qu'on appellera μ_{\min} (Figure 5.2). Dans le protocole d'essais, les mesures sont arrêtées quand la différence entre trois mesures consécutives de coefficient de frottement ne dépasse pas $\pm 0,01$; le coefficient de frottement mesuré à l'étape finale est alors appelé μ_{stab} (Figure 5.2). Ces deux valeurs sont présentées dans respectivement la Figure 5.4 et la Figure 5.5 pour les différentes fractions de taille, concentrations et surfaces d'essai.

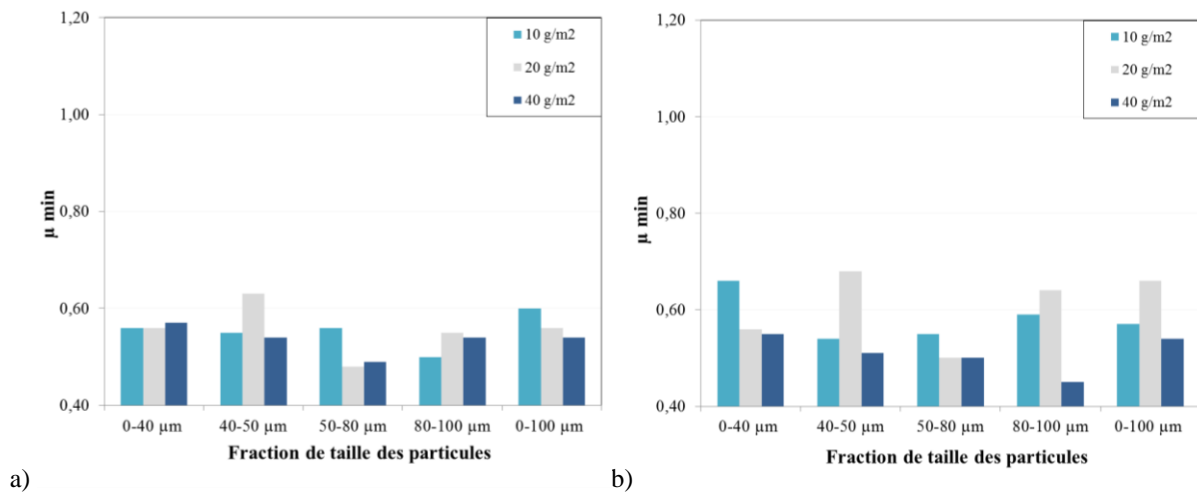


Figure 5.4 Niveau minimum du coefficient de frottement - μ_{\min} : a) Sablé, b) Sablé Strié

Les résultats trouvés montrent qu'il n'existe pas une relation claire entre le μ_{\min} et la taille des particules. Les valeurs de μ_{\min} trouvées sur les deux plaques en aluminium sont similaires (0,55 et 0,57).

Des essais supplémentaires ont été réalisés avec les fractions de taille des particules de Cheviré (0-100 μm , 40-50 μm et 80-100 μm) sur la plaque Sablé. Ces essais consistent à recouvrir la surface avec une quantité importante de particules (80g/m²) et de mesurer le coefficient de frottement. Trois répétitions, au moins, sont réalisées. La même valeur moyenne de μ_{\min} est trouvée pour les trois fractions de taille des particules ($\mu_{\min} = 0,58$). Cette valeur est proche de ce qu'on a obtenu avec les autres concentrations de particules. On constate que la valeur de μ_{\min} est indépendante de la taille des particules. Cependant, le fait qu'on retrouve la même valeur de μ_{\min} pour des concentrations allant de 10g/m² à 80g/m² signifierait que la concentration de particules nécessaire pour recouvrir complètement la surface Sablé serait plus importante que 80 g/m². La détermination de cette concentration sera traitée dans le paragraphe 5.4.3.

La dépendance de μ_{stab} de la taille des particules est observée dans la Figure 5.5. On voit que μ_{stab} est plus faible pour les fractions 0-40 μm et 0-100 μm . Pour les autres fractions de taille, le coefficient de frottement atteint toujours son niveau initial en fin d'essai.

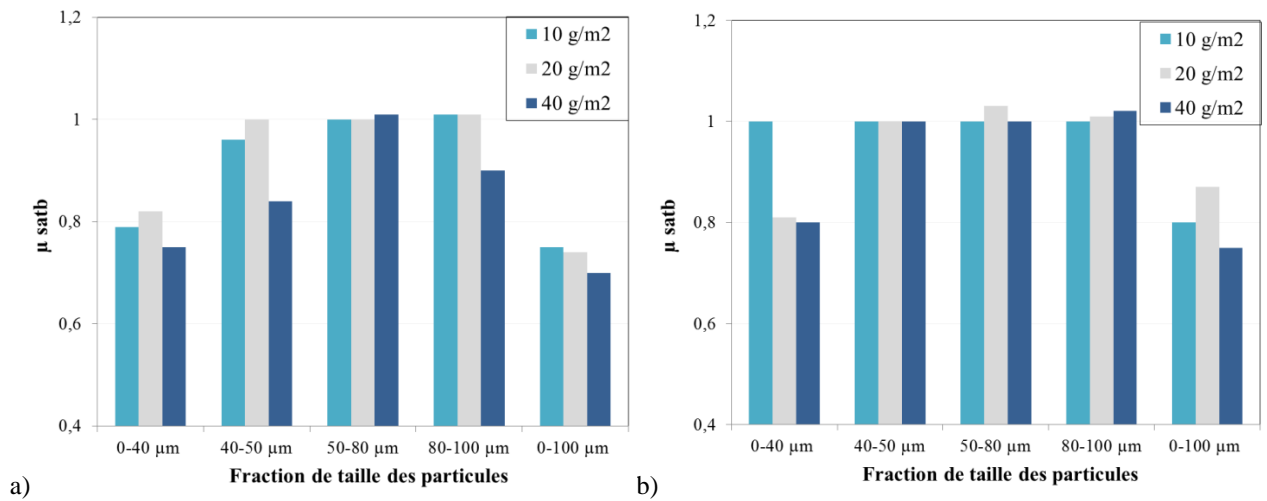


Figure 5.5 Niveau final du coefficient de frottement - μ_{stab} : a) Sablé ; b) Sablé Strié

La variation de la masse des particules en fonction des étapes du protocole pour toutes les fractions de taille des particules et toutes les surfaces est présentée dans la Figure 5.6 (exemple avec la concentration initiale des particules 20 g/m^2). Des tendances similaires sont observées pour les deux autres concentrations des particules dont les résultats sont présentés en annexe C. L'effet de la taille des particules sur la masse des particules présentes sur la surface de l'échantillon est observé. Sur les deux plaques, plus les particules sont fines, plus leur masse se stabilise à un niveau important.

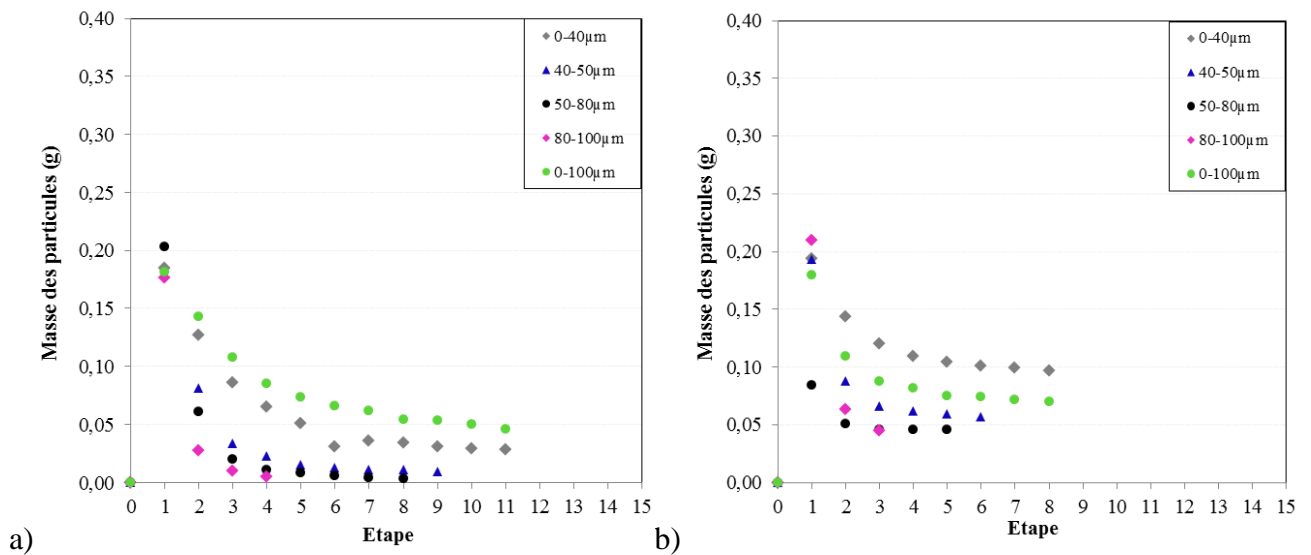


Figure 5.6 Variation de la masse des particules pour différentes fractions de taille : a) Sablé ; b) Sablé Strié

5.3.2. Concentration

L'effet de la concentration des particules sur la variation du coefficient de frottement est présenté dans la Figure 5.7. Les exemples sont montrés pour toutes les surfaces et la fraction de taille 0-100 μm .

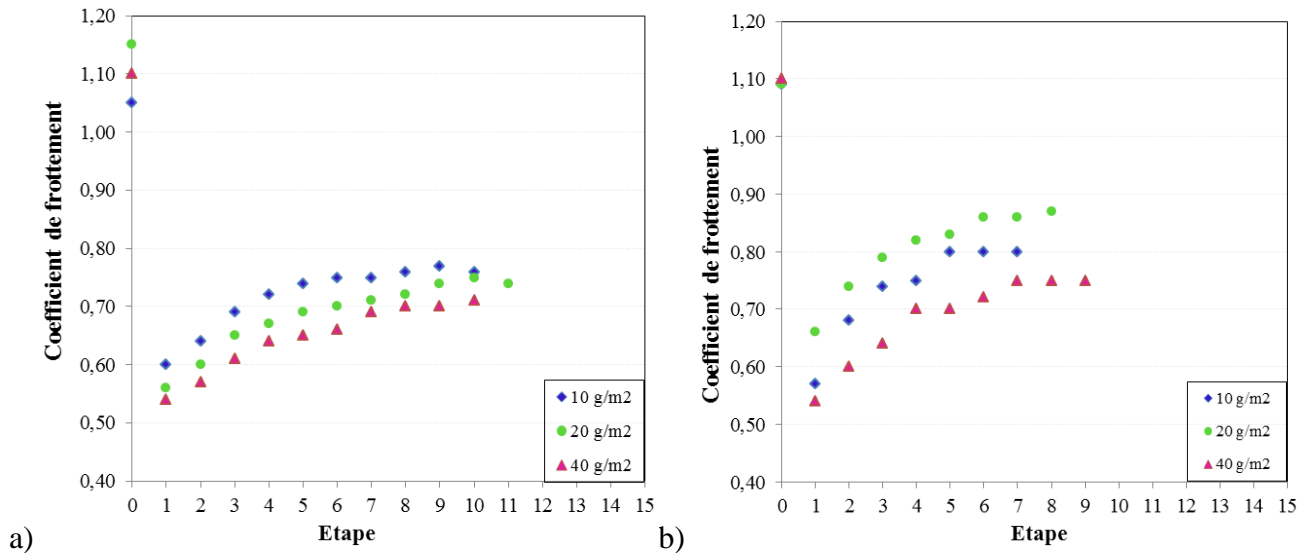


Figure 5.7 Variation du coefficient de frottement pour différentes concentrations initiales (fraction de taille 0-100 μm) : a) Sablé ; b) Sablé Strié

On observe qu'avec la concentration de 40g/m² le coefficient de frottement remonte plus lentement que pour les autres concentrations initiales des particules. Cette tendance pourrait être expliquée par le fait que plus la concentration est importante, plus il faudra de passages du patin pour éjecter les particules de l'aire de contact. Cependant, il faudrait aussi prendre en compte l'espace de stockage offert par le volume des vides. La surface Sablé, due à sa plus faible rugosité (Chapitre 4 ; Tab.4.2), offre moins d'espace et on voit donc une hiérarchie logique entre les trois concentrations (Figure 5.7a). Cette hiérarchie est moins visible pour la surface Sablé Strié ; on note cependant que le graphe correspondant à la concentration 40g/m² se trouve en dessous de ceux des deux autres concentrations (Figure 5.7b).

L'évolution de la masse des particules est maintenant présentée pour toutes les surfaces et la fraction de taille 0-100 μm dans la Figure 5.8.

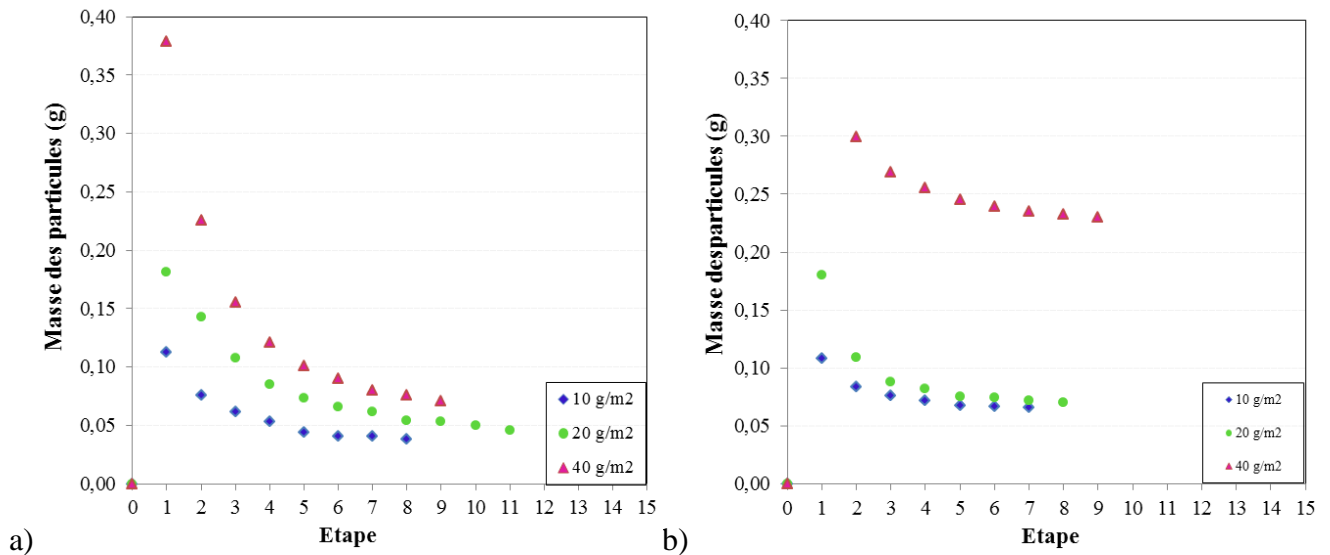


Figure 5.8 Variation de la masse des particules pour différentes concentrations initiales (fraction de taille 0-100µm) : a) Sablé ; b) Sablé Strié

Lorsqu'on observe l'évolution de la masse des particules, on trouve qu'il y a une hiérarchie logique des courbes de masse par rapport à la concentration initiale des particules : plus la concentration est importante, plus la quantité des particules stockée ou piégée dans la texture est importante. L'écart entre la concentration 40g/m² et les deux autres concentrations est plus important sur la surface Sablé Strié que sur la surface Sablé.

5.4. Influence des caractéristiques de surface

L'effet de la texture de surface est montré dans la Figure 5.9. On pourrait être surpris par l'écart en termes de coefficient de frottement entre le Sablé et le Sablé Strié (Figure 5.9a). Cependant, comme nous verrons dans le paragraphe 5.4.1, pour la même masse initiale, une fraction de particules est poussée lors du compactage dans les creux de la plaque Sablé Strié. Par conséquent, aux mêmes étapes du protocole, l'état de contamination n'est pas identique entre les deux surfaces : le Sablé retiendrait plus de particules à la surface et induirait donc moins de frottement.

La variation de la masse des particules (Figure 5.9b) montre qu'à partir de l'étape 5, la masse des particules se stabilise sur la surface Sablé Strié alors qu'elle continue à décroître sur la surface Sablé. La décroissance sur le Sablé est due à l'éjection continue des particules par le patin SRT. La stabilisation sur le Sablé Strié traduit le stockage des particules dans les creux ; ces particules ne sont pas affectées par les passages du patin SRT et leur masse se stabilise.

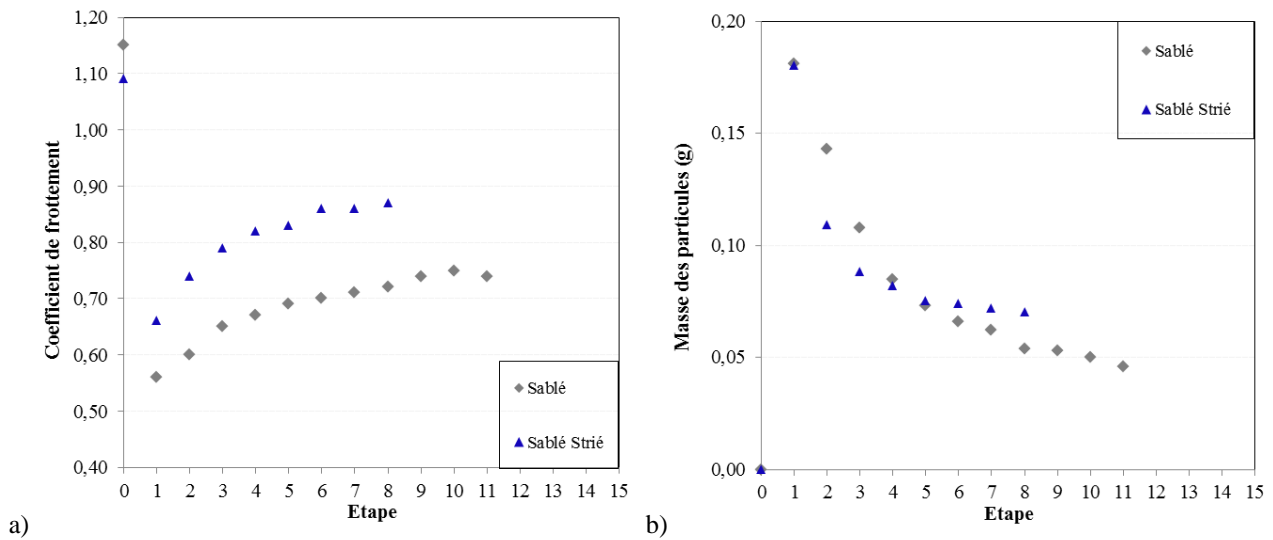


Figure 5.9 Variation du coefficient de frottement (a) et de la masse des particules (b) sur les deux surfaces d'essai (fraction 0-100 μm ; concentration 20g/m²)

L'analyse des résultats de la Figure 5.9 montre qu'il y a deux effets induits par la texture de la surface : un effet de stockage lié à la macrotecture et un effet de piégeage lié à la microtexture. Une analyse comparative des deux surfaces étudiées requiert donc un recensement des différents flux de particules à l'interface patin/surface.

5.4.1. Analyse des flux de particules

La relation entre le coefficient de frottement et la masse des particules pour les cinq fractions de taille de particules et les trois concentrations initiales des particules est présentée dans la Figure 5.10. Ces courbes révèlent la relation étroite entre le coefficient de frottement et la masse des particules présentes sur la surface de l'échantillon.

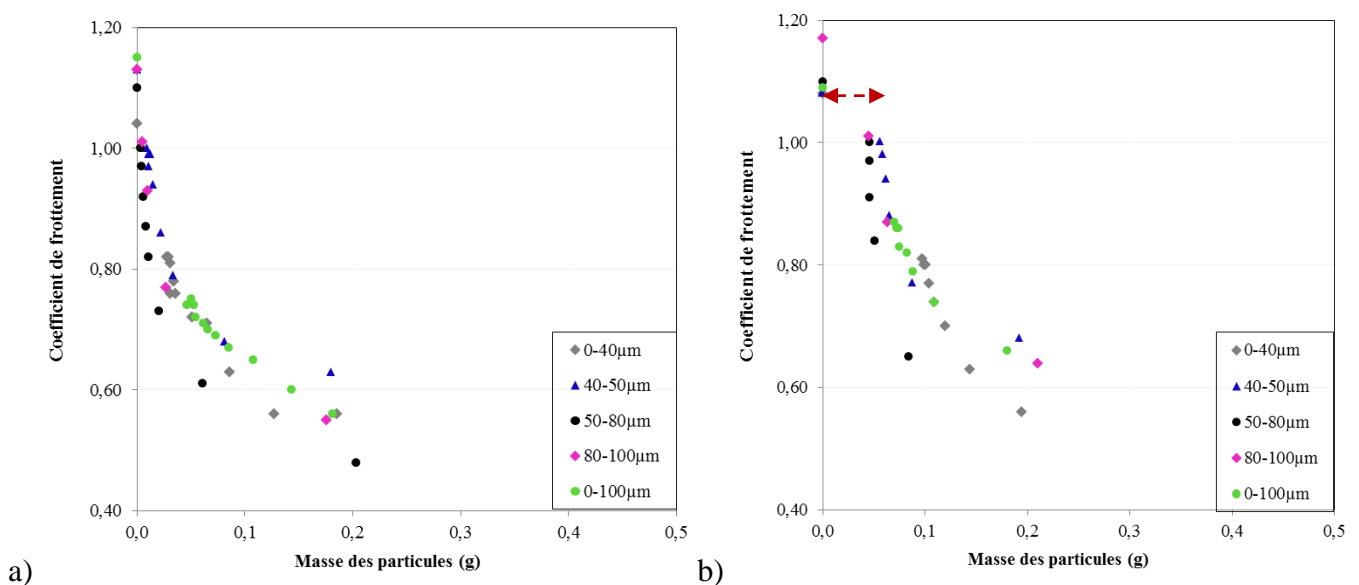


Figure 5.10 Variation du coefficient de frottement en fonctions de la masse des particules : a) Sablé ; b) Sablé Strié (fraction 0-100 μm ; concentration 20g/m²)

L'allure générale de l'évolution de coefficient de frottement est la même pour les différentes fractions de taille de particules : le coefficient de frottement diminue lorsque la masse des particules augmente. Toutes les fractions de taille des particules suivent la même courbe maîtresse. La lecture de ces courbes doit être faite de droite à gauche puisque l'essai commence par une quantité de particules qui diminue au cours du temps. Une nette augmentation du coefficient de frottement intervient en dessous d'une certaine masse des particules (la partie gauche de chaque courbe). Cette allure est également trouvée par Heshmat (1993) pour un film de poudre. Cet auteur a attribué cette élévation du coefficient de frottement à la rupture du film et à l'établissement progressif d'un contact direct entre les deux corps en contact (en considérant que la poudre est le troisième corps). Mills et al (2009) ont mentionné que lorsque la surface est rugueuse, quelques piègeages des particules peuvent être induits. Cela peut expliquer pourquoi le niveau du coefficient de frottement à la fin des essais est plus faible que celui mesuré sur une surface propre. Fillot et al (2007) ont montré avec leur modèle de troisième corps (détaillé dans chapitre 2) que les particules sont piégées par les aspérités de la surface.

En présence de la macrotexture (surface Sablé Strié, Figure 5.10b), un plateau apparaît dans la partie gauche de la courbe (présenté par la flèche rouge) dont la présence est attribuée aux creux créés par le striage. En effet, lors de chaque passage du patin SRT, une quantité de particules est éjectée dans les creux. La masse de l'échantillon mesurée lors de l'essai prend en compte, après soustraction de la masse de l'échantillon propre, les particules présentes à la surface de l'échantillon et celles stockées dans les creux. Afin de mieux illustrer ces flux de particules sur les différentes surfaces, une représentation schématique est présentée dans la Figure 5.11.

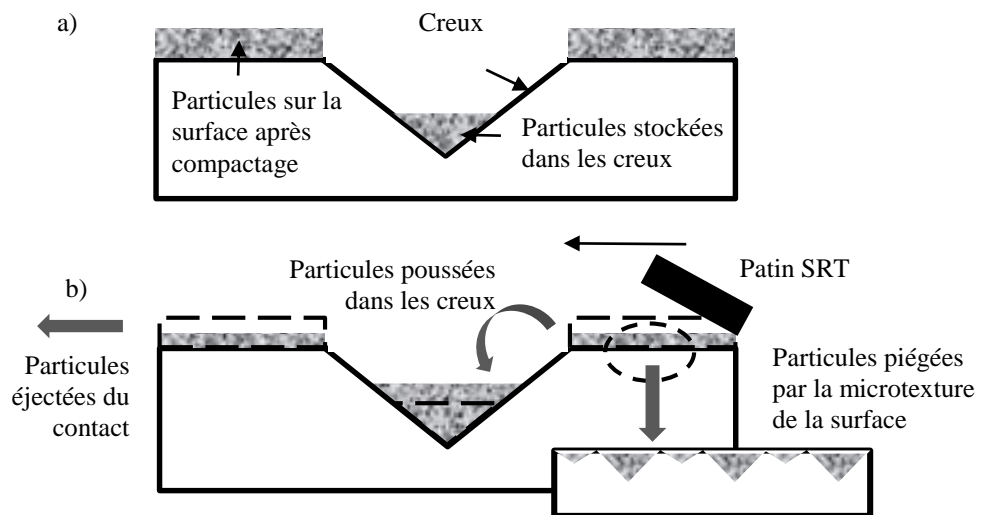


Figure 5.11 Représentation schématique des flux de particules dans le contact sur une surface avec deux échelles de la texture

Lors du compactage des particules sur la surface, une partie des particules reste sur la surface de l'échantillon et une partie est poussée dans les creux (Figure 5.11a). Lorsque le patin SRT passe, trois flux de particules sont observés (Figure 5.11b) :

- Des particules sont éjectées du contact ;
- Des particules sont piégées dans la microtexture de la surface ;
- Des particules sont éjectées dans les creux.

Parmi ces trois flux, seuls les deux premiers nous intéressent car ils affectent directement les masses mesurées lors de l'essai, sachant que la variation du coefficient de frottement en fonction de la masse des particules dépendrait uniquement des particules piégées dans la microtexture.

Une estimation de la quantité de particules stockées dans les creux est donc nécessaire. Cette estimation permet de retirer la masse de particules de la masse totale mesurée et d'éliminer l'effet de « plateau » observé dans la Figure 5.10.

5.4.2. Influence de la macrotexture sur le stockage des particules

5.4.2.1. Modélisation du flux de stockage

Un modèle a été développé pour estimer la quantité des particules qui se trouvent sur la surface de la plaque d'essai. Trois hypothèses sont émises :

- La quantité de particules chassées par le patin dans les creux représente une fraction k de la quantité de particules présentes à la surface avant le passage du patin (Figure 5.12).
- Le facteur k ($0 < k < 1$) reste constant au cours d'une série d'essais.
- La quantité de particules dans les creux à une étape (i) est égale à celle déjà présente dans les creux à l'étape ($i-1$) plus la nouvelle quantité chassée par le patin à l'étape i .

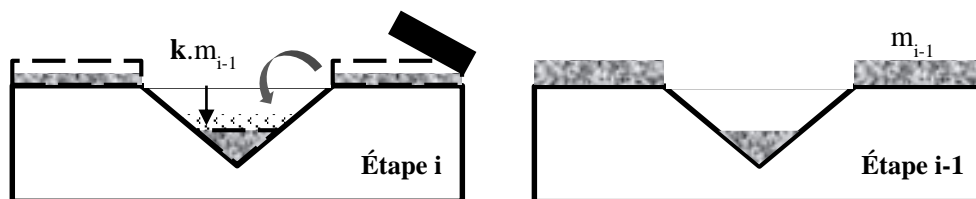


Figure 5.12 Quantité estimée de particules stockées dans les creux

A partir de ces hypothèses, les équations suivantes peuvent être écrites :

$$m_{particules,i} = m_{particules,i}^{surface} + m_{particules,i}^{creux} \quad (5.4)$$

$$m_{particules,i}^{creux} = m_{particules,i-1}^{creux} + k m_{particules,i-1}^{surface} \quad (5.5)$$

Où

$m_{particules,i}$: la masse totale des particules à l'étape (i) ;

$m_{particules,i}^{surface}$: la masse des particules sur la surface à l'étape (i) ;

$m_{particules,i}^{creux}$: la masse des particules dans les creux à l'étape (i) ;

k : la fraction des particules poussées dans les creux de la surface par le patin.

Ces équations ne sont valides qu'à partir de l'étape 2. A l'étape 1, on suppose que la quantité de particules dans les creux est une fraction de la quantité totale de particules, aussi représentée par le facteur k ; l'équation est donc :

$$m_{particules,1}^{creux} = k m_{particules,1} \quad (5.6)$$

Il est possible maintenant d'estimer la quantité de particules stockées dans les creux par le compactage à l'étape 1 avec l'équation (5.6) et de déduire celle présente sur la surface à partir de la quantité totale des particules à l'étape 1 à l'aide de l'équation (5.4). Ces quantités sont ensuite utilisées pour estimer la quantité des particules stockées dans les creux à l'étape 2 via l'équation (5.5) à partir de laquelle la quantité des particules en surface à l'étape 2 est déduite. Le même raisonnement est appliqué aux étapes suivantes.

Le facteur k peut être déterminé en se référant aux résultats trouvés sur la surface Sablé. En effet, comme la microtexture de la surface Sablé est similaire à celle de la surface Sablé Strié (S_q est respectivement égal à $13,9\mu\text{m}$ et $13,6\mu\text{m}$), le coefficient de frottement devrait suivre la même relation avec la masse des particules pour les deux surfaces. Cette hypothèse nous permettra de déterminer le facteur k .

D'après les résultats expérimentaux, l'évolution du coefficient de frottement avec la masse des particules en surface de la plaque Sablé suit une courbe de type puissance :

$$\mu_i = a \left(m_{particules,i}^{surface} \right)^{-b} \quad (5.7)$$

Où $m_{particules,i}^{surface}$ est la masse des particules en surface, a et b sont des paramètres à déterminer par ajustement pour chaque fraction de taille et chaque concentration initiale des particules.

En présence des creux, l'aire de contact est différente d'une surface à une autre. Il est donc nécessaire d'introduire un facteur qui représente la fraction de la surface apparente de contact par rapport à la surface totale de la plaque, qu'on appelle « f_s ». L'évolution du frottement en fonction de la masse est représentée par l'équation suivante :

$$\mu_i = a \left(m_{particules,i}^{surface} \times f_s \right)^{-b} \quad (5.8)$$

La valeur du facteur f_s est déterminée à partir des cartographies réalisées sur la surface de chaque plaque d'essai. Ces cartographies sont obtenues avec un grossissement $\times 5$ de l'appareil Alicona (voir 4.4.2 pour les résolutions) et correspondent à des zones de mesure de $50\text{mm} \times 70\text{mm}$.

A l'aide du logiciel MountainsMap®, les cartographies brutes sont traitées (la méthode de traitement est présentée en annexe B). Afin de mesurer l'aire de contact touchée par le patin, les surfaces sont seuillées à 0,3 mm en profondeur à partir du point le plus haut de la surface. Cette valeur correspond à la profondeur de l'enfoncement de la gomme dans les aspérités de la surface (Popov et al., 2014). L'aire de contact de chaque surface, représentée par l'aire projetée sur MountainsMap®, est montrée dans la Figure 5.13.

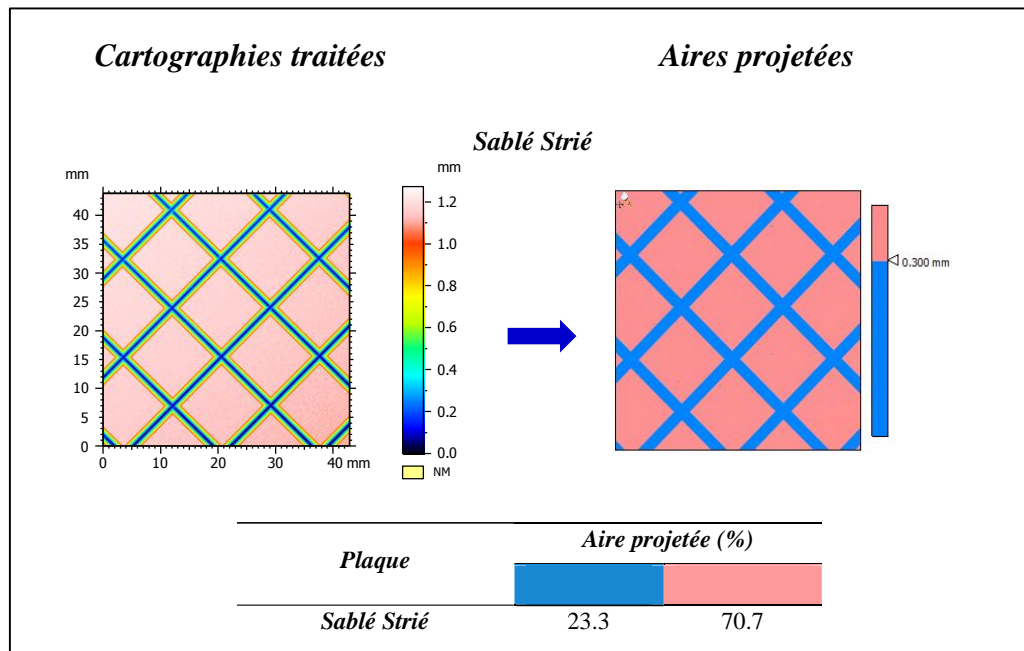


Figure 5.13 Aire de contact pour la surface Sablé Strié

Les valeurs de f_s sont données dans le tableau 5.1. La surface Sablé présente un f_s égale à 1 puisque la surface de contact est égale à la surface totale de la plaque. Pour la surface Sablé Strié, f_s correspond au pourcentage de la partie « rose » de l'aire projetée.

Tableau 5.1 Valeurs de f_s

<i>Plaque</i>	f_s
Sablé	1
Sablé Strié	0,71

Le facteur k des équations (5.5) et (5.6) est estimé en superposant les deux courbes de frottement en fonction de la masse des particules. La méthode de superposition est réalisée en ajustant les paramètres a et b trouvés sur la plaque Sablé.

5.4.2.2. Interactions entre le flux de stockage et les caractéristiques des particules

La Figure 5.14 montre les résultats de la variation du coefficient de frottement avec la masse des particules avant et après correction. L'exemple est montré pour la concentration initiale de 20g/m^2 .

On observe que les points (mesurés et calculés) se superposent après correction de la masse. Cela démontre la pertinence du modèle utilisé pour estimer la quantité de particules éjectées dans les creux.

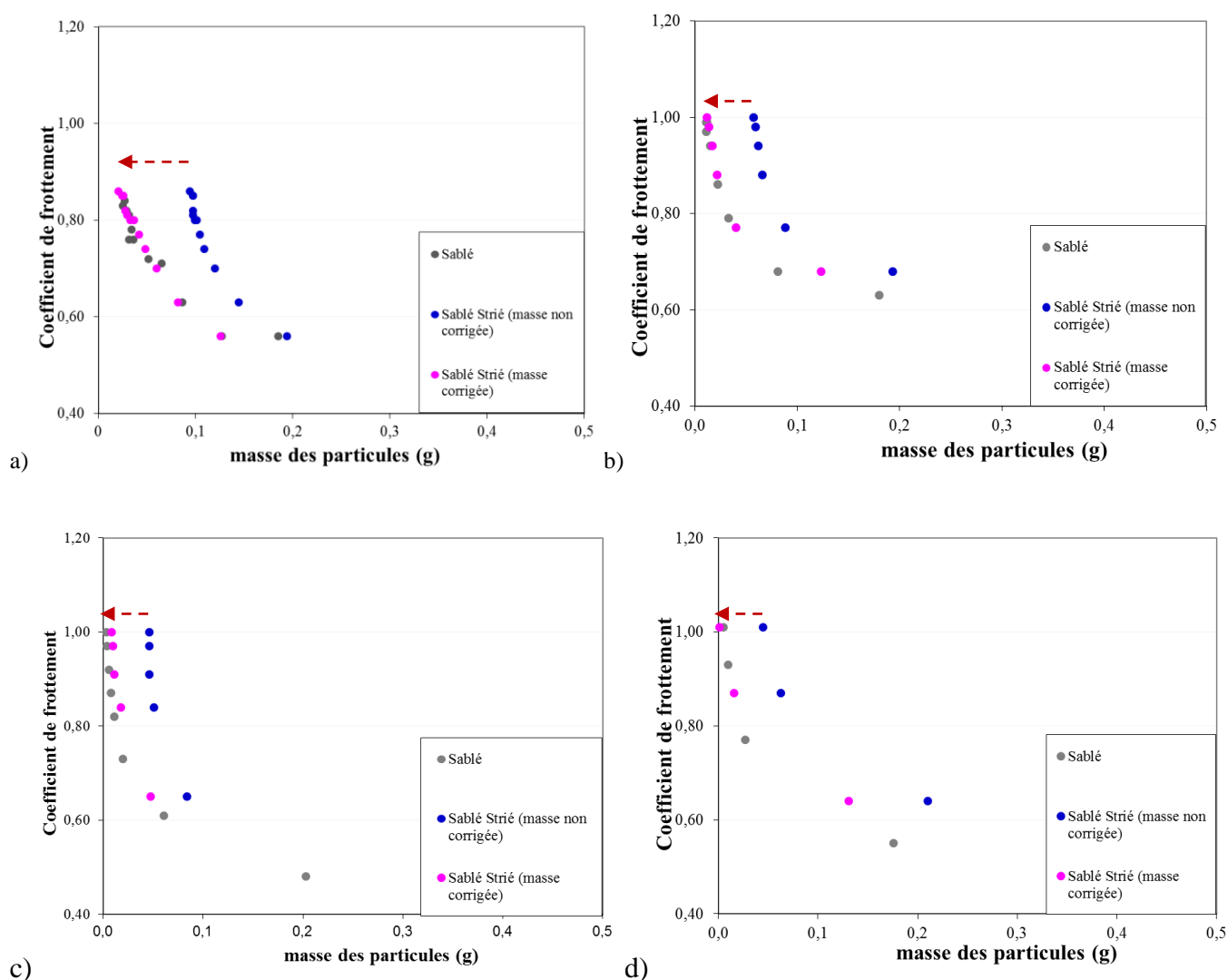


Figure 5.14 plaque Sablé Strié : a) 0-40µm b) 40-50µm c) 50-80µm et d) 80-100µm (concentration 20 g/m^2)

Les valeurs ajustées de k pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations initiales des particules sont données dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 Les valeurs de k pour toutes les fractions de taille et concentration des particules

<i>Fraction</i>	<i>Concentration</i>		
	<i>10 g/m²</i>	<i>20 g/m²</i>	<i>40 g/m²</i>
0-40 μm	0,10	0,09	0,17
40-50 μm	0,10	0,1	0,2
50-80 μm	0,18	0,2	0,22
80-100 μm	0,35	0,12	0,35
0-100 μm	0,09	0,1	0,14

La variation du coefficient k par rapport à la taille et la concentration initiale des particules est visible sur la Figure 5.15. Si on exclut la valeur de k pour la fraction 80-100 μm et la concentration initiale 20 g/m² (considérée comme une valeur non cohérente), on peut dire que la valeur de k est plus importante quand les particules ont une taille plus importante. Cela veut dire que les particules grossières sont plus susceptibles d'être éjectées par le passage de patin. Nos observations confirment celles de Mills et al (2009). En effet, ces auteurs ont trouvé que les particules de taille inférieure à 50 μm ont tendance à s'agglomérer par des forces cohésives, ce qui explique le fait que ces particules s'éjectent moins facilement sous l'effet du patin. Les particules grossières (taille > 55 μm) ont tendance à rouler les unes sur les autres et peuvent être chassées plus facilement. Ces mécanismes trouvés par Mills et al (2009) expliqueraient les valeurs de k trouvées dans cette thèse.

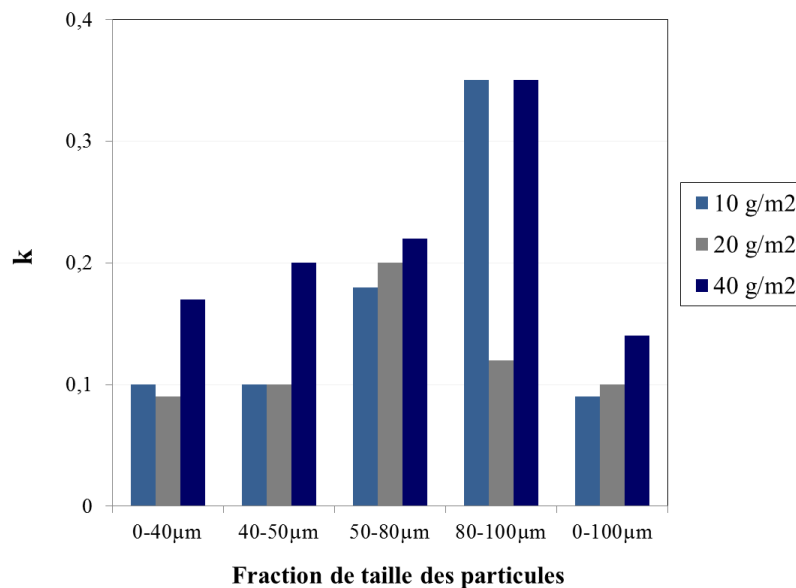


Figure 5.15 Variation du facteur k pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations des particules

Par rapport à la concentration initiale des particules, la valeur de k est légèrement plus importante quand la concentration initiale des particules est plus importante. Pour les fractions de taille 0-40, 40-50 et 0-100 μm , la valeur de k est plus importante pour la concentration de particules 40g/m² que pour les concentrations des particules 10 et 20g/m². On suppose, dans ce cas, qu'il y a un surplus de particules qui est chassé par le patin, ce qui expliquerait une valeur de k plus élevée. Dans le cas des concentrations des particules 10 et 20g/m², les particules sont plus susceptibles d'être piégées dans la microtexture. Pour les fractions grossières (50-80 et 80-100 μm), c'est le

mécanisme de roulement qui prédomine ; quelle que soit la concentration des particules mises sur la surface, la fraction des particules éjectées serait importante.

5.4.3. Influence de la microtexture sur le piégeage des particules

Après avoir corrigé la masse des particules en séparant celles stockées par la macrotexture de la surface du reste, il est maintenant possible d'étudier l'effet de piégeage des particules et son impact sur le frottement. La variation du coefficient de frottement en fonction de la masse des particules en surface (mesurée dans le cas de la plaque Sablé et estimée dans le cas de la plaque Sablé Strié) est présentée dans la Figure 5.16.

En regroupant tous les résultats trouvés pour chaque surface sur le même graphe, on constate que la tendance générale est la même pour les différentes fractions de taille de particules et les différentes concentrations initiales des particules : le coefficient de frottement diminue lorsque la masse des particules augmente. Quelques dispersions peuvent être observées, principalement lorsque la masse des particules est importante.

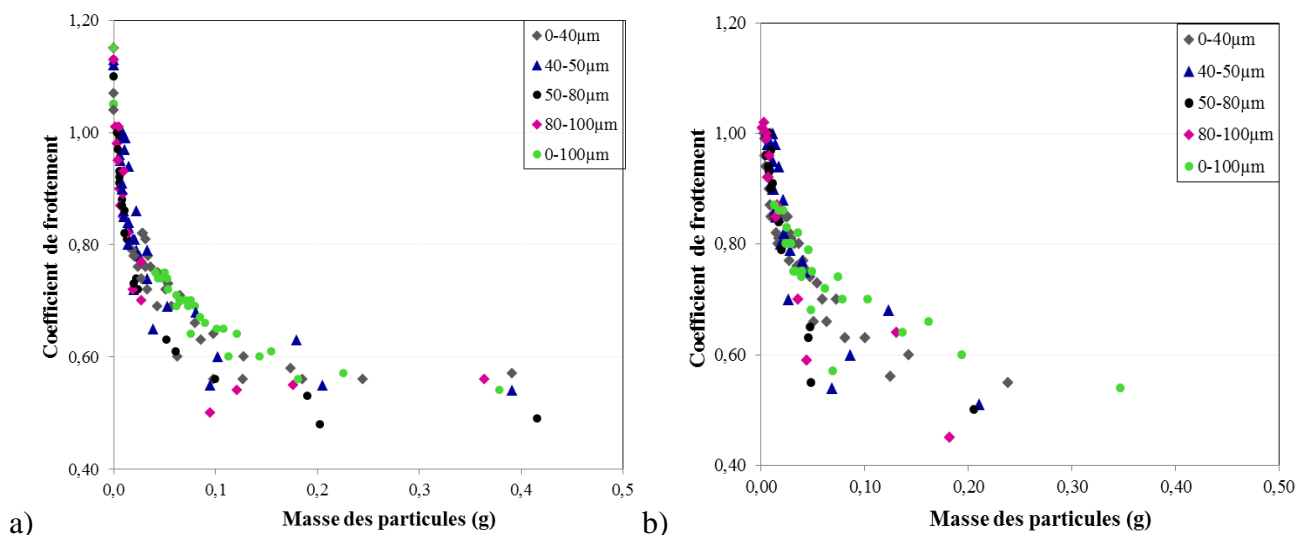


Figure 5.16 Variations du coefficient de frottement en fonctions de la masse des particules pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations initiales des particules : a) Sablé ; b) Sablé Strié

Le phénomène de piégeage des particules a été observé par les mesures de masse déjà présentées. Il est clair que ce phénomène est lié à la taille des particules et à la microtexture de la surface. Pour étudier les particules piégées dans la microtexture, deux approches sont utilisées :

- Estimer les particules piégées à partir de la masse des particules à la fin de chaque série d'essai.
- Estimer les particules piégées à partir du volume de vides de la surface de la plaque.

5.4.3.1. Analyse des masses de particules résiduelles

La masse des particules mesurée à la fin de chaque série d'essais sur la surface d'aluminium grenillée est présentée dans la Figure 5.17. Chaque barre représente la moyenne des trois dernières pesées d'une série d'essais (dans le protocole d'essais, les mesures sont arrêtées quand la différence entre trois mesures consécutives de coefficient de frottement ne dépasse pas $\pm 0,01$).

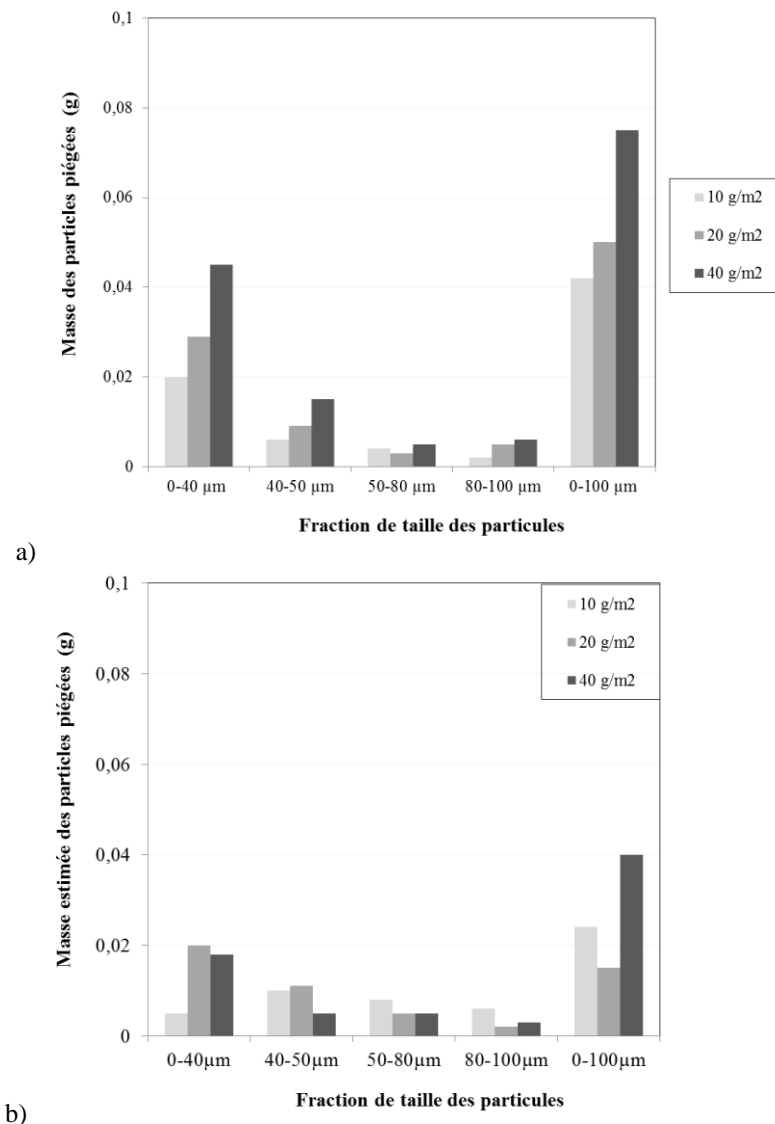


Figure 5.17 Masse des particules mesurée à la fin de chaque série d'essais : a) Sablé ; b) Sablé Strié

Le piégeage des particules dépend de la fraction de la taille et de la concentration des particules. Pour une fraction de taille donnée, une concentration élevée des particules génère une quantité de particules piégées plus importante. Ce résultat révèle le fait qu'une stabilisation du coefficient de frottement ne signifie pas une saturation des aspérités de la surface (où les particules sont piégées) ; sinon, la quantité finale des particules devrait être la même indépendamment de la concentration initiale. Une stabilisation du coefficient de frottement signifie donc simplement que les particules ne sont plus éjectées de l'aire de contact entre le patin et la surface d'essai.

Par rapport à la taille des particules, on observe que les fractions fines génèrent la quantité de particules piégées la plus importante. Ce constat donne une explication du niveau de coefficient de frottement observé dans la partie 5.3.1. Le frottement est rapidement remonté pour les fractions

grossières et atteint une valeur proche de celle d'une surface propre puisqu'il ne reste plus de particules sur la surface. A l'inverse, les particules fines s'accumulent sur la surface et continuent à lubrifier l'interface patin/plaque ; le frottement se stabilise par la suite à une valeur plus faible que celle d'une surface propre.

Le fait qu'il y a plus de particules piégées pour la fraction de taille de 0-100 μm (comparée à la fraction 0-40 μm) montre qu'il y aurait un autre mécanisme de piégeage. En effet, le piégeage ne signifie pas seulement un remplissage des creux de la surface. Il peut y avoir un blocage mécanique des particules qui empêche le roulement des particules entre elles. Ce mécanisme est plus adapté pour les particules fines (entre 50-60 μm d'après Mills et al (2009)), qui sont plus denses (moins de vide entre les particules) et probablement pour une distribution de taille des particules étalée (comme celle de 0-100 μm) où les particules fines occupent les espaces entre les particules grossières et génèrent une densité de particules plus importante.

5.4.3.2. Analyses des volumes de vides

La deuxième approche d'estimation consiste à quantifier les particules piégées dans les creux de texture de la surface en se référant aux paramètres de volumes de la courbe d'Abbott. Le schéma suivant explique les différents paramètres utilisés (Figure 5.18).

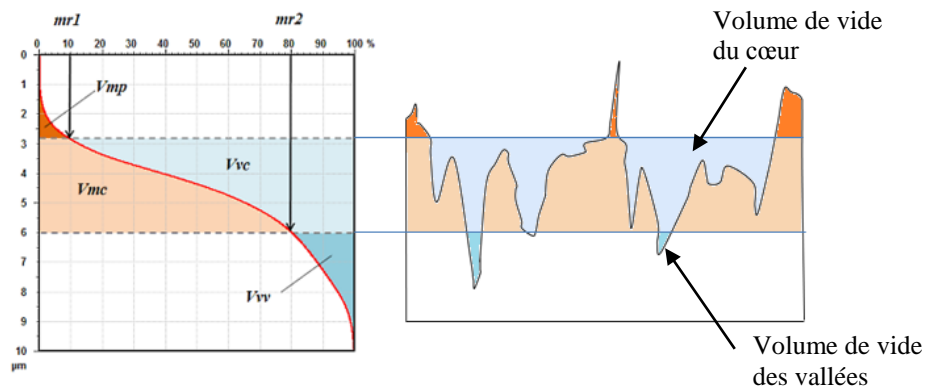


Figure 5.18 Schéma représentatif des paramètres de volumes avec la courbe d'Abbott

Les paramètres utilisés sont le V_{vc} (le volume de vide du cœur) et le V_{vv} (le volume de vide des vallées). Ces paramètres sont calculés par défaut avec des seuils de taux de portance à 10% et 80% de la courbe d'Abbott extraites à partir d'une cartographie de la surface de l'échantillon propre (présentés dans le Tableau 4.3 Chapitre 4). La somme de V_{vv} et V_{vc} représenterait le volume de particules piégées dans tous les creux de la surface.

Les paramètres de volumes sont extraits du Tableau 4.3 (Chapitre 4). Ces paramètres, le V_{vc} et le V_{vv} , sont convertis du ml au mm^3 et ensuite multipliés par la surface totale de contact. La surface totale de contact est de $0,0104\text{m}^2$ ($130\text{mm} \times 80\text{mm}$), qui représente la surface de chaque plaque, multipliée par la fraction de la surface de contact f_s de chaque plaque présentée dans le Tableau 5.1.

Une fois le volume de vides total de chaque plaque ($V_{vv}+V_{vc}$) et le volume de vides des vallées (V_{vv}) calculés, la masse de particules nécessaire pour remplir les vides est calculée en multipliant ces volumes par la masse volumique des particules. Dans nos expérimentations, seules les densités des particules fines de Cheviré (fractions 0-40 μm et 40-50 μm) sont mesurées : elles présentent des valeurs similaires ($2,52 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ et $2,55 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$). On peut donc considérer que la moyenne de ces deux valeurs donne une densité moyenne des particules de Cheviré. Les résultats trouvés sont présentés dans le Tableau 5.3. Les masses correspondant aux seuils $V_{vv}+V_{vc}$ et V_{vv} sont ensuite injectées dans le graphe de la variation du coefficient de frottement en fonction de la masse des particules pour chaque surface (Figure 5.19 et Figure 5.20).

Tableau 5.3 Valeurs la masse calculée

<i>Plaque</i>	<i>masse des particules (g) en considérant $V_{vv}+V_{vc}$</i>	<i>masse des particules (g) en considérant V_{vv}</i>
Sablé	0,443	0,046
Sablé Strié	0,31	0,032

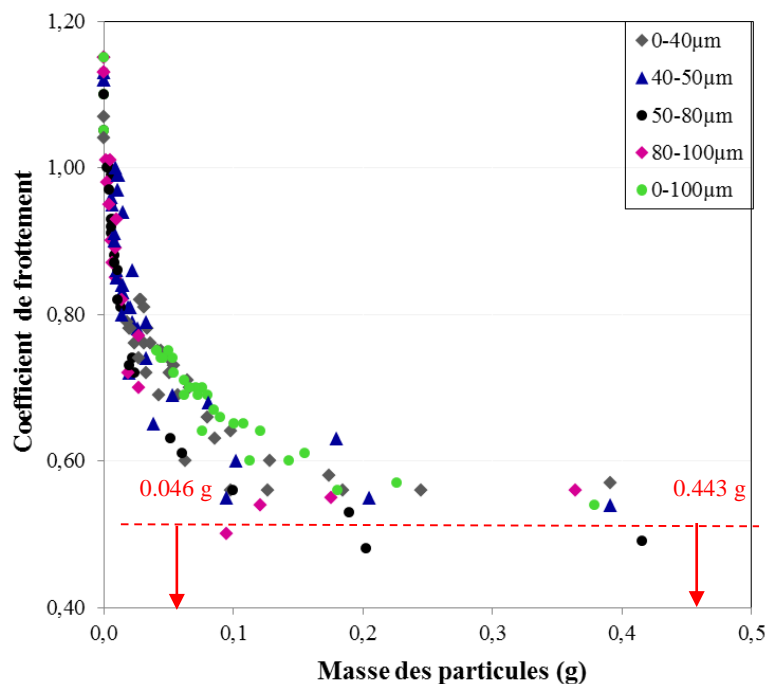


Figure 5.19 Variation du coefficient de frottement en fonctions de la masse des particules sur la surface Sablé (toutes fractions de taille et toutes concentrations initiales des particules)

La Figure 5.19 donne un autre éclairage sur la relation entre le frottement et la masse des particules. Quand la masse des particules est inférieure à 0,443g, le coefficient de frottement commence à s'accroître par rapport à une valeur qui correspond à μ_{\min} (ligne horizontale à $\mu = 0,54$). La dispersion observée des points sur la moitié droite de la courbe est peut-être liée à la répartition des particules sur la surface qui pourrait être non homogène. Dès que la masse des particules devient inférieure à 0,046 g, l'accroissement du coefficient de frottement s'intensifie et la dispersion n'est plus visible. On peut considérer que quand la quantité de particules est plus faible que celle des particules piégées par les creux de la surface (seuil de 0,443g), un contact

direct commence à s'établir entre le patin et les aspérités de la surface et donc le coefficient de frottement devient supérieur à μ_{\min} . Quand les particules sont retenues dans les vallées les plus profondes (masse < 0,046 g), on peut considérer que le contact direct entre le patin et la plaque s'étend sur toute la surface de la plaque.

Les masses de particules présentées dans la Figure 5.19 montrent que les particules sont probablement piégées dans les vallées les plus profondes de la surface. Les particules les moins piégées sont des fractions de 40-50 μm , 50-80 μm et 80-100 μm , ce qui signifierait que ces particules sont plus grandes que les dimensions des vallées de la surface et donc seulement une petite partie d'entre elles peut être piégée.

Les mêmes tendances sont trouvées sur la plaque Sablé Strié (Figure 5.20). La remontée du coefficient de frottement est plus marquée quand la masse des particules devient plus faible que 0,032 g et la dispersion n'est plus visible.

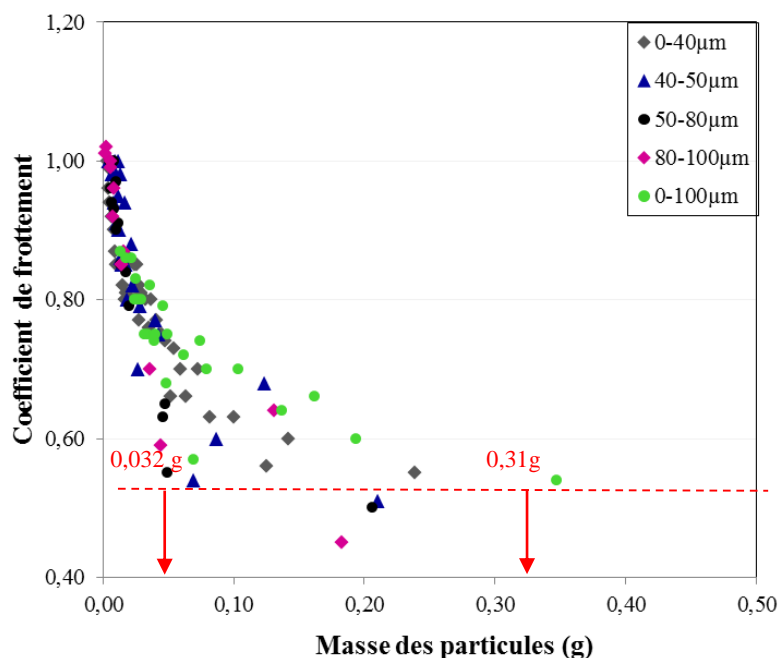


Figure 5.20 Variation du coefficient de frottement en fonctions de la masse estimée des particules sur la surface Sablé Strié (toutes fractions de taille et toutes concentrations initiales des particules)

5.5. Conclusions

Dans ce chapitre, les résultats du plan d'expérience à sec ont été présentés. Ce plan d'expérience comporte deux surfaces (Sablé avec uniquement la microtexture ; Sablé Strié avec la micro- et la macrotexture), trois concentrations initiales de particules (10 ; 20 ; 40g/m²) et cinq fractions de taille (0-40 ; 40-50 ; 50-80 ; 80-100 ; 0-100 μm). Les mesures de frottement au pendule SRT sont accompagnées de pesées des échantillons propres/contaminés avant/après la mesure de frottement. Une méthode de calcul de masse, négligeant la perte de matière du patin de frottement et de l'échantillon, permet d'extraire des pesées la masse des particules présentes sur la surface des échantillons.

En termes de comportement, on a vu que le coefficient de frottement part d'un minimum μ_{\min} correspondant à la surface après le dépôt des particules et remonte avec les passages du patin SRT avant d'atteindre une valeur stable μ_{stab} . Les passages du patin induisent une diminution de la masse des particules ; cette variation est similaire à celle du coefficient de frottement mais en sens inverse.

Lorsqu'on regarde la tendance générale décrite ci-dessus en fonction des caractéristiques des particules, on voit que lorsque la taille des particules augmente, la remontée (resp. la diminution) du coefficient de frottement (resp. de la masse des particules) est plus rapide. L'influence de la concentration des particules est moins visible avec néanmoins une variation plus lente (remontée du coefficient de frottement ou diminution de la masse des particules) pour la concentration 40g/m². Si le μ_{\min} ne semble pas dépendre des caractéristiques des particules, le μ_{stab} augmente avec la taille des particules ; en particulier, μ_{stab} pour les fractions 0-40 μm et 0-100 μm reste inférieur au coefficient de frottement d'une surface propre μ_{propre} alors que les deux coefficients de frottement sont égaux pour la fraction 80-100 μm .

Le graphe coefficient de frottement – masse des particules montre l'existence d'une courbe maitresse indiquant une diminution du frottement lorsque la masse augmente pour toutes les tailles et concentrations de particules. Il y a cependant une différence entre les deux surfaces étudiées : pour l'échantillon Sablé Strié, on a noté un décalage de la courbe maitresse suivant l'axe des masses indiquant une plage de valeurs de la masse où le coefficient de frottement ne varie pas. Ce seuil est attribué au stockage des particules dans les creux de l'échantillon Sablé Strié ; ces particules ne participent pas au contact avec le patin et donc leur présence n'induit pas de variation du coefficient de frottement. Un modèle a été proposé pour séparer, à partir d'une masse totale de particules, les particules stockées dans les creux de celles restant sur la surface. En analysant les graphes coefficient de frottement – masse de particules présentes sur la surface (masse corrigée pour l'échantillon Sablé Strié), on peut identifier deux seuils correspondant respectivement à un recouvrement complet de la surface par des particules, où le coefficient de frottement atteint une asymptote basse, et un rétablissement du contact direct entre le patin et la surface, où le coefficient de frottement croît rapidement. Les deux seuils peuvent être déterminés à partir du volume des vides de la microtexture de surface.

Les analyses ci-dessus ont permis de faire des hypothèses sur les mécanismes de frottement sur une surface contaminée par des particules. Si on exclut les particules stockées par la macrotexture, on pourrait dire qu'il y a deux mécanismes impliqués pendant le passage du patin de frottement : une éjection des particules de la surface et un blocage des particules par la microtexture. En fonction de la taille et de la concentration initiale, le blocage peut induire un cisaillement dans le film de particules ou un roulement du patin sur les particules. Les particules les plus fines (de l'ordre de 20 μm dans cette étude) peuvent être piégées dans les vallées de la surface et continueraient à lubrifier l'interface patin/surface ; ce piégeage expliquerait une valeur stable du coefficient de frottement (après plusieurs passages du patin) qui reste inférieur à ce qu'on obtient sur une surface propre. Pour vérifier les hypothèses émises, des observations visuelles de l'interface ont été envisagées ; c'est l'objet du chapitre 6.

Chapitre 6

Phase de dépôt - Comportement des particules à l'interface

Plan du chapitre

6.1.	Introduction	118
6.2.	Comportement microscopique des particules	118
6.2.1.	Observations des particules piégées par la texture.....	118
6.2.2.	Observation des particules éjectées sur les pastilles	129
6.3.	Comportement dynamique des particules.....	138
6.3.1.	Suivi d'une seule particule.....	139
6.3.2.	Suivi d'un ensemble de particules naturelles	142
6.4.	Conclusions	145

6.1. Introduction

Après avoir discuté des résultats expérimentaux obtenus lors des essais de frottement dans le chapitre 5, il est nécessaire de corrélérer l'évolution du frottement aux phénomènes physiques établis pour les particules solides à l'interface. L'enjeu principal lors de l'étude du frottement pneu / chaussée contaminée est la connaissance du comportement des particules dans la zone de contact : comment circulent-elles et quelles sont leurs interactions avec la texture de la surface ?

Dans ce chapitre, une double approche basée sur des observations visuelles a été développée. Dans un premier temps, il s'agit de répéter le protocole d'essais de frottement du chapitre 5 et d'y ajouter des observations au microscope électronique à balayage (MEB). Nous cherchons essentiellement à approfondir l'analyse de l'effet de piégeage par la microtexture discuté au paragraphe 5.4.3. En effet, des hypothèses ont été faites notamment sur l'existence de « poches » qui piègent les particules et le rôle de la taille des particules sur le remplissage de ces poches ; un examen des surfaces devrait apporter des éclaircissements sur ces questions. Nous pensons aussi que, même si les particules éjectées ne sont pas prises en compte dans les analyses de frottement, une connaissance de ce flux et de la distribution des particules éjectées fournirait aussi un complément d'information pour l'analyse des conditions de contact.

L'examen au MEB étant statique, nous avons voulu le compléter dans un deuxième temps par des observations dynamiques du mouvement des particules à l'interface. L'usage d'une caméra rapide a donc été introduit pour recueillir, sur quelques configurations d'essais, des informations sur la cinétique des particules.

6.2. Observations à l'échelle microscopique

Les observations des particules en surface sont réalisées sur une zone au milieu de la plaque (avec un grossissement $\times 70$, cette zone fait $1.8\text{mm} \times 1.2\text{mm}$). Il faut noter que sur les images MEB des surfaces contaminées, le sens de passage du patin avant chaque observation est orienté de gauche à droite sur l'image (contrairement aux observations à la caméra rapide). Le protocole d'observation est présenté dans le chapitre 4 (partie 4.9).

6.2.1. Observations des particules piégées par la texture

Afin d'avoir un état de référence, la surface de l'échantillon est observée à l'état propre après la première mesure de SRT. Chaque photo présentée dans la Figure 6.1 représente la zone de la surface d'aluminium grenillée qui sera suivie pendant les essais réalisés sur respectivement les quatre fractions de taille des particules. La même plaque d'essai est utilisée respectivement pour les fractions de taille $0-40\mu\text{m}$, $40-50\mu\text{m}$, $50-80\mu\text{m}$, $80-100\mu\text{m}$ et $0-100\mu\text{m}$ avec un nettoyage après chaque série d'essai.

Etape 0 : plaque propre

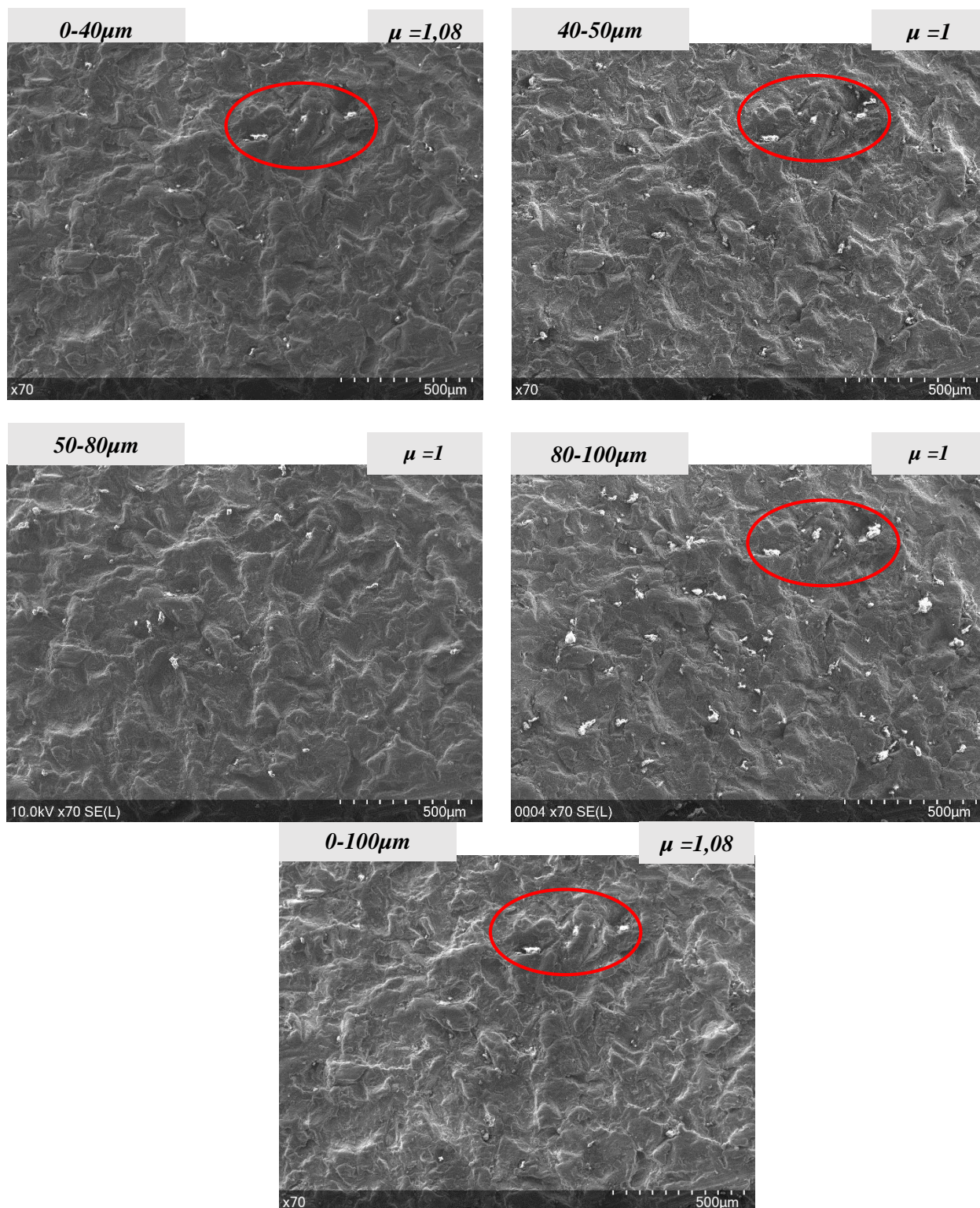


Figure 6.1 Images MEB : surfaces propres observées avant les essais avec les quatre fractions de taille des particules

Il est constaté que la plaque d'aluminium utilisée lors des essais contient déjà quelques particules à l'état propre. En effet, la plaque a été nettoyée dans un bac à ultrasons pendant 5 minutes puis séchée avant chaque série d'essai. Après plusieurs séries d'essai et plusieurs nettoyages de la plaque, il est observé que certaines particules restent accrochées dans les mêmes creux. D'après les analyses EDX pratiquées sur ces zones, ces particules sont des particules de Chevire et quelques morceaux de gomme provenant probablement du patin du SRT (Figure 6.2).

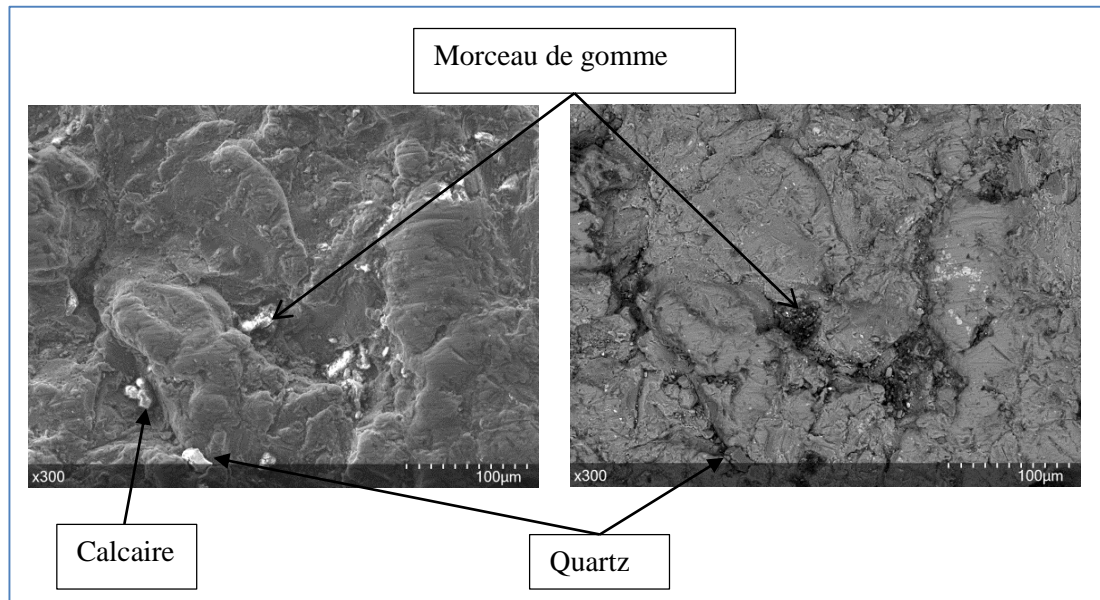


Figure 6.2 Particules piégées dans les aspérités de la surface en état propre : a) observation en SE b) observation en BSE

Sur certaines images présentées en SE, il est observé que les particules ont une couleur claire. En effet, les particules de Chevire sont peu conductrices. De ce fait, les électrons s'accumulent sur la surface de ces particules et ne s'évacuent pas. Cela provoque une surbrillance qui gêne l'observation. Les zones sombres en mode BSE présentent parfois des corps contenant des éléments "légers" comme le carbone, c'est le cas des morceaux de gomme. Cependant, dans la majorité des cas, c'est un effet lié à la profondeur des creux qu'on appelle "effet d'ombrage". En effet, le détecteur étant monté latéralement par rapport au faisceau incident sur le microscope, toutes les parties de l'échantillon ne le "voient" pas sous le même angle. La probabilité pour les électrons d'atteindre le collecteur est plus faible pour les parties "à l'ombre". En conséquence, les irrégularités de surface apparaîtront plus ou moins brillantes avec les électrons secondaires et plus sombres avec les électrons rétrodiffusés. Travaillant avec une tension faible (15 kV), ce qui nous permet de faire des analyses EDX en parallèle, ces phénomènes se rencontrent plus fréquemment.

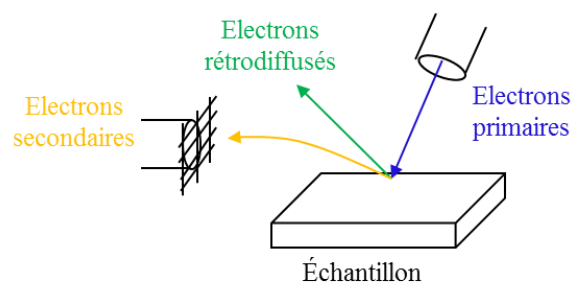


Figure 6.3 Réponses des électrons secondaires et rétrodiffusés suite à l'interaction d'un faisceau d'électrons avec la surface d'un échantillon

Dans les figures qui suivent, il a été choisi de présenter avec un même grossissement ($\times 70$) la même zone de la surface en SE (électrons secondaires) pour les quatre essais correspondant aux quatre fractions de tailles (les images présentées dans la partie haute de chaque figure). Ces observations mettent en évidence à faible grossissement l'arrangement local des particules par rapport au relief de la surface. En dessous de chaque image, un grossissement plus important ($\times 300$) de celle-ci est présenté en mode BSE (électrons rétrodiffusés). Cela nous donne une vision des différents types des particules.

Après le dépôt et le compactage des particules sur la surface de l'échantillon (Figure 6.4), on observe que les particules ne semblent pas être compactées (ou déformées). De plus, elles ne forment pas un film continu sur la surface. Les différents passages du rouleau de compactage permettent donc une redistribution de ces particules sur la surface de l'échantillon. La répartition des particules sur la zone d'observation selon la taille est visible. Les particules des fractions 0-40 μm et 0-100 μm « s'étalent » sur la surface d'une manière similaire. Cette similarité peut s'expliquer par le fait que la fraction 0-100 μm contient environ 60% de particules de taille inférieure à 40 μm et seulement 15% des particules de taille supérieure à 80 μm (Figure 4.5 chapitre 4). Les particules des fractions de taille de 40-50 μm , 50-80 μm et 80-100 μm semblent être en surépaisseur par rapport aux aspérités de la surface (Images en SE Figure 6.4). Les particules de la fraction 80-100 μm sont de taille très importante et pour une même masse de particules répandue sur la surface d'essai, le nombre de particules est plus faible que celui des particules de la fraction 40-50 μm .

Après le premier passage du patin (Figure 6.5), quelques particules grossières sont éjectées et des amas des particules restent accrochés à la surface de l'échantillon. Les particules qui restent sur la zone observée ont des tailles qui varient de quelques microns à 36 μm où les plus fines ($< 20\mu\text{m}$) sont étalées sur la surface. Comme dans le cas de la fraction 0-100 μm , une quantité relativement importante des particules de la fraction 0-40 μm reste accrochée par la texture après le premier passage du patin (Figure 6.5). Dans le cas des particules les plus grosses (40-50 μm , 50-80 μm et 80-100 μm), une grande proportion n'est plus observée sur la plaque. Les particules des fractions 50-80 μm et 80-100 μm sont éjectées rapidement dès le premier passage.

Etape 0 : Après compactage avant mesure SRT

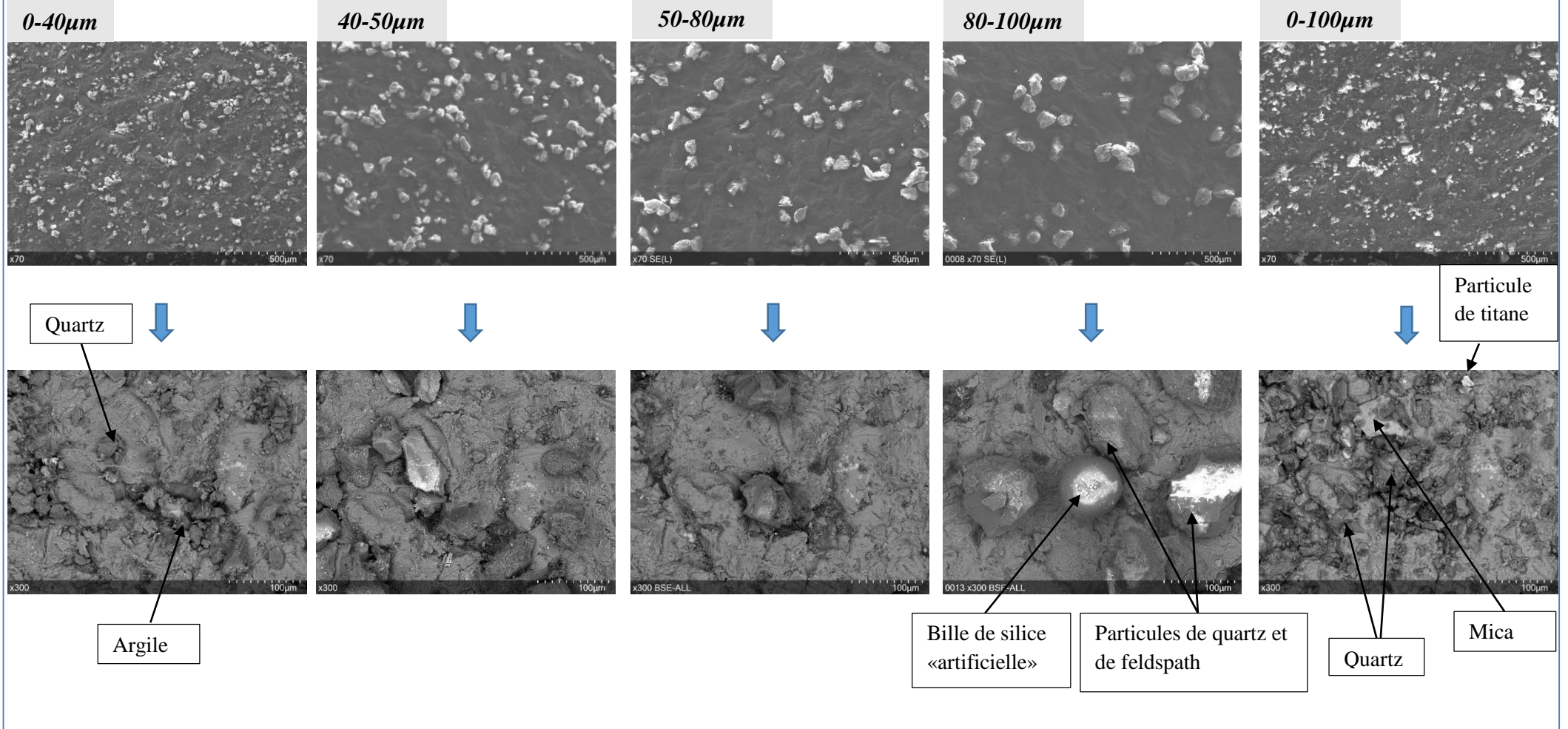


Figure 6.4 Images MEB : surfaces après contamination et compactage

Etape 1: Après 1 mesure SRT

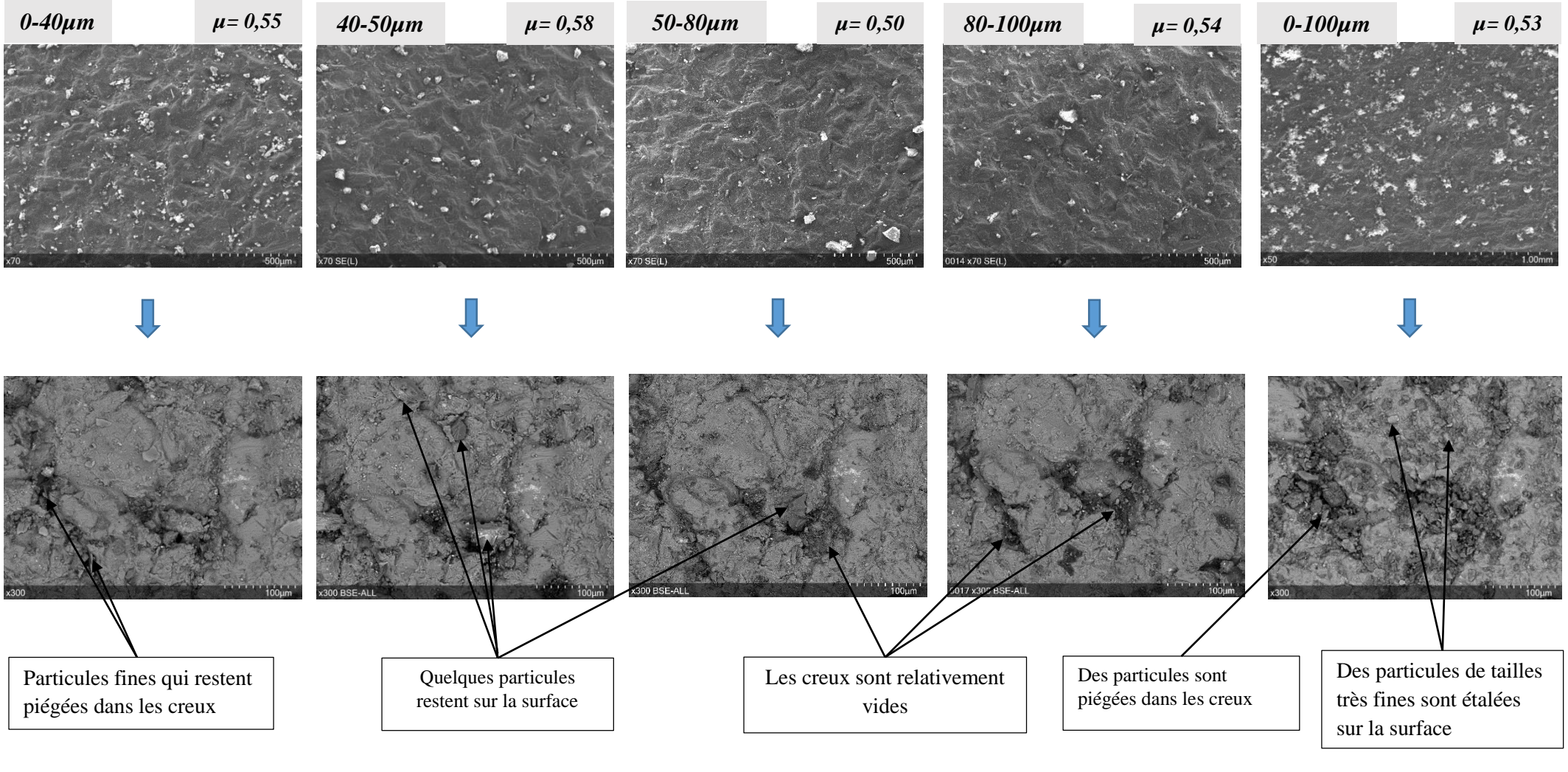


Figure 6.5 Images MEB : surfaces après la 1^{ère} mesure SRT

Etape intermédiaire : Après 3 mesures SRT

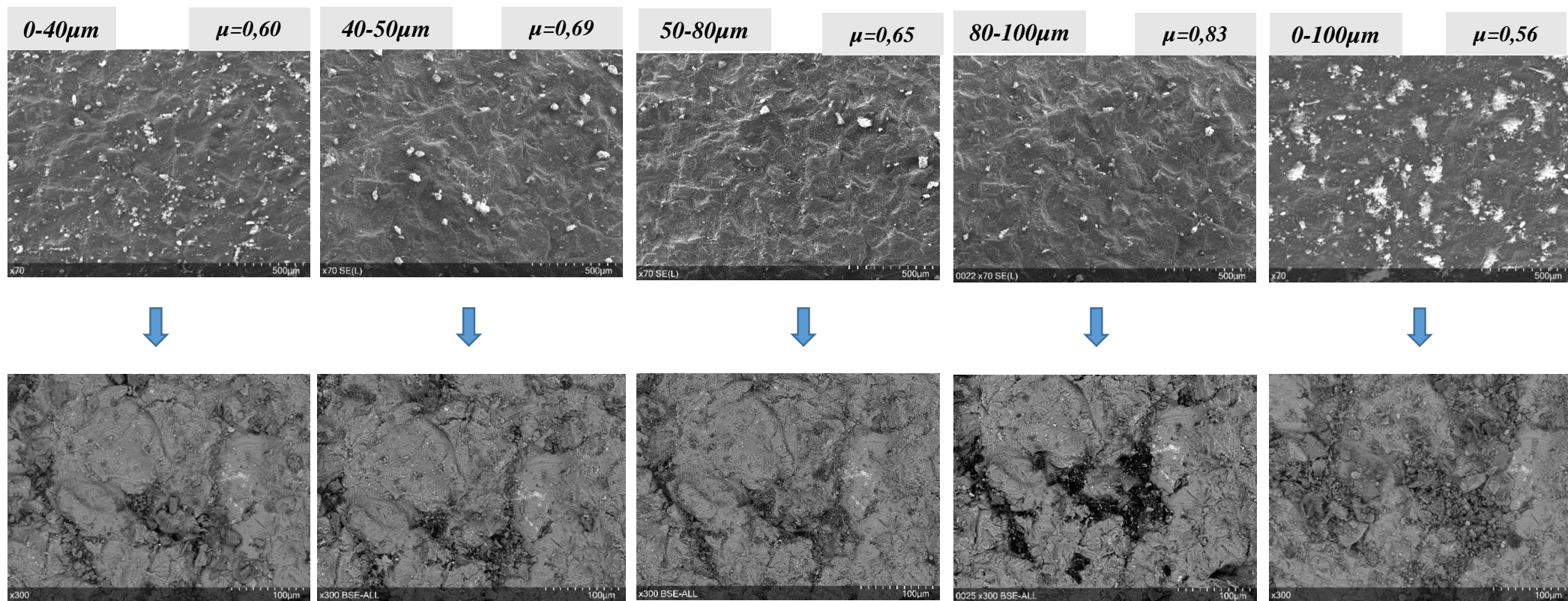


Figure 6.632 Images MEB : surfaces à l'étape intermédiaire

Etape finale: Après 10-13 mesures SRT

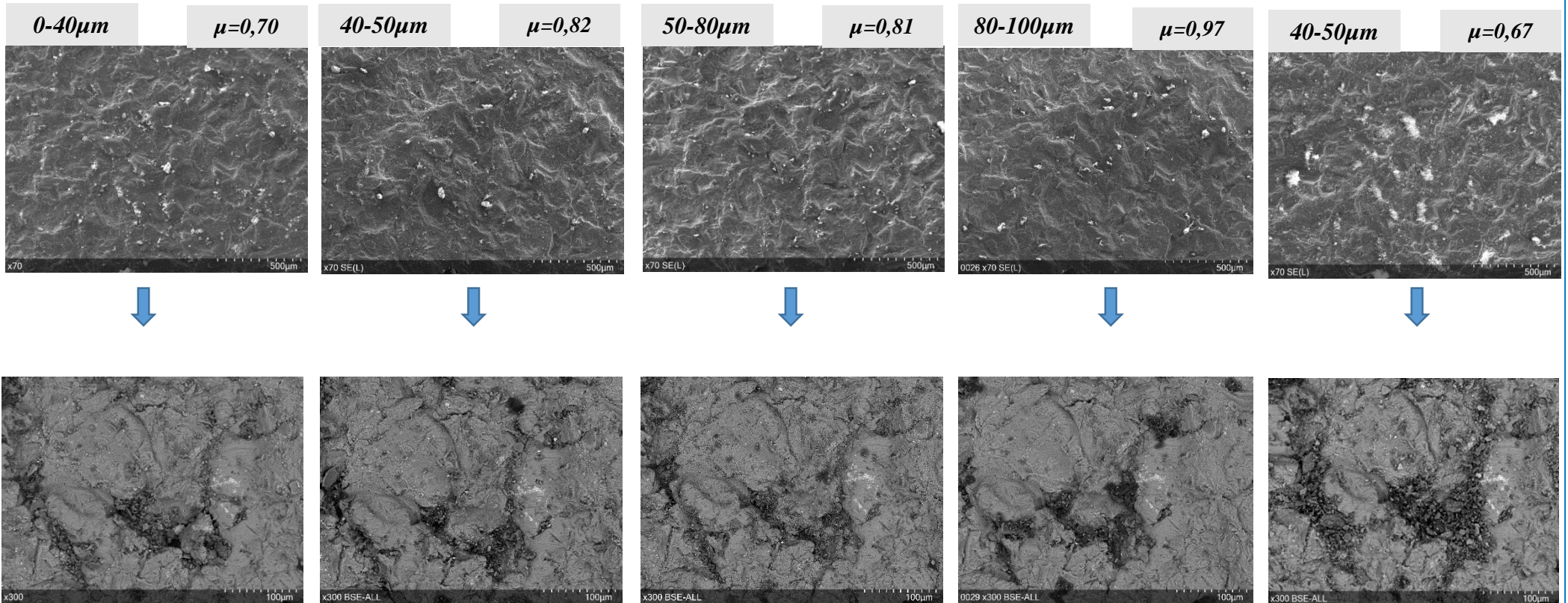


Figure 6.7 Images MEB : état des surfaces à l'étape finale (stabilisation de μ)

Après 3 passages du patin (Figure 6.6), les particules des fractions 50-80 μm et 80-100 μm sont totalement éjectées. Quant aux particules fines, elles ont tendance à rester accrochées sur la surface.

A l'étape finale du protocole, seules les fractions de taille des particules 0-100 μm et 0-40 μm (en plus faible quantité), présentent quelques particules piégées dans les creux de la surface (Figure 6.7). L'état de surface final pour les fractions de taille 40-50 μm , 50-80 μm et 80-100 μm est identique à l'état initial (surface propre), c.à.d. que toutes les particules sont éjectées de la surface. Les particules de faible taille, piégées dans les creux après les différents passages du patin, peuvent parvenir du dépôt initial ou/et de la dislocation des plus gros agglomérats. Ceci est difficile à montrer puisque les particules sont en recirculation. Néanmoins, une comparaison de l'état de la surface de l'échantillon avec la fraction 0-100 μm pendant les quatre étapes du protocole observées, peut donner une idée sur l'évolution de l'état de ces particules durant l'essai (Figure 6.8). La présentation des images avec les électrons secondaires (SE) permet de voir la cohésion de ces particules entre elles après le passage du patin. On constate que les particules ont tendance à s'étaler dans le sens de passage du patin. Cela est observé sur la Figure 6.8c après le troisième passage du patin. A l'étape finale, seules des particules de taille inférieure à 15 μm restent piégées dans les creux (Figure 6.8d).

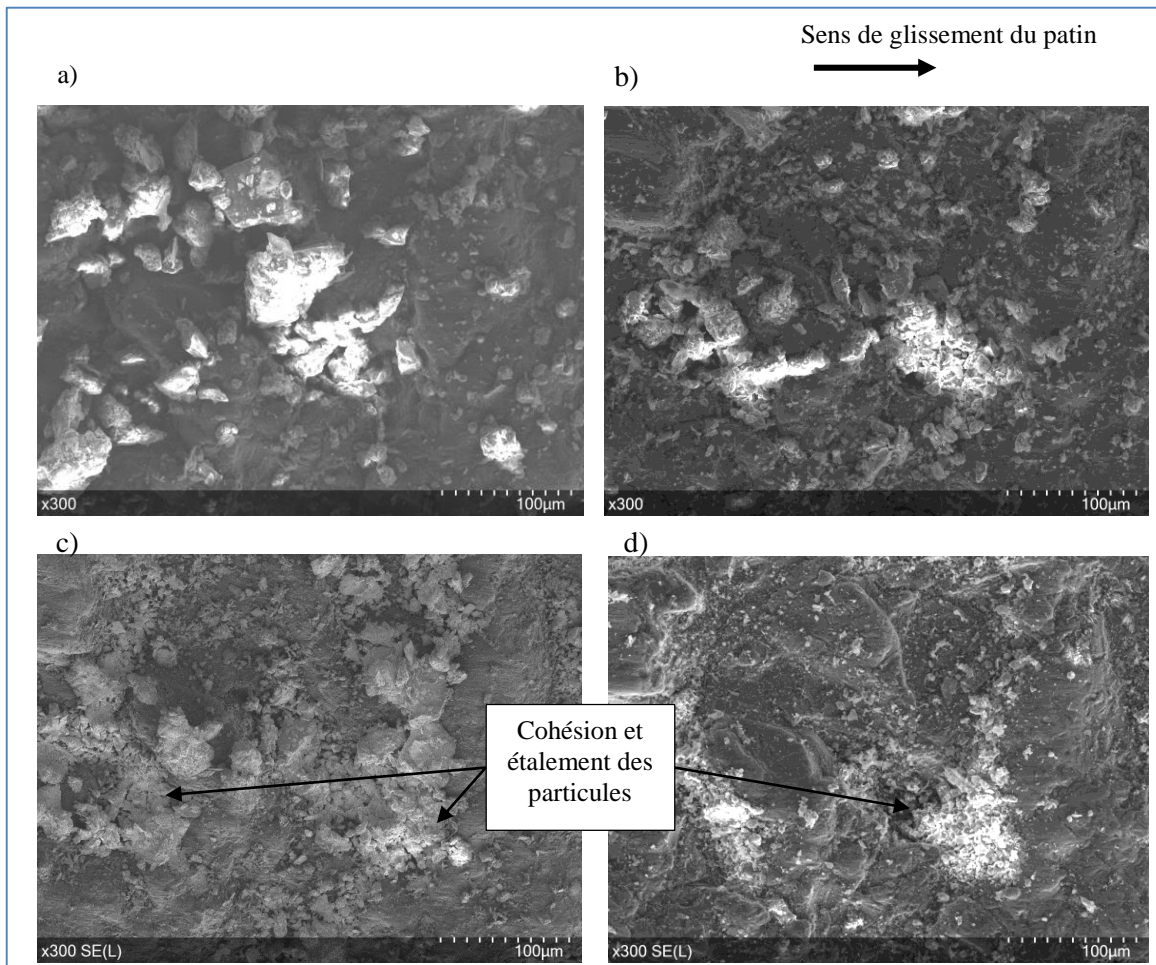


Figure 6.8 Comparaison de l'état de la surface avec la fraction 0-100µm a) après le compactage b) à l'étape 1 c) à l'étape 3 d) à l'étape finale

La Figure 6.9 présente une comparaison de la surface à l'état final pour chaque fraction de taille. Cette figure montre le mécanisme de piégeage des particules par les aspérités de la surface en fonction de leurs tailles. En effet, la fraction de taille 0-100µm contient plus de particules argileuses que les autres fractions de taille (Voir chapitre 4, partie 4.2.1.2). Ces minéraux argileux favorisent la cohésion des particules entre elles et leur étalement, en étant seules ou collées sur des particules plus dures.

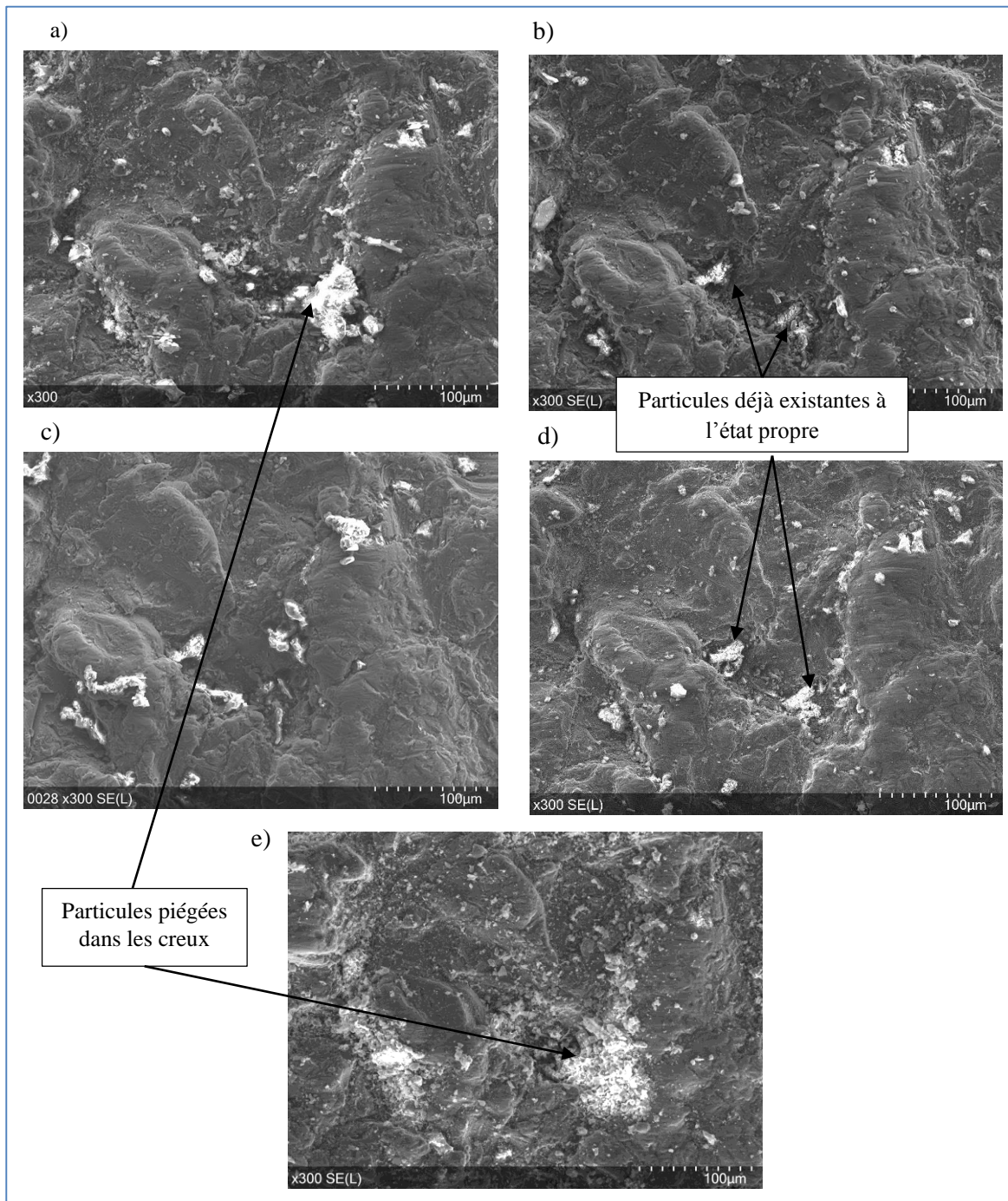


Figure 6.9 Comparaison de l'état de la surface à l'étape finale avec la fraction de taille a) 0-40µm b) 40-50µm c) 50-80µm d) 80-100µm e) 0-100µm

Grâce aux observations au MEB, les interactions des particules avec les aspérités après le passage du patin sont identifiées. Les particules des fractions de taille 40-50µm, 50-80µm et 80-100µm, sont éjectées plus rapidement de la surface. Le piégeage des particules, principalement observé dans le cas des particules fines de la fraction 0-40µm et 0-100µm, est lié à la taille fine de ces particules. Il est observé que seules des particules ayant des tailles plus fines que 15µm sont susceptibles d'être piégées

par les aspérités de la surface après plusieurs passages du patin de SRT. Les observations des particules éjectées et collées sur les pastilles nous permettent de mieux comprendre les phénomènes d'éjection.

6.2.2. Observation des particules éjectées sur les pastilles

Les images issues des observations des particules éjectées sont présentées dans les figures ci-dessous. Chaque image présente une zone d'observation sur la pastille (1,8 x 1,3mm), placée à 5cm devant la plaque, qui correspond à chaque essai. Il faut noter que les formes d'aiguille présentes sur quelques pastilles sont des défauts de métallisation. En effet, pour mieux observer les particules au MEB, les pastilles ont été métallisées avant chaque observation. La couche de métallisation non uniforme (défaut de l'appareil) sur la surface crée des lamelles qui sont facilement identifiables (Figure 6.10a).

Les figures 6.10, 6.11 et 6.12 présentent respectivement les images issues des observations des particules éjectées lors du premier passage, troisième passage et dernier passage du patin de mesure SRT.

Etape 1 : premier passage du patin

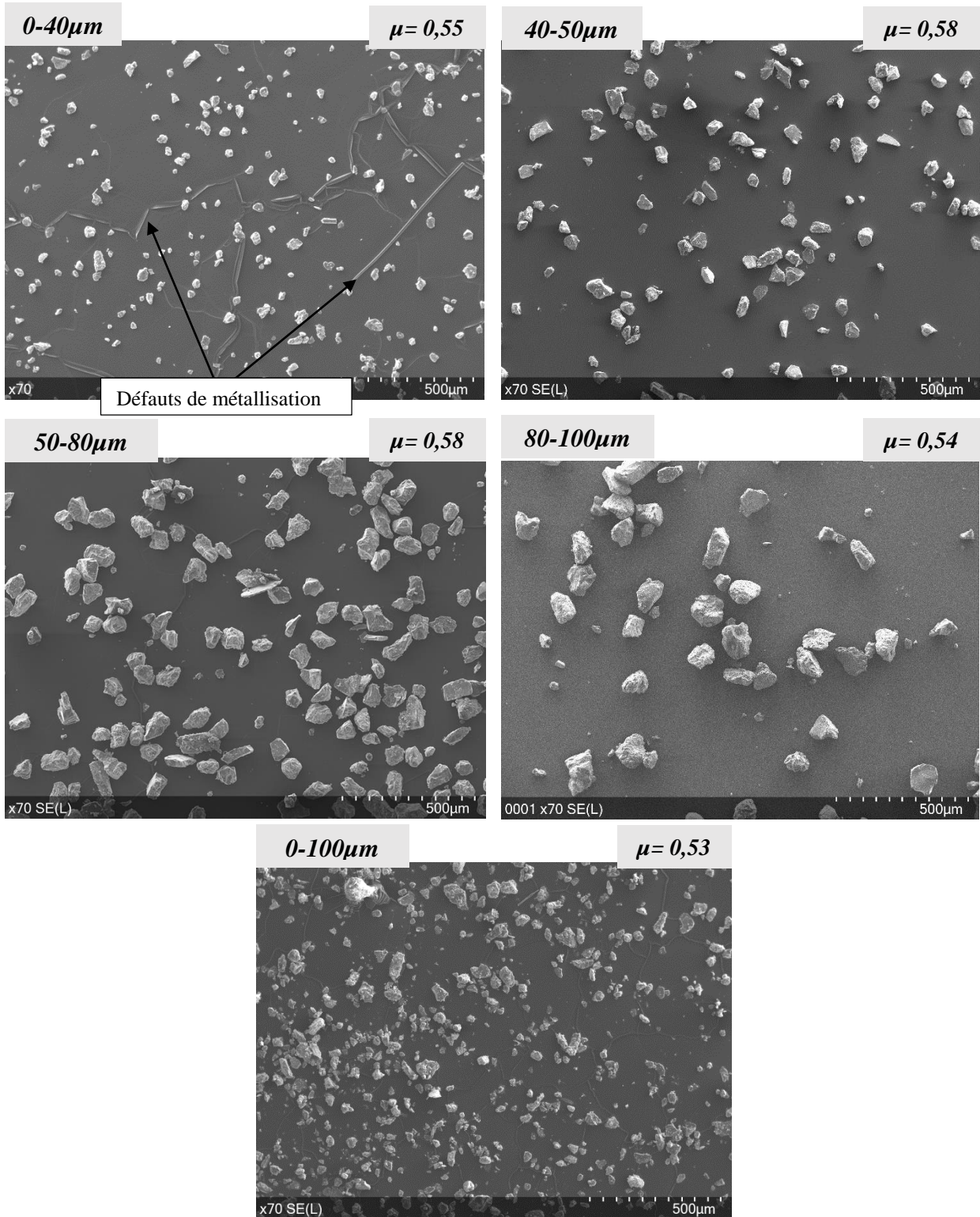


Figure 6.10 Particules éjectées lors du 1^{er} passage du patin SRT

Etape intermédiaire : lors du 3^{ème} passage du patin

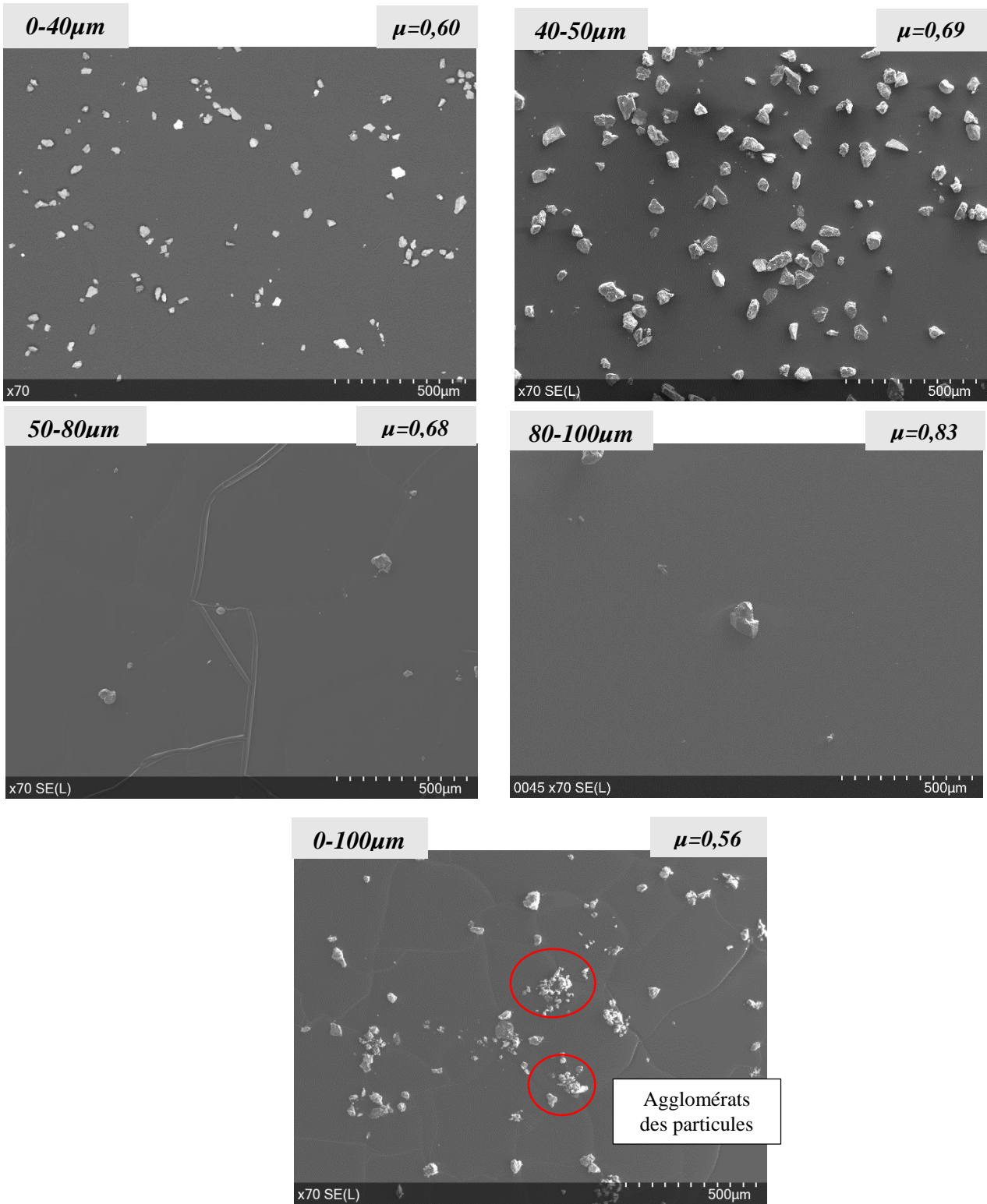


Figure 6.11 Particules éjectées lors du 3^{ème} passage du patin SRT

Etape finale : lors du 10^{ème} 13^{ème} passage du patin

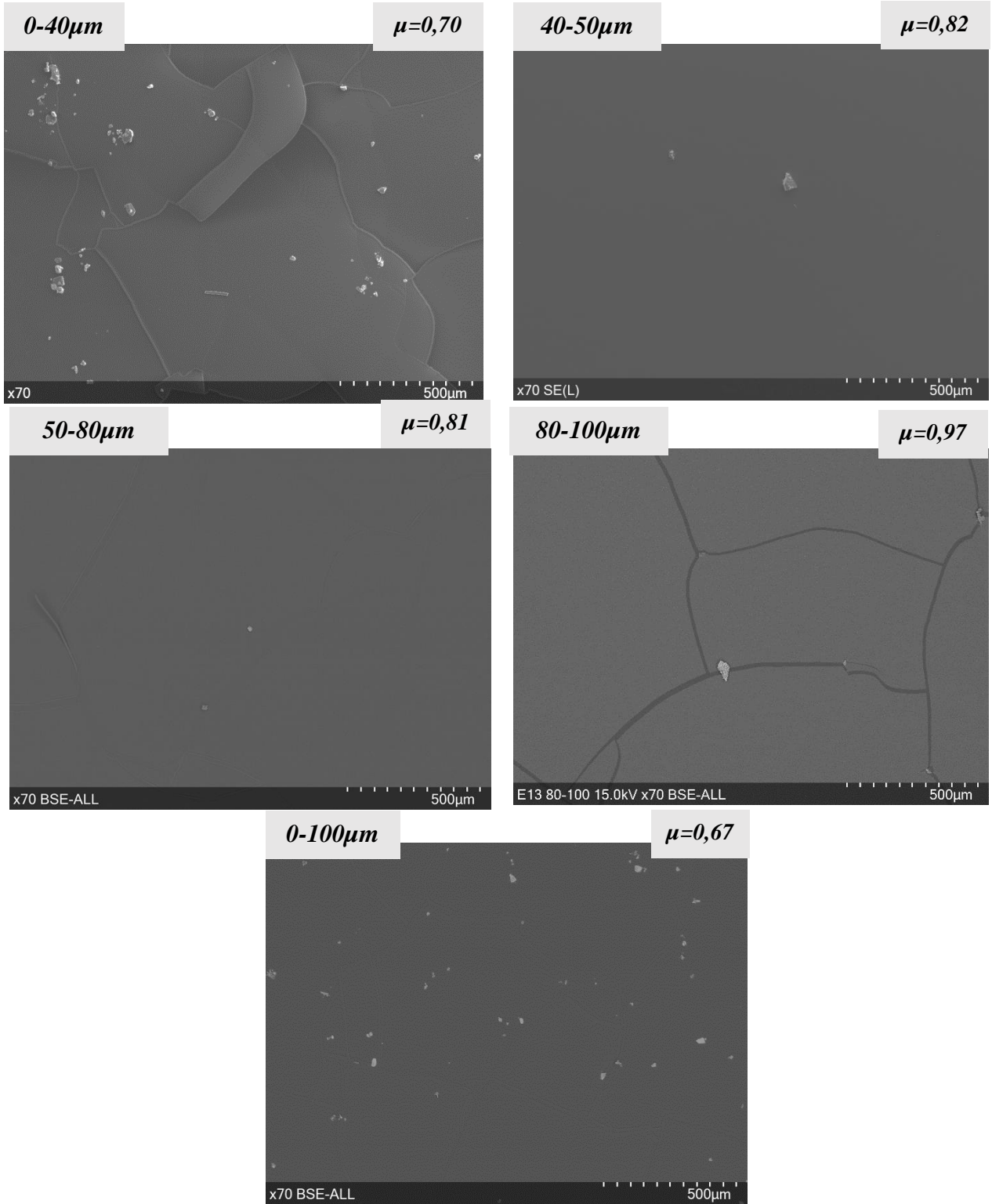


Figure 6.12 Particules éjectées lors du dernier passage du patin SRT

Lors du premier passage du patin de SRT, la quantité de particules éjectées sur la pastille est importante pour toutes les fractions de taille (Figure 6.10).

Après le troisième passage du patin SRT (Figure 6.11), on observe qu'il n'y a presque plus de particules éjectées des fractions 50-80 μm et 80-100 μm . Cependant, la quantité de particules des autres fractions de taille est toujours importante. On observe que les particules de la fraction 0-100 μm sont éjectées sous forme d'agglomérats de particules. Cela montre que ces particules sont plus cohésives. Sous l'effort du patin, une dislocation de ces particules peut se produire.

Après le dernier passage du patin SRT (Figure 6.12), on observe qu'il n'y a que quelques particules fines de la fraction 0-40 μm et de la fraction 0-100 μm qui sont éjectées sur les pastilles. Les particules observées sur la fraction 0-40 μm sont également sous la forme d'agglomérats de particules fines collées sur les particules les plus grandes ; cela est plus visible sur la Figure 6.13.

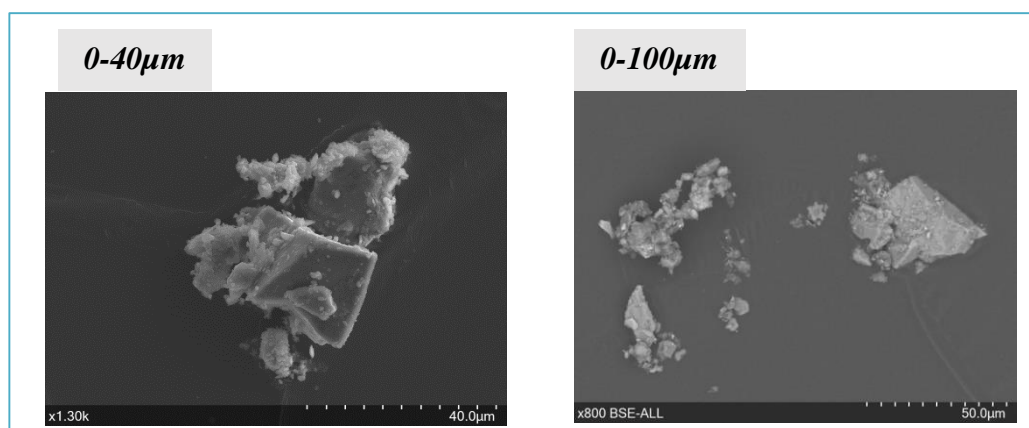


Figure 6.13 Particules éjectées lors du dernier passage du patin SRT a) 0-40 μm b) 0-100 μm

Les observations des pastilles montrent que les particules des deux fractions grossières (50-80 μm et 80-100 μm) sont éjectées plus rapidement de la surface. Même si les particules de la fraction 40-50 μm sont peu présentes sur la surface de la plaque après le troisième passage du patin, une quantité importante des particules était éjectée sur les pastilles. Les particules de la fraction 0-40 μm et 0-100 μm sont restées plus longtemps sur la surface de la plaque. Les particules éjectées sur les pastilles montrent qu'il y a des agglomérats de particules qui restent collés lors de l'éjection et que d'autres se fragmentent sous l'effet de choc du patin.

Les images issues des observations des particules éjectées peuvent ensuite être analysées de façon à obtenir une description quantitative de leurs tailles. En utilisant un programme de traitement et d'analyse d'images ImageJ, la distribution de taille de ces particules peut être déterminée. La méthode consiste à analyser des images MEB prises sur cinq zones définies (au centre et sur les quatre bords, avec un grossissement $\times 70$) de chaque pastille observée (Figure 6.14). A noter que sur deux pastilles (fraction 40-50 μm , étapes 1 et finale), seulement 3 zones ont été analysées.

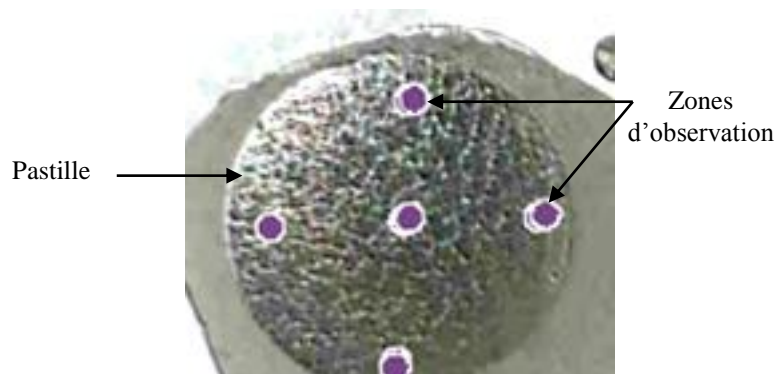


Figure 6.14 Zones d'observation sur chaque pastille

Sur certaines images on trouve des défauts de métallisation sous forme de lamelles en surface. Cet effet de « faïençage » est corrigé manuellement à l'aide de l'outil de retouche Paint. De plus, certaines particules déposées dans la même zone sur la pastille et qui sont collées où superposées les unes sur les autres, sont considérées comme une seule particule par le logiciel ImageJ. Ces particules sont séparées également à l'aide de l'outil Paint, en dessinant manuellement des lignes de séparation (Figure 6.15).

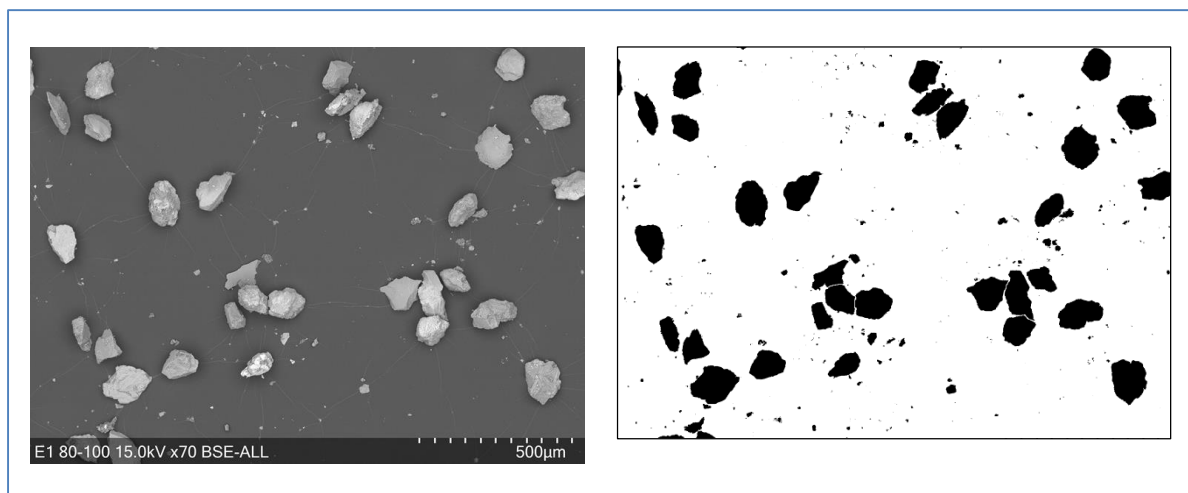


Figure 6.15 Exemple d'une photo prise au MEB a) à l'état brut, b) à l'état final traité avec Paint et ImageJ (fraction 80-100µm ; 1^{er} passage du patin)

Les caractéristique de chaque particule (taille, aire, etc.) sont extraites sur un tableau Excel. La taille de chaque particule sur l'image est présentée par un diamètre Féret. Ce diamètre, proposé par L.R. Féret en 1931, correspond à la distance entre les deux plans parallèles encadrant le contour du fragment suivant une direction donnée. Le Féret mesuré avec ImageJ correspond à la distance maximale entre les deux plans (Figure 6.16).

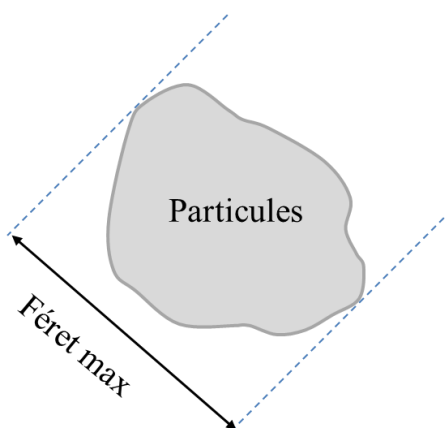


Figure 6.16 Illustration du Féret mesuré à avec ImageJ

Pour déterminer la distribution de taille des particules, les tailles mesurées sont séparées en plusieurs classes, présentées sur l'axe des abscisses de chaque graphe ci-dessous. Les résultats sont exploités sous forme d'histogrammes représentant le pourcentage en nombre de particules constituant chaque classe de taille pour chaque étape.

La Figure 6.17 présente les distributions de taille des particules éjectées à l'étape 1 (E1), à l'étape intermédiaire (E3) et à l'étape finale (E13) de la fraction 0-40 μm . On observe que la taille des particules éjectées diminue en fonction des passages du patin. La médiane de la population de taille passe de 40 μm aux étapes 1 et 3 à 20 μm à l'étape finale (E13).

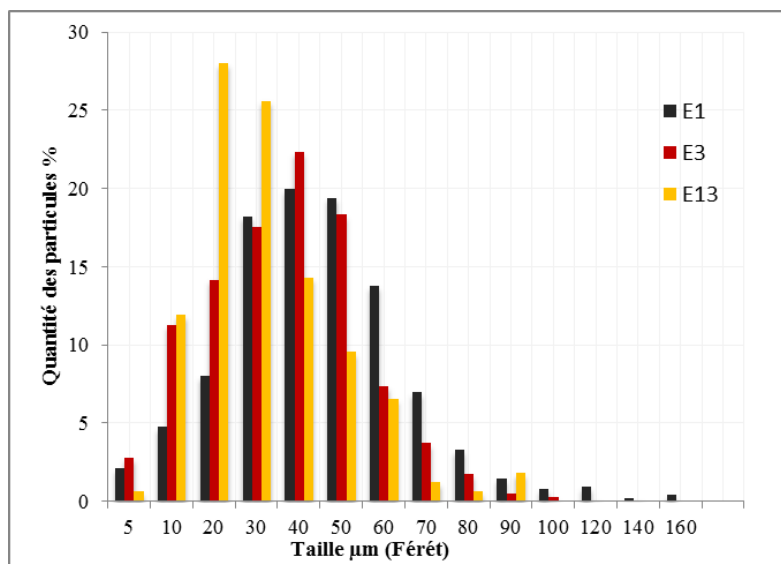


Figure 6.17 Distribution de taille des particules de la fraction 0-40 μm éjectées sur la pastille à l'étape 1, intermédiaire et finale

La distribution de taille des particules éjectées de la fraction 40-50 μm , 50-80 μm et 80-100 μm présente deux populations de taille, des particules fines et des particules grossières (Figure 6.18, Figure 6.19 et Figure 6.20). En observant ces particules sur la pastille, on peut voir que des particules de tailles fines sont éjectées sur la pastille (visible sur l'exemple de la Figure 6.10). Ces particules peuvent être générées par une dislocation des particules argileuses de tailles fines enrobant les particules grossières (présentes dans toutes les fractions de taille mais en minorité dans ces deux fractions). Sous le choc avec le patin, ces particules peuvent se disloquer et être éjectées séparément sur la pastille. Ce phénomène peut être lié aussi à une fragmentation des particules grossières par le patin.

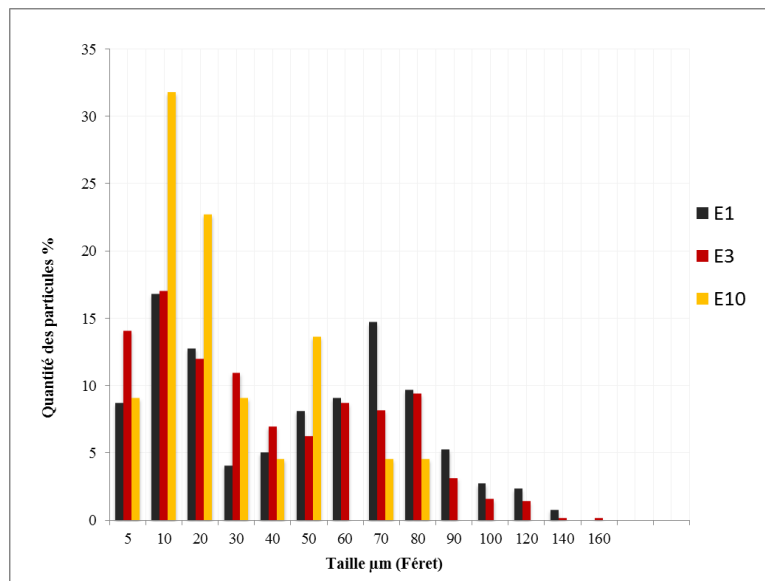


Figure 6.18 Distribution de taille des particules de la fraction 40-50 μm éjectées sur la pastille à l'étape 1, intermédiaire et finale

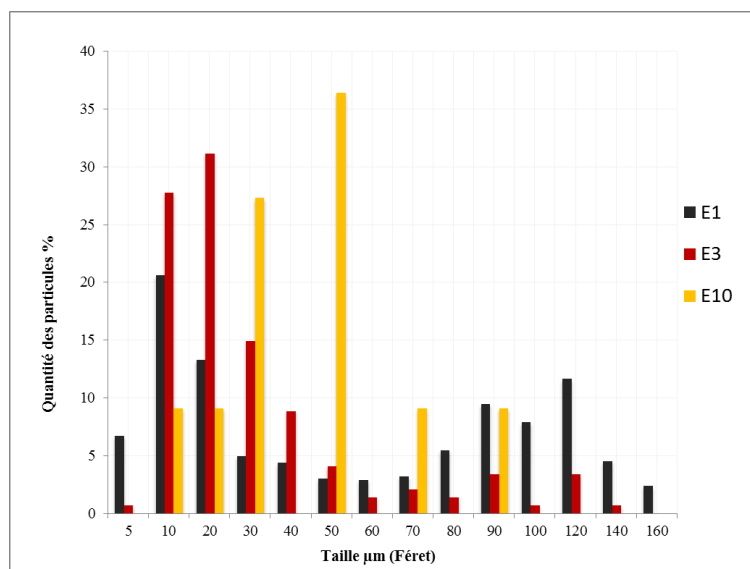


Figure 6.19 Distribution de taille des particules de la fraction 50-80µm éjectées sur la pastille à l'étape 1, intermédiaire

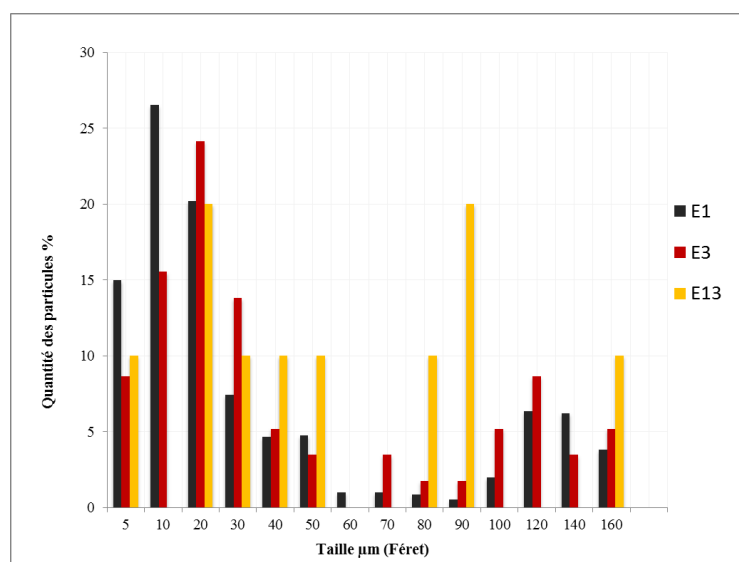


Figure 6.20 Distribution de taille des particules de la fraction 80-100µm éjectées sur la pastille à l'étape 1, intermédiaire et finale

La Figure 6.21 présente les distributions de taille des particules éjectées à l'étape 1, à l'étape intermédiaire (E3) et à l'étape finale de la fraction 0-100µm. On observe que la variation des distributions de taille est similaire à celle de la fraction 0-40µm. La taille des particules éjectées diminue en fonction des passages du patin. Néanmoins, les particules éjectées sont plus fines que celle de la fraction 0-40µm La médiane de la population de taille passe de 20µm aux étapes 1 et 3 à 10µm à l'étape finale (E13).

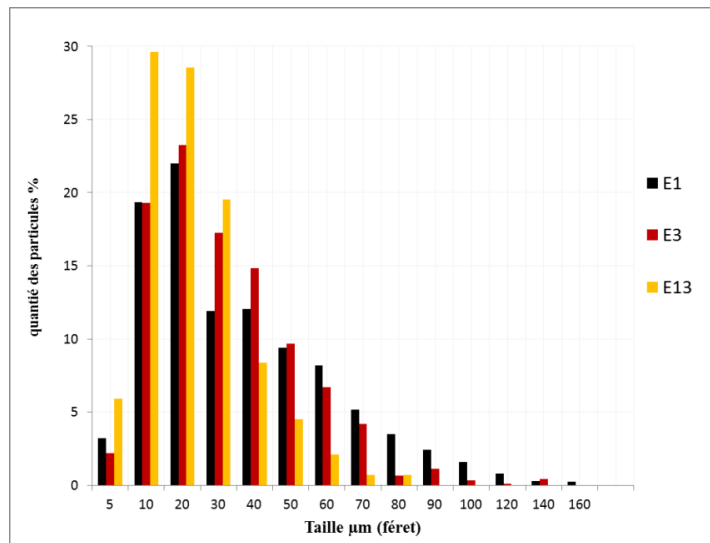


Figure 6.21 Distribution de taille des particules de la fraction 0-100μm éjectées sur la pastille à l'étape 1, intermédiaire et finale

Ces observations montrent que les mécanismes d'éjection des particules sont différents entre deux familles de particules. La première famille présente les deux fractions 0-40μm et 0-100μm où les particules s'éjectent uniformément avec les différents passages du patin. La deuxième famille de particules (les fractions 40-50μm, 50-80μm et 80-100μm) présente un mécanisme d'éjection différent : les particules éjectées présentent deux populations, des particules de taille fine et des particules de taille importante. Il faut tenir compte du fait que la quantité des particules éjectées est moins importante que celle de la première famille, ce qui probablement complique ces analyses.

6.3. Comportement dynamique des particules

Cette partie a pour objectif de visualiser le comportement dynamique des particules à l'interface, c'est à dire, les mouvements relatifs de ces particules en fonction de leurs tailles et leurs interactions avec la texture de la surface. L'essai consiste à visualiser à l'aide d'une caméra rapide le long d'une petite zone du contact le passage du patin sur la surface contaminée par des particules lors d'un essai au pendule SRT. Les observations des particules en surface sont réalisées sur une zone au milieu de la plaque. Le champ de la caméra couvre une zone d'environ $15,4 \times 31 \text{ mm}^2$ au milieu de la plaque à 5mm du bord. Le protocole d'observation est présenté dans le chapitre 4 (partie 4.8). Les travaux ont été divisés en deux phases. Dans un premier temps, le comportement d'une bille de verre (bille « modèle ») sur une surface lisse puis sur une surface texturée est analysé. Dans un deuxième temps, le comportement des particules naturelles (i.e. prélevées sur la route) sur une surface texturée est étudié.

6.3.1. Suivi d'une seule particule

Plusieurs billes de verre sont placées sur la surface de la plaque. Ces billes permettent de minimiser l'effet d'adhésion du patin sur la plaque d'essai, ce qui perturbe le contact avec la bille à observer. La durée d'observation est égale à environ 6,5 ms (de l'entrée du patin à la zone d'observation à sa sortie). Huit répétitions d'essai (i.e. mesure au pendule SRT) sont réalisées avec la plaque lisse et 4 répétitions avec la plaque grenillée.

Les deux principaux comportements de la bille lors du passage du patin sur la surface lisse sont présentés sur la Figure 6.22.

Sur la surface lisse, la bille de verre se comporte de deux manières différentes lors du passage du patin :

- Sur l'exemple 1, il est observé que la bille roule sous le patin, sort de la zone de contact et ensuite suit la trajectoire du patin, ce comportement est observé dans 2 cas sur les 8 essais réalisés.
- Sur l'exemple 2, il est observé que la bille roule sous le patin et reste trainée sur toute la longueur de la zone d'observation entre le patin et la surface lisse. Ce comportement est le plus observé pendant les essais.

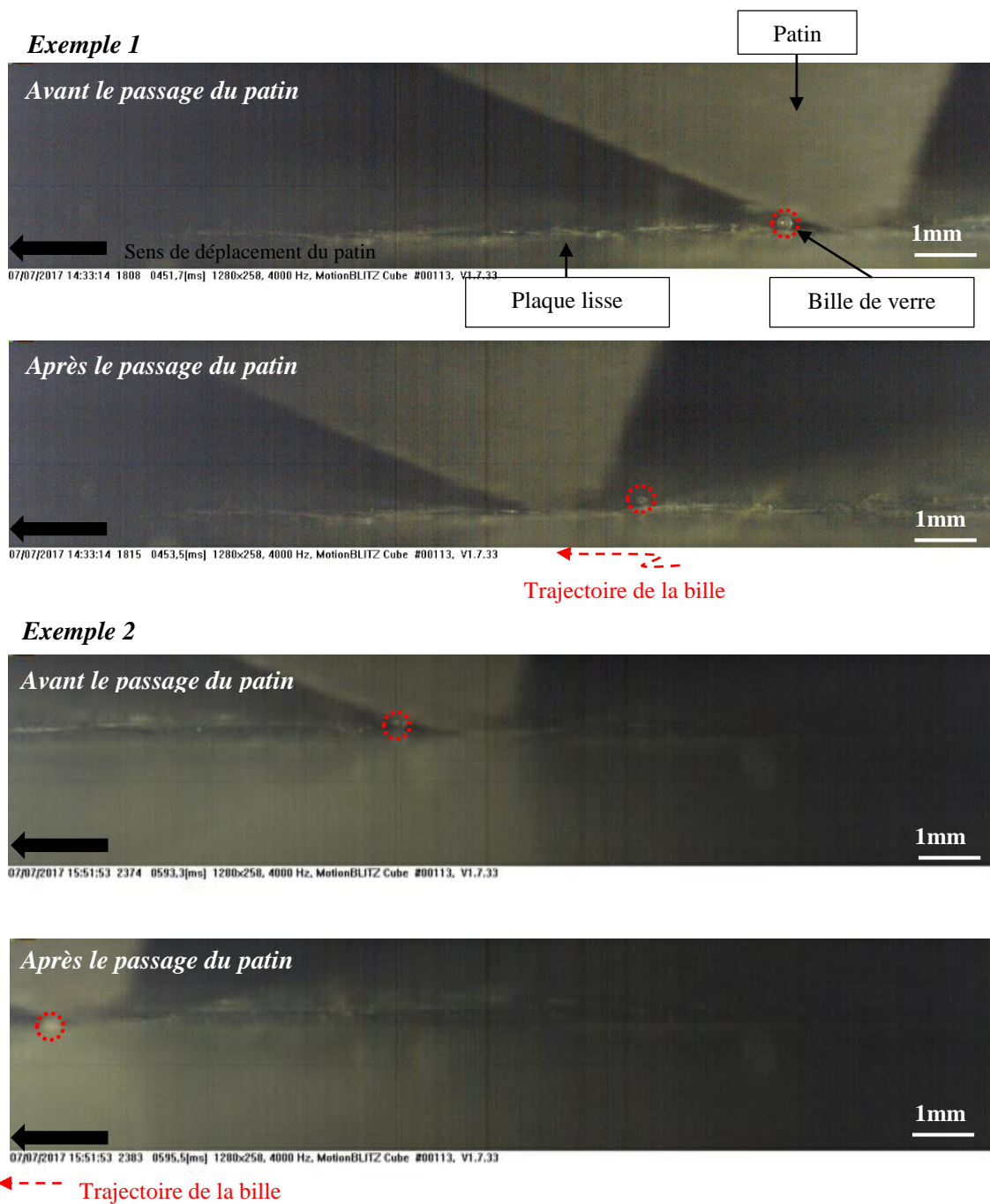


Figure 6.22 Comportement de la bille de verre lors du passage du patin sur la surface lisse

En présence d'une rugosité relativement importante sur la surface d'essai (surface grenillée), deux comportements sont observés (Figure 6.23) :

- Le premier, qui correspond à l'exemple 1, montre que la bille est trainée sur quelques millimètres par le patin puis sort du contact en étant éjectée vers l'arrière. Ce comportement est observé dans trois cas sur les quatre cas observés.

- Le deuxième, qui correspond à l'exemple 2, montre que la bille est trainée sur quelques millimètres avant d'être éjectée du contact par le côté du patin. Ce comportement est observé une seule fois.

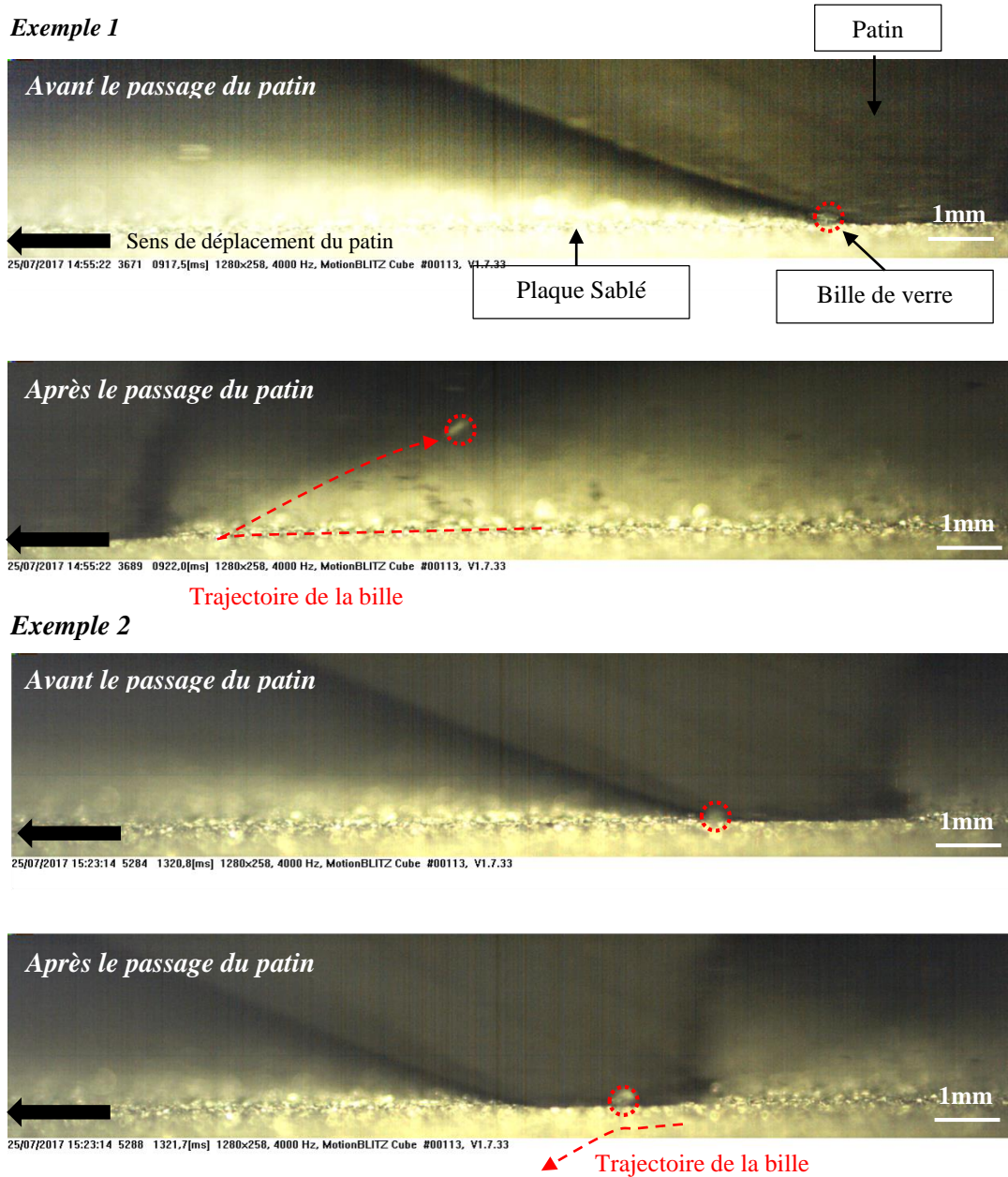


Figure 6.23 Comportements de la bille de verre lors du passage du patin sur la surface sablée

Les schémas présentés dans la Figure 6.24 et la Figure 6.25 montrent les différentes trajectoires de la bille de verre (sur la surface lisse et sur la surface grenillée) observées.



Figure 6.24 Schéma représentatif des différentes trajectoires de la bille de verre sur la surface lisse lors du passage de patin



Figure 6.25 Schéma représentatif des différentes trajectoires de la bille de verre sur la surface grenailée lors du passage de patin

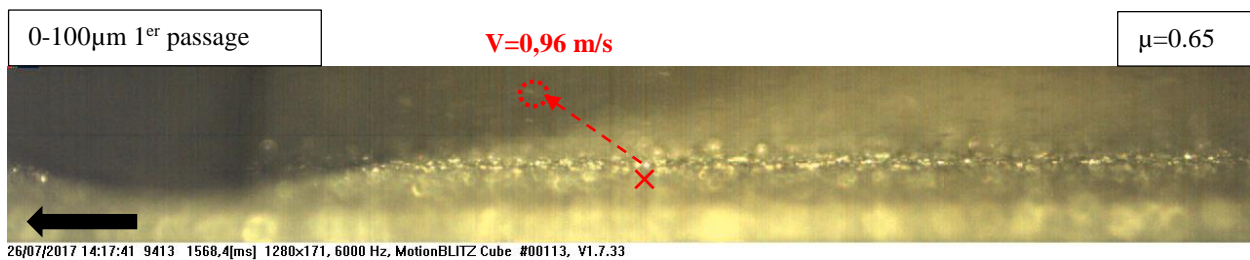
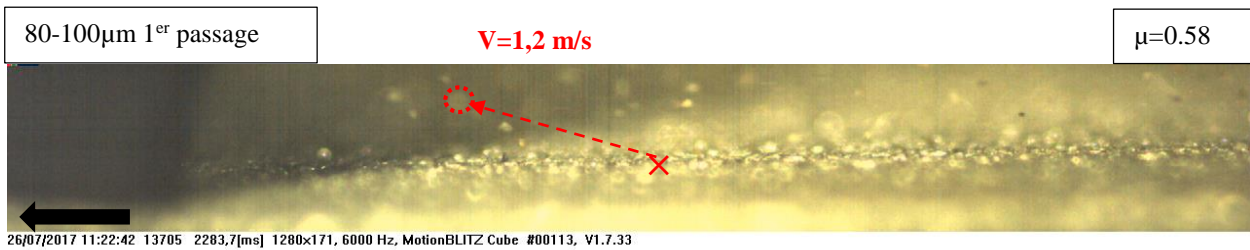
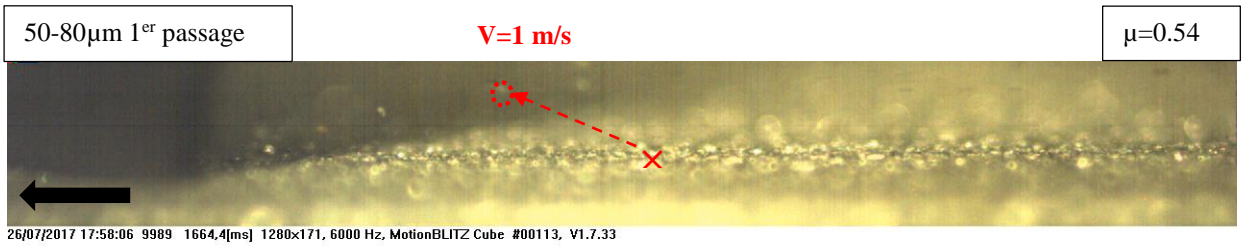
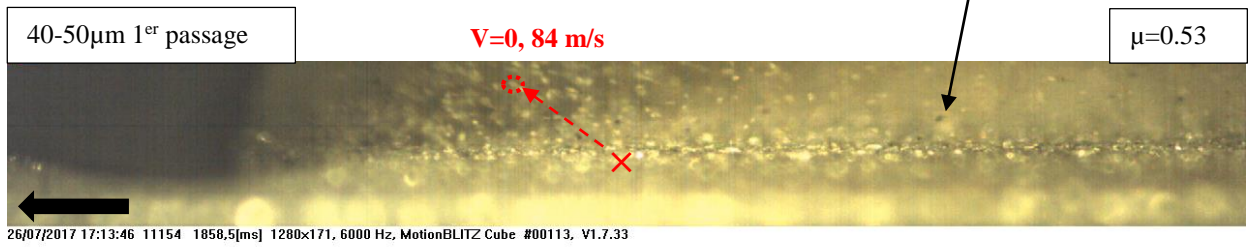
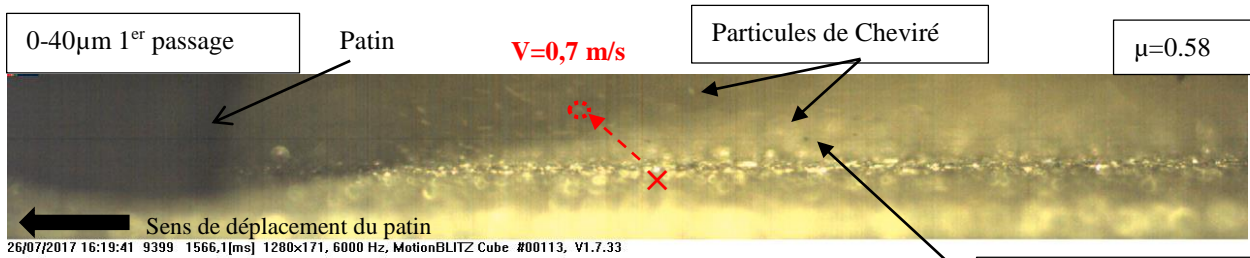
Sur la surface lisse, nous avons observé que seulement dans deux cas la bille de verre suit le patin, sort du contact et ensuite suit la trajectoire du patin. Ce comportement est probablement dû à l'effet d'adhésion du patin sur la plaque lisse. Dans les six cas restants, la bille de verre roule sous le patin. Le comportement de roulement de la bille est majoritaire.

A l'inverse, les aspérités de la surface grenailée provoquent un effet de blocage de la bille, ce qui explique le comportement observé sur l'exemple 1 de la Figure 6.23. Même si la taille de la bille est importante ($180\mu\text{m} < d < 250\mu\text{m}$), les aspérités de la surface ($S_q = 13,9\mu\text{m}$) peuvent empêcher le roulement de la bille.

Ces observations ont permis d'analyser les différents comportements d'une particule de dimension et forme connues. Les particules naturelles ont bien évidemment un comportement plus complexe qui est traité dans la partie suivante.

6.3.2. Suivi d'un ensemble de particules

Les images dans la Figure 6.26 présentent le premier passage du patin sur la plaque d'aluminium grenailée pour chaque fraction de tailles des particules. Le patin glisse sur la surface de la droite vers la gauche. Les images présentées ont été capturées juste après le passage du patin (on voit la sortie du patin à gauche de l'image). Connaissant le temps écoulé entre deux images consécutives, la vitesse de déplacement d'une particule peut être estimée.



- > Trajectoire de la particule après le passage du patin V : vitesse de déplacement de la particule
 ○ Particule observée \times Point de départ de la particule observée

Figure 6.26 Comportements des particules de Cheviré lors du passage du patin sur la plaque Sablée

Il est plus facile de voir le déplacement des particules sur les vidéos que sur les images présentées ci-dessus. Sur toutes les vidéos, on constate que les particules ne sont pas poussées en amont du patin comme cela aurait pu être attendu. De plus, le mécanisme de roulement (comme sur l'exemple 2 de la Figure 6.22) n'est pas observé sur toutes les fractions de taille des particules. Cela ne prouve pas que ces mécanismes ne soient pas existants, mais ils peuvent être non visibles avec la caméra rapide ou bien négligeables. Toutefois, il est observé que les particules sont soulevées de la surface lors du passage du patin en formant un nuage. On suppose que la dépression provoquée par le passage du patin est principalement à l'origine de ce nuage. Une partie de ces particules est ensuite attirée par aspiration dans la direction du patin avant d'être éjectée. La deuxième partie de ces particules se redépose sur la surface. L'éjection des particules est alors due à ce nuage de particules aspirées par le patin en dehors du contact.

Selon la taille des particules, ces phénomènes sont plus ou moins remarquables. Avec la fraction 0-40 μm , un nuage dense de particules fines se déplace très près du patin. On peut observer que toutes les particules ne se déplacent pas avec le patin et qu'une partie reste accrochée sur la surface. Après le passage du patin sur la fraction 40-50 μm , la quantité des particules qui se déplacent dans le nuage est plus importante que celle de la fraction la plus fine (0-40 μm). Les particules sont éjectées plus haut avant qu'une petite partie ne retombe sur la surface et qu'une autre partie soit transportée par aspiration derrière le patin. Avec les fractions de taille des particules 50-80 μm et 80-100 μm , on constate que le nuage de particules est moins dense dans la zone proche du patin. Une partie de ces particules est attirée par aspiration du patin, une deuxième partie de ces particules a tendance à être expulsée vers l'arrière par l'effet de pincement générée par les aspérités avant de changer de direction pour suivre la direction du patin. Ce deuxième comportement est le plus proche de celui de la bille de verre sur la surface grenailée (l'exemple 1 de la Figure 6.22). Cependant, comme la bille de verre est plus grande (deux fois plus importante que les particules les plus grosses de Cheviré) et forcément plus lourde, sa trajectoire ne change pas sous l'effet de dépression.

Après le passage du patin sur la fraction 0-100 μm , il est observé l'addition des phénomènes vus sur les fractions fines et les fractions grossières, à savoir, l'éjection de contaminants et la création du nuage dense avec quelques morceaux de gomme, dont une partie est éjectée vers le haut avant de rebondir sur la surface et une deuxième partie suit le patin. Les particules fines de la fraction 0-40 μm et 0-100 μm sont peut être difficiles à observer par la caméra rapide. Néanmoins, le nuage des particules semble être moins dense que celui de la fraction 40-50 μm .

Sur les vidéos enregistrées, il a été choisi de suivre le comportement de trois particules (direction et calcul de déplacement) pour chaque fraction de taille. Une flèche rouge fournit un exemple de résultats obtenu (trajectoire et vitesse V) pour une particule suivie dans chaque fraction de taille (Figure 6.25). Les estimations de la vitesse de déplacement des particules après le passage du patin pour chaque fraction de taille sont présentées dans le Tableau 6.1. En regardant la trajectoire des particules selon leurs tailles, on constate que plus les particules sont fines et plus elles tendent à être soulevées vers le haut. La vitesse de déplacement de ces particules varie également selon leurs tailles ; plus la taille de la particule est faible, plus sa vitesse de déplacement est faible. Les particules

grossières présentent une vitesse de déplacement plus importante, ce qui favorise normalement leur éjection. La Figure 6.27 présente les différentes trajectoires rencontrées avec les particules naturelles.

Tableau 6.1 Les valeurs de la vitesse calculée pour trois particules suivies de chaque fraction de taille

<i>Vitesse de déplacement (m/s)</i>	0-40 μ m	40-50 μ m	50-80 μ m	80-100 μ m	0-100 μ m
Particule 1	0,70	0.84	1.00	1.20	0.96
Particule 2	0,86	0.77	1.18	1.06	1.04
Particule 3	0,82	0.82	1.11	1.55	1.20
Moyenne	0.79	0.81	1.10	1.27	1.06



Figure 6.27 Schéma représentatif des différentes trajectoires des particules naturelles observés lors du passage de patin

Grâce aux observations à la caméra rapide, nous avons pu identifier trois flux de particules dans la zone de contact :

- Le flux de recirculation, qui représente les particules qui sont soulevées puis retombent sur la surface ainsi que les particules qui restent piégées par la texture.
- Le flux d'éjection, qui représente les particules aspirées derrière le patin puis éjectées en dehors du contact.
- Le flux de détachement, qui présente les morceaux de gomme provenant de détachement de la matière du patin (les corps noirs) observés sur tous les essais. En théorie, il est possible d'avoir un détachement de matière de la plaque en aluminium mais cela n'a pas été observé par la caméra rapide.

6.4. Conclusions

Les observations au MEB montrent qu'il y a un phénomène de piégeage de particules par les aspérités de la surface. Ce phénomène de piégeage est lié à la taille et à la nature des particules. Les particules fines, ayant des tailles inférieures à 15 μ m, sont piégées par la texture après plusieurs passages du patin. La présence de l'argile dans la fraction 0-100 μ m favorise ce phénomène de piégeage. Un étalement des particules est observé dans le sens du passage du patin. Cet étalement des

particules crée un film discontinu sur toute la surface. Si on observe de plus près, à l'échelle des creux, ce film de contaminant pourrait être considéré comme un film localement continu. Même si ce film ne couvre que des zones de petite taille de la surface, son effet sur le coefficient de frottement est néanmoins important. On considère donc qu'il y a un effet de lubrification induit par ce film de particules lors du passage de patin SRT.

Les observations des particules éjectées sur les pastilles, montrent que les mécanismes d'éjection des particules sont différents entre deux familles de particules. La première famille contient les deux fractions 0-40 μm et 0-100 μm (sachant que 60% de cette fraction est constituée de particules de taille inférieure à 40 μm) où les particules s'éjectent uniformément avec les différents passages du patin. La deuxième famille de particules contient les fractions 40-50 μm , 50-80 μm et 80-100 μm où un changement de mécanismes d'éjection se produit : les particules éjectées se divisent en deux populations, des particules de taille fine (médiane autour de 10-20 μm) et des particules de taille importante (médiane autour de 70 à 120 μm).

Grâce aux vidéos du passage du patin SRT, il a été montré que quand la surface est lisse les billes de verre (diamètre moyen de 215 μm) roulent « sous » le patin. En passant à une surface rugueuse (échantillon Sablé), ce phénomène de roulement disparaît. Les billes sont coincées par les aspérités et ensuite éjectées vers l'arrière par un effet de pincement. Avec les particules de Cheviré (tailles plus faibles que celle des billes), le même phénomène est observé : les particules ne sont pas poussées devant le patin mais elles sont soulevées de la surface. Deux flux sont ensuite observés : 1) une partie des particules sont attirées, sous l'effet de la dépression créée par le passage du patin, dans la direction du mouvement du patin avant d'être éjectées de la surface ; et 2) une autre partie de ces particules retombe sur la surface. Le deuxième flux peut être assimilé à un flux de recirculation (au sens d'un circuit tribologique) car il s'agit des particules éjectées (par un effet de soulèvement) puis remises dans le circuit (en retombant sur la surface). Il est observé que plus la taille des particules est importante, plus la vitesse d'éjection est importante. Ceci explique le fait que les particules des fractions 40-50 μm , 50-80 μm et la fraction 80-100 μm sont éjectées plus rapidement comparée à la fraction plus fine (0-40 μm).

Les observations au MEB et à la caméra rapide ont permis donc de clarifier certaines hypothèses émises lors de l'analyse du frottement (Chapitre 5). Sur l'effet de piégeage par la microtexture, ces nouvelles observations confirment les hypothèses émises et fournissent de nouvelles données sur la distribution des particules piégées. Sur les flux des particules, la caméra rapide a permis de voir que le passage du patin SRT n'induit pas uniquement l'éjection d'une partie de particules et le blocage du reste par la microtexture de la surface. Les flux sont plus complexes car un troisième mouvement – soulèvement des particules – induit un flux d'éjection et un flux de recirculation. Le flux de recirculation induit également un recouvrement de la surface de l'échantillon qui vient s'ajouter au recouvrement statique lié au dépôt initial des particules. Ces nouvelles données permettent donc de mieux prendre en compte les flux impliqués dans la modélisation du frottement qui sera présenté dans le chapitre 7.

Chapitre 7

Phase de dépôt – Vers la prédiction du frottement

Plan du chapitre

7.1. Introduction.....	150
7.2. Modèle de frottement.....	150
7.3. Modélisation de taux de recouvrement	151
7.3.1. Utilisation de la hauteur locale du film de particules	151
7.3.2. Utilisation de la masse des particules	152
7.3.3. Utilisation des flux de particules	155
7.3.3.1. Modèle d'adsorption et d'enlèvement de dépôts gazeux (Dickrell et al (2004)).....	155
7.3.3.2. Transposition du modèle de Dickrell à l'étude des particules.....	157
7.4. Résultats de la modélisation.....	158
7.4.1. Taux de recouvrement	158
7.4.2. Frottement	165
7.5. Conclusions.....	169

7.1.Introduction

L'objectif de ce chapitre est la mise en place d'un modèle de calcul du frottement gomme/surface contaminée par des particules. Le chapitre 5 a montré que : 1) le coefficient de frottement à un état de contamination donné est cadré par deux valeurs limites correspondant respectivement la surface propre et la surface après le dépôt des particules ; et 2) le facteur de pondération peut être relié à la masse des particules, compte tenu de son lien étroit avec le frottement. Le chapitre 6 a apporté des connaissances complémentaires en précisant que : 3) la surface après le dépôt des particules ne représente pas un état limite car les particules n'y forment pas un film continu pour recouvrir complètement la surface ; et 4) le facteur de pondération pertinent est le taux de recouvrement de la surface par des particules.

La principale difficulté de la modélisation du frottement réside donc dans la détermination du taux de recouvrement en identifiant son lien avec la masse des particules. Il s'agit aussi de définir l'état limite lié à la lubrification par un film de particules et l'approximation qui pourrait être faite en assimilant l'état d'une surface après le dépôt des particules à cet état limite.

Dans les paragraphes qui suivent, la chronologie des travaux développés est présentée. Cette présentation de voir la progression des réflexions permettant d'aboutir au modèle final.

7.2.Modèle de frottement

Le modèle de frottement est inspiré des travaux de Higgs et Wornoyoh (2008) qui ont développé un modèle décrivant le frottement d'un patin en carbure de titane (TiC) frottant sur un disque à surface rugueuse contaminée par des particules de MoS₂ (disulfure de molybdène). Dans leur étude, les particules proviennent de l'usure d'une pastille de MoS₂ lors de son glissement sur la surface du disque. Pour calculer le coefficient de frottement μ à un état contaminé, Higgs et Wornoyoh ont proposé le modèle suivant :

$$\mu = X\mu_{film} + (1 - X)\mu_{surface} \quad (7.1)$$

Où μ_{film} : coefficient de frottement de la surface recouverte d'un film de particules ; $\mu_{surface}$: coefficient de la surface propre ; et X : un facteur variant entre 0 et 1 représentant le taux de recouvrement de la surface par des particules.

Comme les conditions de contact de l'étude de Higgs et Wornoyoh sont très proches de celles de cette thèse (frottement entre un patin et une surface rugueuse contaminée par des particules), l'équation (7.1) est adoptée comme modèle de frottement dans la thèse.

Le frottement sur une surface propre ($\mu_{surface}$) provient essentiellement des mécanismes d'adhésion et d'hystérésis. La modélisation de ces mécanismes ne fait pas partie de cette étude et $\mu_{surface}$ est donc déterminé par la mesure du coefficient de frottement à l'état propre (μ_{propre} , voir Chap. 5). On a vu dans le chapitre 6 que les quantités de particules utilisées dans cette étude ne permettent pas de

recouvrir complètement la surface des échantillons. Le coefficient de frottement mesuré après le dépôt et le compactage des particules (étape 1 du protocole, voir Chap. 4) ne correspond donc pas à μ_{film} , qui doit être déterminé. Comme indiqué dans le chapitre 5 (paragraphe 5.3), il n'était pas possible de mesurer expérimentalement la valeur de μ_{film} avec les quantités de particules utilisées (concentrations variant de 10g/m² à 80g/m²). Il était donc décidé de déterminer ce coefficient de frottement limite à partir de l'ajustement de l'équation (7.1) sur les données expérimentales.

Le taux de recouvrement a été défini dans un premier temps à partir des travaux de Higgs et Wornoyoh (2008) (7.3.1) et des constats dans cette thèse sur le lien étroit entre le frottement et la masse des particules (7.3.2). Cependant, aucune des deux approches n'est satisfaisante et un modèle spécifique a été développé (7.3.3). La modélisation du taux de recouvrement fait donc l'objet d'un paragraphe dédié qui est présenté ci-dessous.

7.3. Modélisation de taux de recouvrement

7.3.1. Utilisation de la hauteur locale du film de particules

Higgs et Wornoyoh (2008) ont défini le taux de recouvrement X par l'équation suivante :

$$X = \frac{h}{h_{\text{max}}} \quad (7.2)$$

Où h : hauteur locale du film des particules à une étape (i) ; h_{max} : hauteur maximale du film qui couvre toute les aspérités de la surface (Figure 7.1).



Figure 7.1 Schématisation des hauteurs du film des particules

La première approche proposée pour déterminer le paramètre X est basée sur la détermination des hauteurs du film des particules à partir des cartographies 3D réalisées lors des essais (mesurées avant et après chaque mesure de frottement). La hauteur du film est obtenue par la soustraction de la surface propre de la surface contaminée à chaque étape. Les paramètres étudiés sont respectivement S_q , V_{VV} et $(V_{VC} + V_{VV})$ (voir Chap. 4, Tab. 4.2 pour les définitions). Les valeurs de h_{max} correspondent aux valeurs de ces paramètres pour une surface propre (étape 0). Il a été observé que les valeurs du paramètre h mesurées à une étape (i) sont parfois supérieures à celles de h_{max} . Ces résultats peuvent être expliqués par le dépôt des particules sur les sommets des aspérités (également observée par Dougherty et al., 2011), ce qui augmente artificiellement la rugosité de la surface (Figure 7.2). Cette méthode n'est pas adaptée au modèle utilisé qui suppose que h_i soit inférieure à h_{max} . A cet égard, cette approche a été abandonnée.

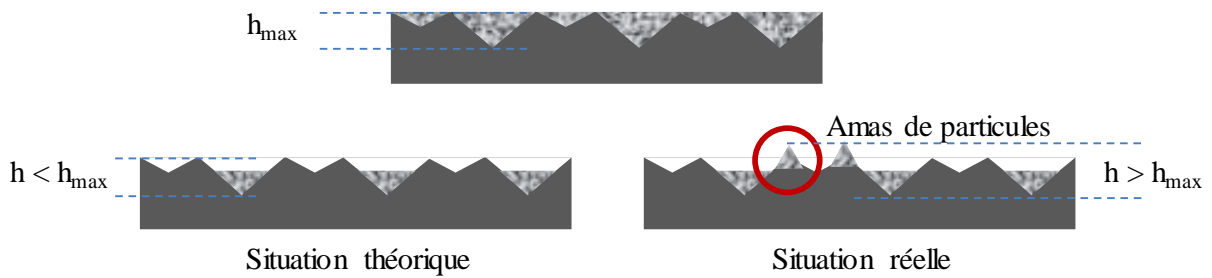


Figure 7.2 Dépôt des particules sur les sommets d'aspérités

7.3.2. Utilisation de la masse des particules

Dans ses travaux sur la lubrification par des particules poudreuses, Heshmat (1993) a observé que l'évolution du coefficient de frottement dépend de la quantité disponible de poudres (3^{ème} corps) à l'interface entre les deux premiers corps. Cet auteur définit alors un indice appelé « indice de sous-alimentation » (starvation en anglais) pour caractériser l'évolution du film de lubrifiant constitué de particules poudreuses à partir d'un état continu initialement. L'indice de sous-alimentation est égal au ratio entre la quantité de poudre disponible et la quantité de poudre initiale (film continu). La variation du coefficient de frottement avec l'indice de sous-alimentation (Figure 7.3) rappelle l'allure des graphes présentés dans le chapitre 5 (Figure 5.19 et Figure 5.20) avec une augmentation brusque du coefficient de frottement lorsque la masse des particules est inférieure à une valeur limite.

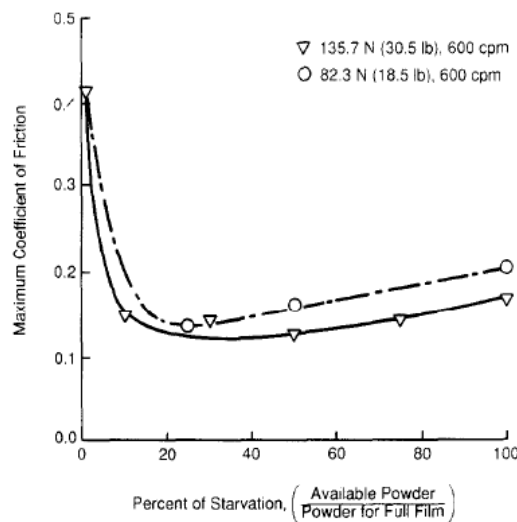


Figure 7.3 Variation du coefficient de frottement avec le pourcentage de sous-alimentation (Heshmat, 1993)

Nous avons donc posé :

$$X = I_{\text{sous-alim}} = \frac{m_i}{m_1} \quad (7.3)$$

Où m_i : masse de particules à l'étape (i) ; et m_1 : masse de particules après leur dépôt et leur compactage.

L'équation (7.3) suppose que le taux de recouvrement suive une évolution linéaire avec la masse des particules. Intégrant (7.3) dans (7.1), il était donc possible de calculer un coefficient de frottement. Une première comparaison entre le modèle et la mesure expérimentale (Figure 7.4, ligne en pointillés) montre une surestimation du coefficient de frottement par le modèle. Deux explications sont possibles pour interpréter cet écart : 1) m_1 ne représente pas la masse de particules recouvrant complètement la surface de l'échantillon ; ou 2) l'hypothèse d'une variation linéaire du taux de recouvrement avec la masse n'est pas correcte.

Pour tester la deuxième explication, un exposant (n) a été ajouté au facteur X afin de prendre en compte la non-linéarité de l'évolution de la masse (décroissance initiale rapide puis ralentissement du phénomène avant d'atteindre une valeur seuil), donnant pour le coefficient de frottement μ_i à l'étape (i) :

$$\mu = X^n \mu_{\text{film}} + (1 - X^n) \mu_{\text{surface}} \quad (7.4)$$

Un exemple de comparaison du modèle issu de l'équation (7.1) ($n = 1$) et du modèle issu de l'équation (7.4) ($n = 0.28$, déterminé par ajustement) avec les mesures expérimentales est présenté dans la Figure 7.4.

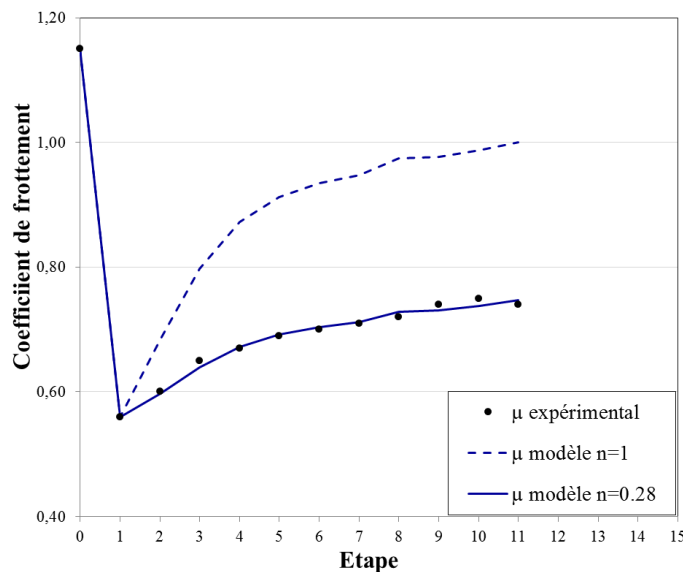


Figure 7.4 Comparaison entre le modèle proposé et la mesure (aluminium grenailé, concentration 20g/m², fraction 0-100 μ m)

On peut observer qu'en ajoutant un exposant n , le modèle proposé (Eq. 7.4) reproduit bien l'évolution expérimentale du frottement, et particulièrement, l'augmentation du coefficient de frottement à partir de son minimum et sa stabilisation. Les mêmes tendances sont observées pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations initiales des particules. Les valeurs ajustées de l'exposant (n) sont présentées dans la Figure 7.5.

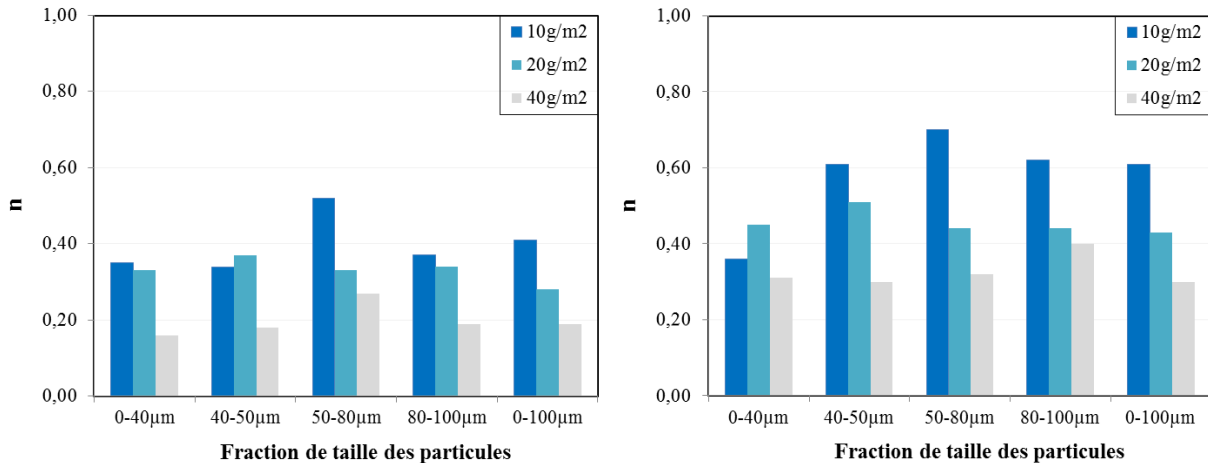


Figure 7.5 Valeurs de (n) pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations des particules : a) Sablé ; b) Sablé Strié

L'exposant (n) généralement diminue quand la concentration initiale des particules augmente et il semble ne pas dépendre de la fraction de taille des particules pour une concentration donnée. Par ailleurs, des analyses statistiques ont été réalisées afin d'étudier plus précisément la dépendance de (n) des caractéristiques des particules (le diamètre moyen en surface $D[3,2]$, le diamètre moyen en volume $D[4,3]$), de la rugosité de surface (S_q , V_{vc}) et de celles liées au film des particules (concentration initiale, μ_{min} , μ_{stab}). Ces analyses montrent une corrélation importante entre (n) et la concentration initiale des particules avec un coefficient de Pearson* égal à -0,694. De même, une corrélation plus faible est trouvée avec les paramètres de rugosité de la surface (S_q et V_{vc}) avec un coefficient de Pearson égal à 0,543. En étudiant la corrélation entre (n) et μ_{stab} et μ_{min} , on obtient des coefficients de 0,388 et 0,243 ; ce qui est faible. Ces résultats, présentés en détails dans l'annexe C, ne sont pas suffisants pour identifier la signification physique de l'exposant (n). En conséquence, une autre approche a été recherchée en utilisant les acquis du chapitre 6 sur les flux de particules.

* Coefficient de corrélation, noté r , permettant d'établir le niveau de validité de la relation linéaire entre deux variables x et y .

7.3.3. Utilisation des flux de particules

7.3.3.1. Modèle d'adsorption et d'enlèvement de dépôts gazeux (Dickrell et al (2004))

Dickrell et coauteurs (2004) ont modélisé le coefficient de frottement résultant du contact entre un pion fixe en acier et un disque en rotation en acier recouvert d'un film de carbone amorphe (ou DLC pour diamond-like carbon) (essai pion/disque). Le modèle tient compte de deux mécanismes qui se produisent simultanément à chaque rotation (Dickrell et al., 2004) : le dépôt et l'enlèvement des contaminants sur le disque. En effet, entre deux rotations successives (numérotées $(i - 1)$ et (i) dans la Figure 7.6), la surface du disque peut recevoir un dépôt dû aux vapeurs d'eau ou d'autres gaz présents dans l'environnement du disque (taches oranges dans la Figure 7.6) et, en parallèle, une partie des dépôts est enlevée par le frottement entre le pion et le disque (réduction de la surface des taches en haut de la Figure 7.6).

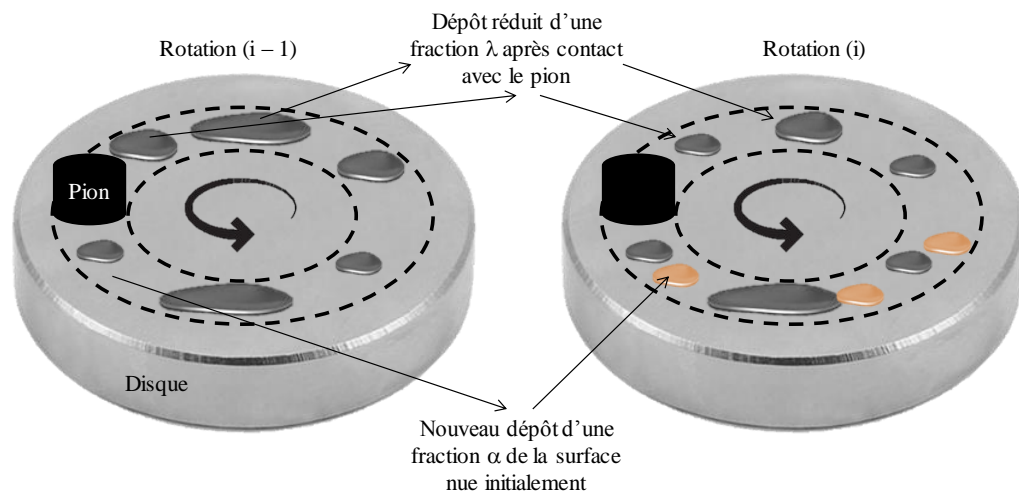


Figure 7.6 Schématisation des phénomènes d'adsorption et d'enlèvement des dépôts gazeux (d'après Dickrell et al., 2004)

Le modèle de Dickrell et al (2004) présente un séquençement de taux de recouvrement pour des rotations du disque. Ce modèle suppose que :

- Il existe un recouvrement initial de la surface ($0 < X_0 < 1$) par des contaminants gazeux.
- L'adsorption des contaminants est caractérisée par un ratio d'adsorption α ($0 < \alpha < 1$) qui représente la fraction de la surface qui était nue à la fin de la rotation $(i - 1)$ et devient recouverte pendant la rotation (i) .
- L'enlèvement des contaminants est présentée par un ratio d'enlèvement γ ($0 < \gamma < 1$) qui représente la fraction de la surface qui était recouverte à la fin de la rotation $(i - 1)$ et devient nue à la sortie du contact avec le pion au début de la rotation (i) .

L'évolution du taux de recouvrement est illustrée dans pour les premiers passages. Le pion est considéré comme fixe et les indexes entrée/sortie se réfèrent aux moments où une zone du disque entre et sort du contact avec le pion.

Tableau 7.1 Expressions analytiques du taux de recouvrement lors des premières rotations (Dickrell et al., 2004)

$X_{0\text{ entrée}} = X_0$	$= X_0$
$X_{0\text{ sortie}} = \gamma X_0$	$= \gamma X_0$
$X_{1\text{ entrée}} = X_{0\text{ sortie}} + (1 - X_{0\text{ sortie}}) \alpha$	$= \gamma X_0 + \alpha - \gamma \alpha X_0$
$X_{1\text{ sortie}} = \gamma X_{1\text{ entrée}}$	$= \gamma(\gamma X_0 + \alpha - \gamma \alpha X_0)$
$X_{2\text{ entrée}} = X_{1\text{ sortie}} + (1 - X_{1\text{ sortie}}) \alpha$	$= \gamma^2 X_0 + \gamma \alpha - 2\gamma^2 \alpha X_0 + \alpha - \gamma \alpha^2 + \gamma^2 \alpha^2 X_0$
$X_{2\text{ sortie}} = \gamma X_{2\text{ entrée}}$	$= \gamma(\gamma^2 X_0 + \gamma \alpha - 2\gamma^2 \alpha X_0 + \alpha - \gamma \alpha^2 + \gamma^2 \alpha^2 X_0)$

Pour un nombre de rotations (n), la variation du taux de recouvrement X due aux mécanismes d'adsorption et d'enlèvement s'écrit de la manière suivante :

$$\Delta X = X_{n,\text{entrée}} - X_{n-1,\text{entrée}} \quad (7.5)$$

Le taux de recouvrement à la rotation (n) est égal au taux de recouvrement initial (X_0) plus la somme des variations de taux de recouvrement (ΔX) jusqu'à (n), comme le montre l'équation 7.6 :

$$X_{n,\text{entrée}} = X_0 + \left(\sum_{k=1}^n \gamma^{(k-1)} (1 - \alpha)^{(k-1)} \right) (\gamma X_0 + \alpha - \gamma \alpha X_0 - X_0) \quad (7.6)$$

Avec

$$\sum_{k=1}^n \gamma^{(k-1)} (1 - \alpha)^{(k-1)} = \frac{1 - (\gamma(1 - \alpha))^n}{1 - \gamma + \alpha\gamma} \quad (7.7)$$

Ainsi, le taux de recouvrement au cycle n s'écrit :

$$X_{n,\text{entrée}} = X_0 (\gamma(1 - \alpha))^n + \alpha \left(\frac{1 - \gamma^n (1 - \alpha)^n}{1 - \gamma(1 - \alpha)} \right) \quad (7.8)$$

7.3.3.2. Transposition du modèle de Dickrell à l'étude des particules

Même si les phénomènes impliqués sont très différents, on peut néanmoins établir des similarités entre l'étude de Dickrell et la présente étude :

- En termes de configuration d'essais, les rotations (ou cycles) du disque (ou du pion si on considère le disque comme fixe) correspondent aux passages du patin de mesure SRT sur la surface contaminée.
- En termes de phénomènes :
 - L'adsorption du dépôt gazeux correspond au dépôt des particules qui sont soulevées après le passage du patin et ensuite retombées sur la surface (observations à la caméra rapide au Chapitre 6). Le ratio α exprime donc la fraction de surface couverte par des particules tombantes ; α sera désigné par « ratio de recirculation ». Le mot « recirculation » est utilisé car il s'agit des particules déjà existantes dans le circuit tribologique qui sont soulevées (ou éjectées) puis retombées (ou remises dans le circuit).
 - L'enlèvement du dépôt gazeux correspond à l'éjection définitive des particules par le patin. Le ratio γ exprime donc la fraction de surface découverte après l'éjection des particules qui s'y déposaient ; γ sera désigné par « ratio d'éjection ».

Le taux de recouvrement à une étape (i) s'écrit donc sous une forme similaire à celle de l'équation (7.8), à savoir :

$$X_i = X_1 (\gamma(1 - \alpha))^{i-1} + \alpha \left(\frac{1 - \gamma^{i-1}(1 - \alpha)^{i-1}}{1 - \gamma(1 - \alpha)} \right) \quad (7.9)$$

On peut noter que le taux de recouvrement initial est X_1 car dans cette étude l'étape 0 correspond à un état propre (non pris en compte par le modèle). De ce fait, l'exposant des termes liés à α et λ est (i - 1) et non pas (i).

Pour la détermination du taux de recouvrement initial (X_1), on suppose que les particules s'étalent d'une manière homogène sur la surface. Connaissant la masse des particules à l'étape 1 (m_1), la densité des particules ρ et la surface de la plaque S , une hauteur équivalente du film des particules h_1 est calculée par l'équation suivante :

$$h_1 = \frac{m_1}{\rho \times S} \quad (7.10)$$

A partir des cartographies sur la surface propre de chaque plaque d'aluminium, le taux de recouvrement initial (X_1) équivalant à la hauteur du film estimée (h_1) est déterminé. En utilisant le logiciel MountainsMap®, la méthode consiste à seuiller la surface à partir du point le plus profond des creux jusqu'à la hauteur estimée h_1 et de mesurer le volume des vides équivalent à cette hauteur

(Figure 7.7). Connaissant le volume des vides de la surface avant seuillage, le taux de recouvrement initial est calculé à partir de l'équation suivante :

$$X_1 = \frac{(V_{vc} + V_{vv})_{h1}}{(V_{vc} + V_{vv})_{total}} \quad (7.11)$$

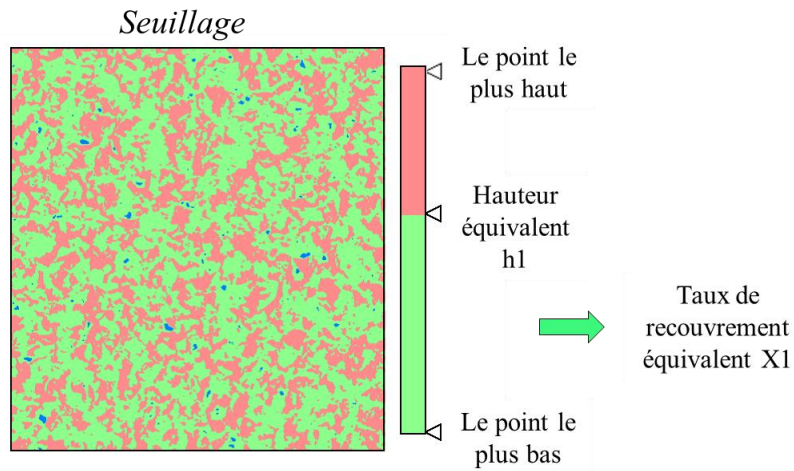


Figure 7.7 Détermination du taux de recouvrement initial à partir d'une cartographie 3D

Du fait qu'il n'y a pas eu de mesure du taux de recouvrement, l'équation (7.9) est incorporée dans l'équation (7.1) qui est ensuite ajustée sur les mesures de coefficient de frottement. Cet ajustement fournira les paramètres α et λ et aussi le μ_{film} .

7.4. Résultats de la modélisation

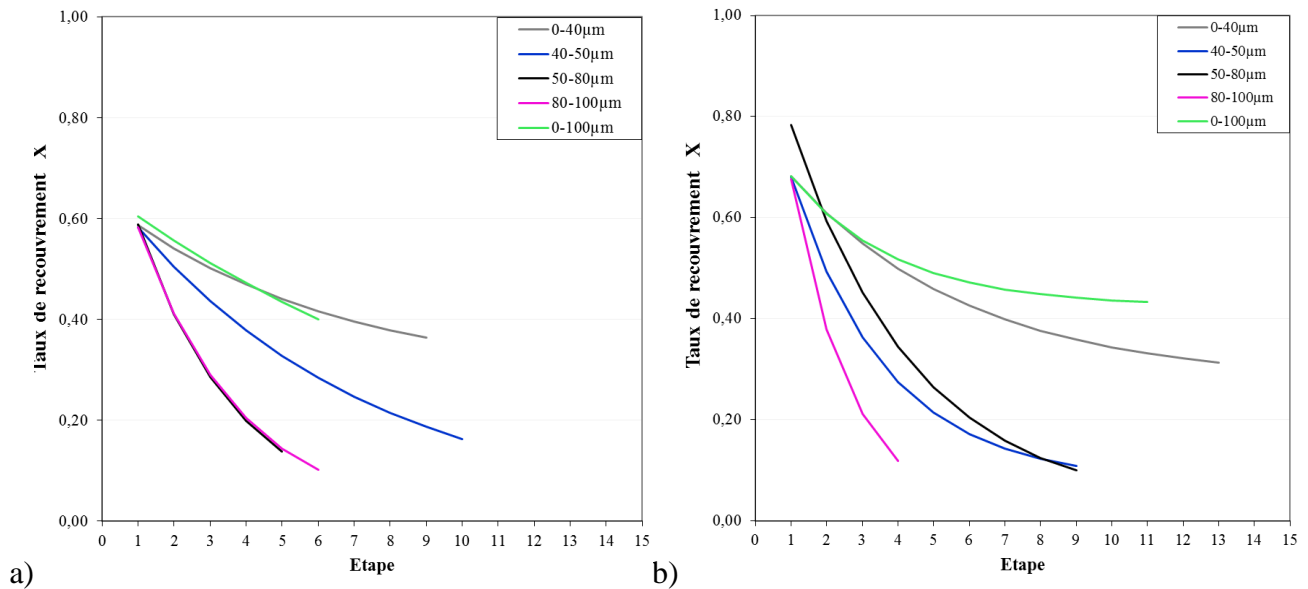
7.4.1. Taux de recouvrement

Les valeurs des paramètres du modèle de recouvrement sont groupées dans le Tableau 7.2.

Tableau 7.2 Valeurs des données du modèle de frottement pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations initiales des particules

Concentration initiale	Fraction de taille	Echantillon Sablé			Echantillon Sablé Strié			$\mu_{surface}$	μ_{film}
		X_0	α	γ	X_0	α	γ		
10g/m ²	0-40 μ m	0,587	0,041	0,889	0,620	0,034	0,814	1,10	0,28
	40-50 μ m	0,583	0,002	0,863	0,681	0,018	0,752		
	50-80 μ m	0,589	0,000	0,697	0,586	0,035	0,459		
	80-100 μ m	0,583	0,000	0,705	0,575	0,030	0,451		
	0-100 μ m	0,604	0,000	0,882	0,620	0,034	0,814		
20g/m ²	0-40 μ m	0,682	0,050	0,862	0,759	0,145	0,657		
	40-50 μ m	0,681	0,025	0,705	0,754	0,052	0,485		
	50-80 μ m	0,783	0,006	0,756	0,749	0,015	0,580		
	80-100 μ m	0,677	0,000	0,560	0,772	0,000	0,528		
	0-100 μ m	0,682	0,122	0,812	0,759	0,051	0,866		
40g/m ²	0-40 μ m	0,922	0,173	0,882	1,016	0,202	0,578		
	40-50 μ m	0,922	0,143	0,856	0,963	0,071	0,644		
	50-80 μ m	0,950	0,031	0,755	0,952	0,055	0,581		
	80-100 μ m	0,891	0,074	0,680	0,897	0,028	0,528		
	0-100 μ m	0,908	0,296	0,587	1,034	0,286	0,469		

Le taux de recouvrement calculé en fonction des étapes du protocole est présenté dans la Figure 7.8 et la Figure 7.9.



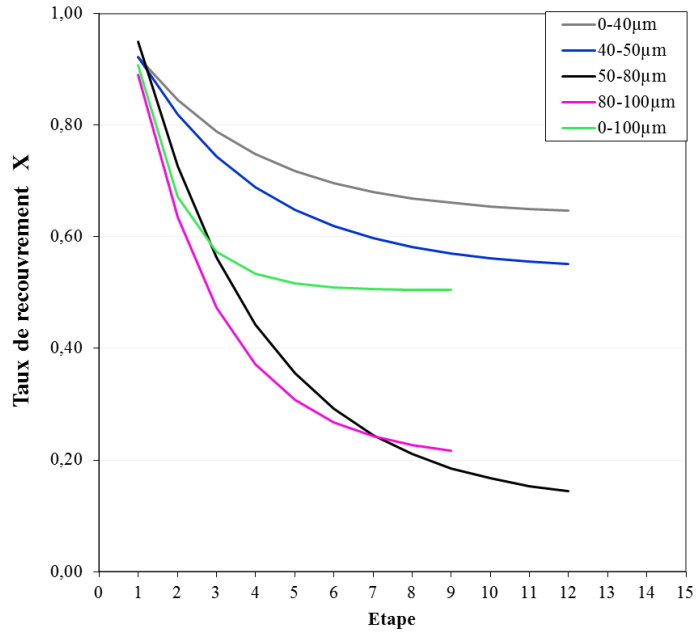
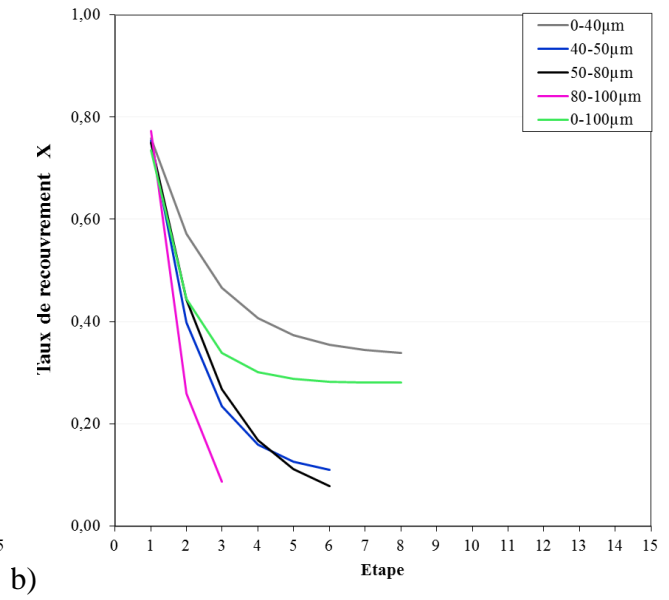
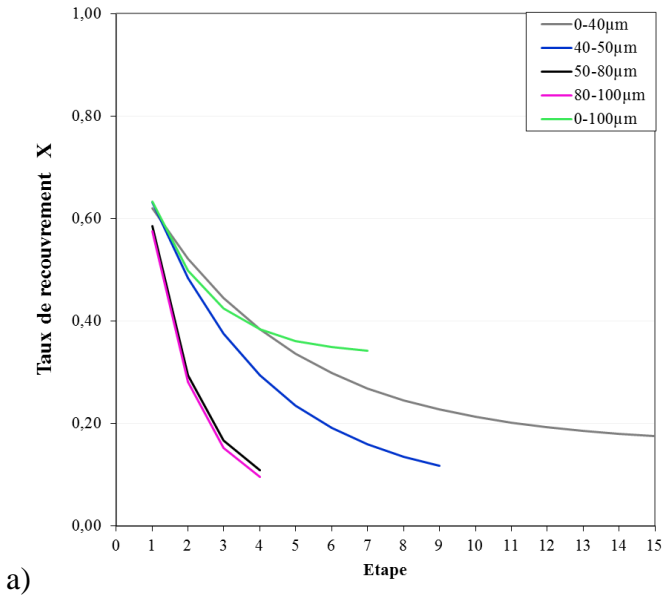
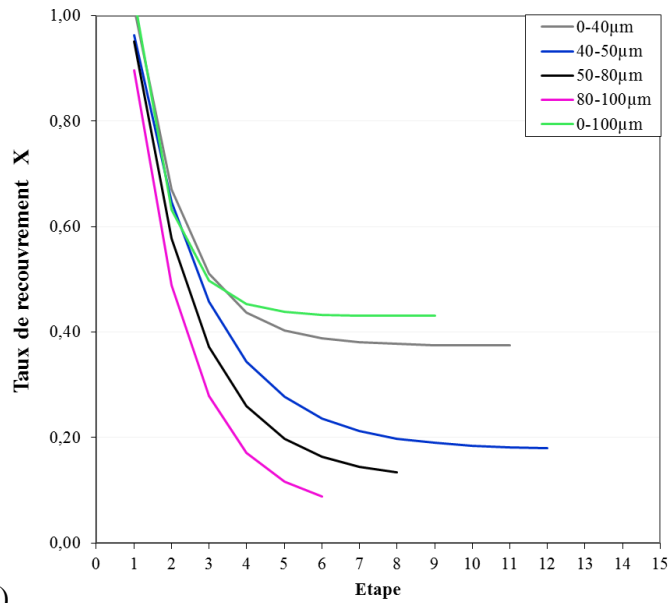


Figure 7.8 Evolution du taux de recouvrement calculée en fonction des étapes du protocole: échantillon Sablé ; concentration initiale des particules a) 10g/m² b) 20g/m² c) 40g/m²

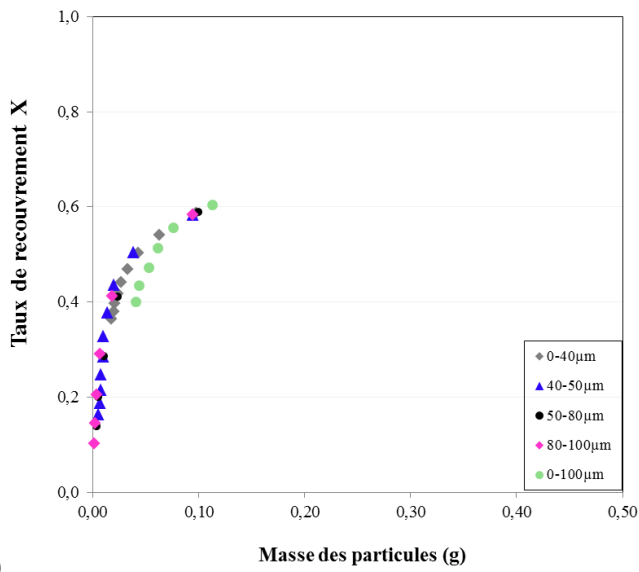




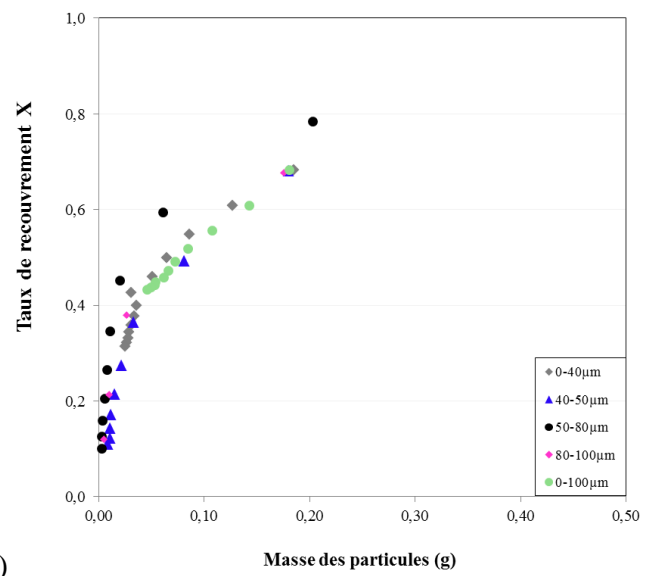
c) Figure 7.9 Evolution du taux de recouvrement calculé en fonction des étapes du protocole : échantillon Sablé Strié ; concentration initiale des particules a) 10g/m² b) 20g/m² c) 40g/m²

Les courbes de taux de recouvrement montrent une hiérarchie logique par rapport à la taille des particules. Les fractions de tailles 0-40µm et 0-100µm présentent un taux de recouvrement qui diminue plus lentement avec les passages du patin et se stabilise à un niveau plus important à la fin d'essai. Plus la taille des particules est importante, plus le taux de recouvrement de la surface à la fin d'essai est faible. Ce modèle décrit également le phénomène de piégeage des particules par la texture. Même si dans les mesures de masse, présentées dans le chapitre 5 partie 5.3, la masse est relativement faible, on voit que le taux de recouvrement final, quand le coefficient de frottement se stabilise, reste significatif notamment pour les fractions 0-40µm et 0-100µm (exception faite du cas de l'échantillon Sablé avec une concentration de 40g/m², Figure 7.8c).

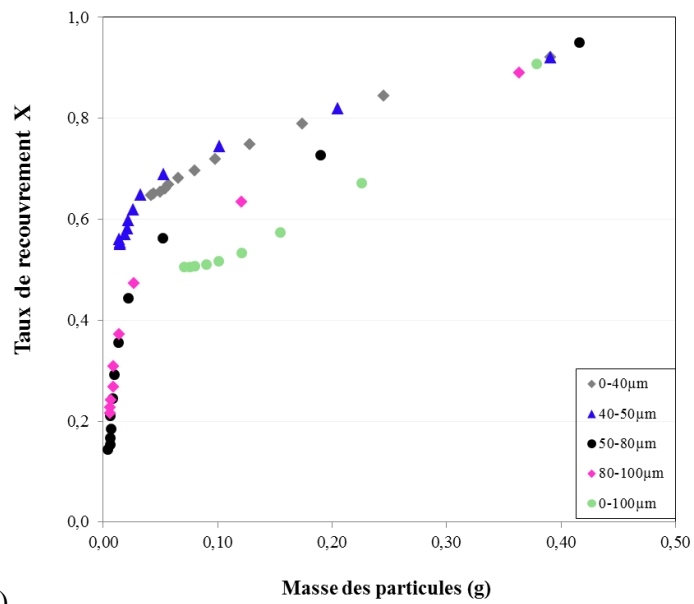
La Figure 7.10 et la Figure 7.11 montrent l'évolution du taux de recouvrement en fonction de la masse des particules. Toutes les fractions de taille sont présentées dans la même figure pour les trois concentrations initiales des particules.



a)



b)



c)

Figure 7.10 Taux de recouvrement calculé en fonction de la masse des particules sur la plaque Sablé pour les cinq fractions de tailles et concentration initial a) 10g/m² ; b) 20g/m² ; b) 40g/m²

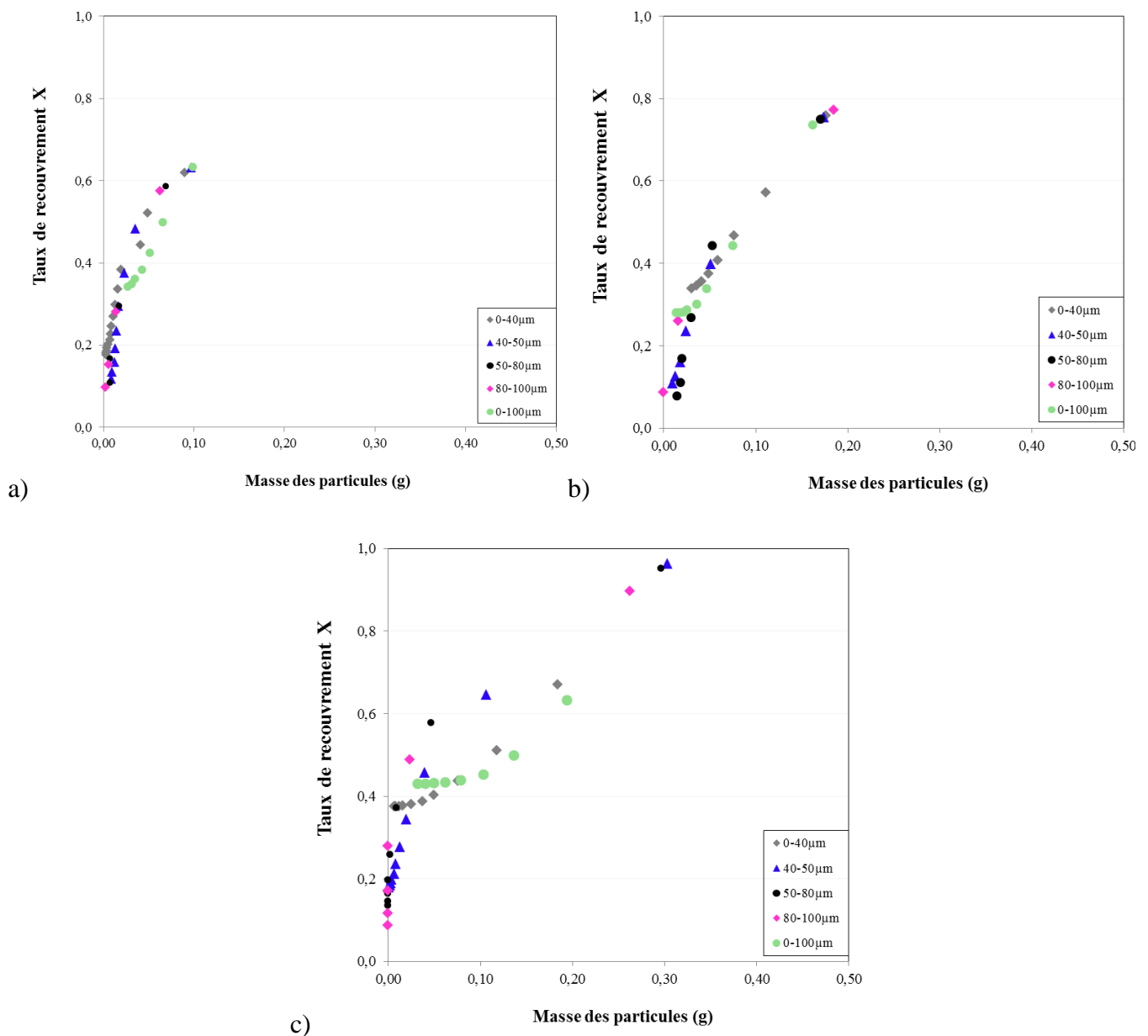


Figure 7.11 Taux de recouvrement calculé en fonction de la masse des particules sur la plaque Sablé Strié pour les cinq fractions de tailles et concentration initial a) 10g/m² ; b) 20g/m² ; c) 40g/m²

Suivant le modèle, on voit que le taux de recouvrement ne suit pas une évolution linéaire avec la masse des particules : pour des masses inférieures à 0,05g environ, le taux de recouvrement augmente rapidement ; pour les masses supérieures, le taux de recouvrement continue à augmenter mais moins rapidement. Le seuil de 0,05g (déterminé à l'œil nu) pourrait être relié aux masses limites calculées dans le paragraphe 5.4.3.2 à partir du volume des vides dans les vallées de la surface (V_v) qui sont de 0,046g et 0,032g pour les échantillons Sablé et Sablé Strié respectivement. Le taux de recouvrement pour de faibles masses de particules (à la fin d'une série d'essais) correspondrait donc

à un remplissage des vallées de surface. Lorsque toutes les vallées sont remplies, le taux de recouvrement dépend des caractéristiques des particules.

En effet, on observe que, pour les concentrations 10g/m^2 et 20g/m^2 , le taux de recouvrement suit une courbe maîtresse pour toutes les tailles des particules et pour les deux échantillons. Pour la concentration 40g/m^2 , certaines dispersions sont observées. Il y aurait donc une concentration limite en dessous de laquelle les particules remplissent les creux de la surface quelles que soient leurs tailles. Cette limite pourrait correspondre au remplissage des volumes $V_{vv} + V_{vc}$ comme on a vu dans le paragraphe 5.4.3.2 ; les masses limites correspondantes de particules sont de $0,443\text{g}$ et $0,310\text{g}$ pour les échantillons Sablé et Sablé Strié respectivement. Pour des quantités supérieures, les particules ne sont pas bloquées par les creux de surface et leur distribution dépendrait de nombreux paramètres comme leurs tailles et formes, leurs poids, etc. Ainsi, sur l'échantillon Sablé, on voit que, pour la même masse, les fractions $0-40\mu\text{m}$ et $40-50\mu\text{m}$ recouvrent plus de surface que les fractions $50-80\mu\text{m}$ et $80-100\mu\text{m}$ (Figure 7.10c). Cette tendance serait logique si l'on considère que, pour la même masse, il y a plus de particules fines donc plus de possibilités de recouvrement et de plus, les particules fines sont plus facilement soulevées par le passage du patin SRT et leur dispersion dans l'air donnerait plus de recouvrement de la surface.

Il reste le cas de l'échantillon Sablé Strié où la hiérarchie des tailles de particules discutée ci-dessus n'est plus visible (Figure 7.11c) où aucune explication plausible n'a pu être trouvée. Pour le cas de la fraction $0-100\mu\text{m}$ où un taux de recouvrement minimal est observé malgré une diminution de la masse des particules, nous pensons que la présence de l'argile dans cette fraction pourrait être à l'origine de ce taux minimal sans pouvoir fournir une explication sur les mécanismes.

Les Figure 7.12 et Figure 7.13 présentent les valeurs des paramètres γ et α qui représentent respectivement le ratio d'éjection et le ratio de dépôt et de recirculation des particules. Il faut noter que, du fait les ajustements sont faits pour toutes les étapes du protocole, le modèle suppose implicitement que les valeurs de α et λ restent constantes au cours d'une série d'essais. En attendant une vérification de cette hypothèse (qui peut faire partie des travaux dans le futur), l'interprétation des valeurs des paramètres α et λ doit être faite avec précaution.

Les Figure 7.12a et Figure 7.13a montrent que le ratio d'éjection diminue quand la taille des particules augmente. Selon les observations présentées dans le chapitre 6, les particules des fractions $0-40\mu\text{m}$ et $40-50\mu\text{m}$ sont éjectées à toutes les étapes (étapes 1 et 3 observées, voir 6.2.2) ; pour les particules de la fraction $80-100\mu\text{m}$, l'éjection est importante à l'étape 1 et inexistante aux étapes suivantes. En moyenne, l'éjection des particules des fractions $0-40\mu\text{m}$ et $40-50\mu\text{m}$ est donc plus importante que celle des particules des fractions $50-80\mu\text{m}$ et $80-100\mu\text{m}$; c'est ce que l'on observe sur les Figure 7.12a et Figure 7.13a.

Les Figure 7.12b et Figure 7.13b montrent que le ratio de recirculation est plus important quand la taille des particules est plus faible et quand la concentration initiale des particules est plus importante. Concernant la taille des particules, on peut supposer que plus elles sont fines plus leur dispersion sera facilitée induisant un recouvrement de surface plus important (les observations avec

la caméra rapide au paragraphe 6.3.2 ne permettent pas de voir ce phénomène). Concernant la concentration, on peut imaginer qu'une quantité plus importante de particules induit une quantité proportionnelle de particules soulevées et retombées sur la surface, d'où un ratio de recirculation plus élevé.

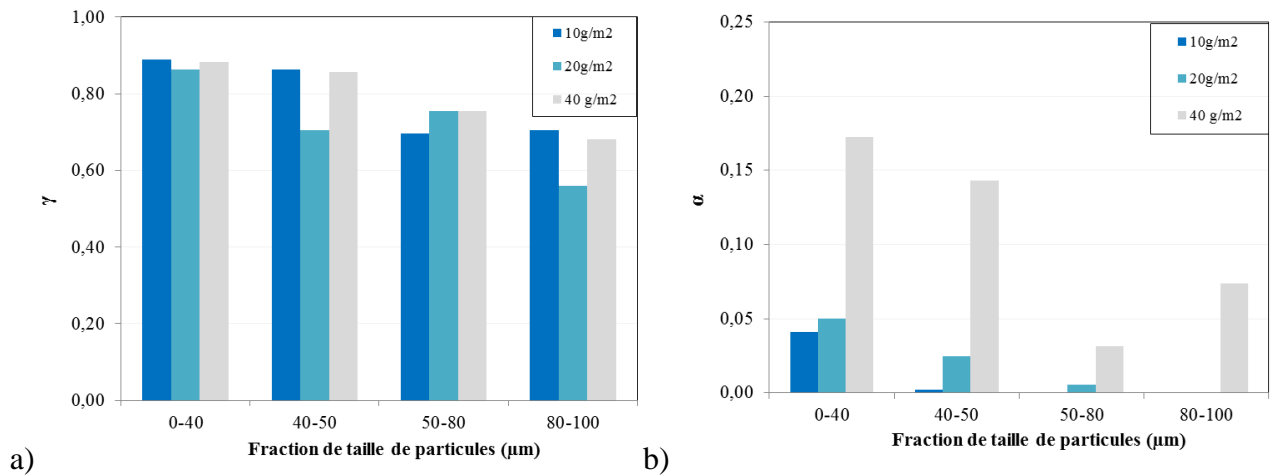


Figure 7.12 Valeurs de γ et de α pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations des particules sur l'échantillon Sablé

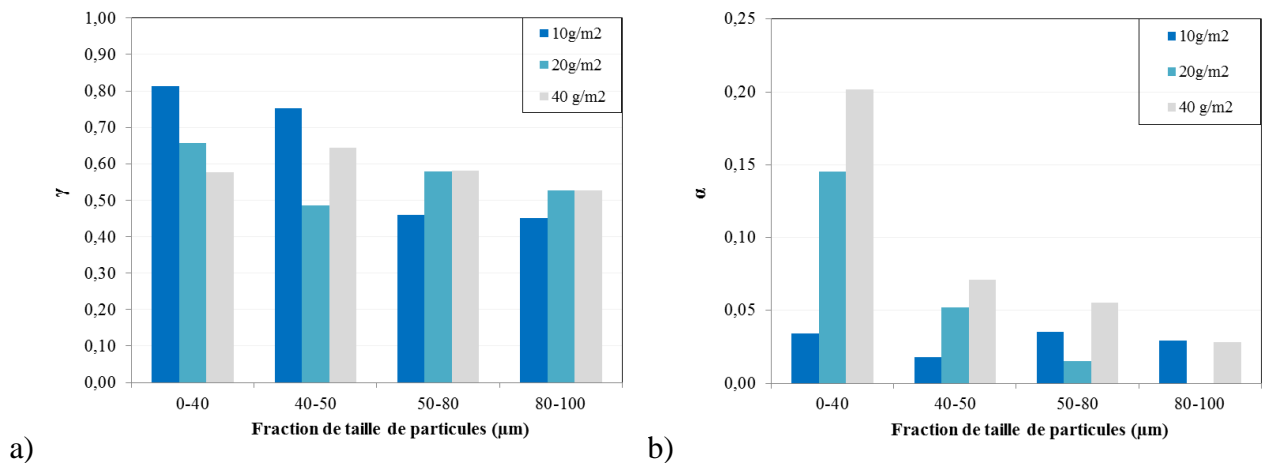


Figure 7.13 Valeurs de γ et de α pour toutes les fractions de taille et toutes les concentrations des particules sur l'échantillon Sablé Strié

7.4.2. Frottement

Pour le calcul de frottement utilisant les équations (7.1) et (7.9), μ_{surface} est obtenu en moyennant toutes les mesures du coefficient de frottement à l'état propre. Ce calcul est justifié par le constat fait au paragraphe 5.3.1 selon lequel, compte tenu de la précision du pendule SRT, un coefficient de frottement moyen de 1,10 peut être considéré comme commun aux deux échantillons Sablé et Sablé

Strié. Pour le μ_{film} , on considère qu'il ne devrait pas dépendre des configurations d'essais (en termes de taille et de concentration des particules) puisqu'il représente le coefficient de frottement sur une couche de particules. La valeur retenue est par convention la moyenne des valeurs de μ_{film} obtenues à la concentration 20g/m² pour les cinq fractions, soit $\mu_{\text{film}} = 0,28$ avec un écart-type de 0,058.

Les résultats du modèle de frottement comparés aux mesures expérimentales (Chapitre 5) sont présentés dans les Figure 7.14 et Figure 7.15 pour les deux surfaces d'essai (Sablé et Sablé Strié), les trois concentrations initiales et les cinq fractions de tailles des particules.

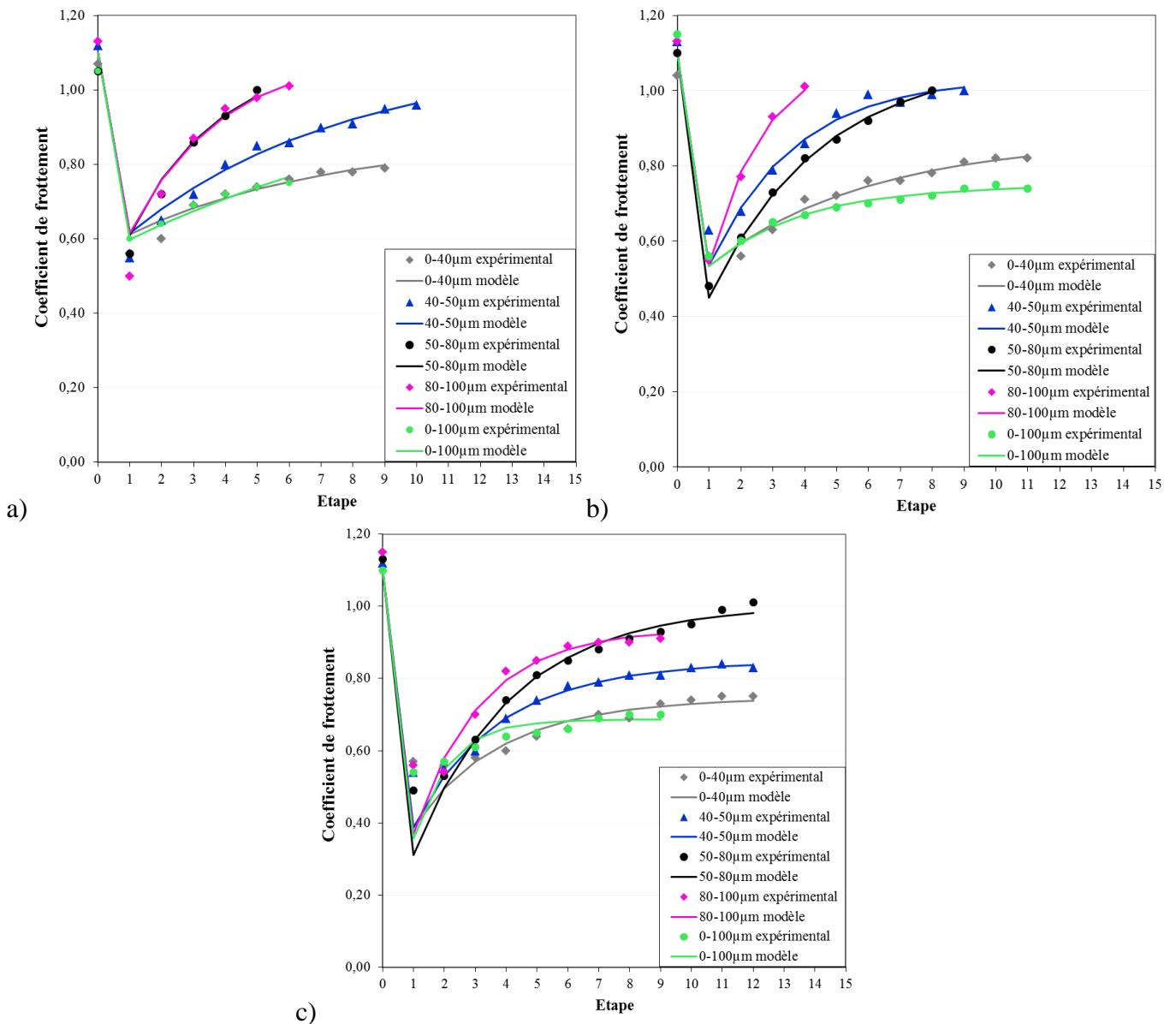


Figure 7.14 Comparaison des résultats expérimentaux et du modèle : échantillon Sablé, concentration initiale des particules a) 10g/m² b) 20g/m² c) 40g/m²

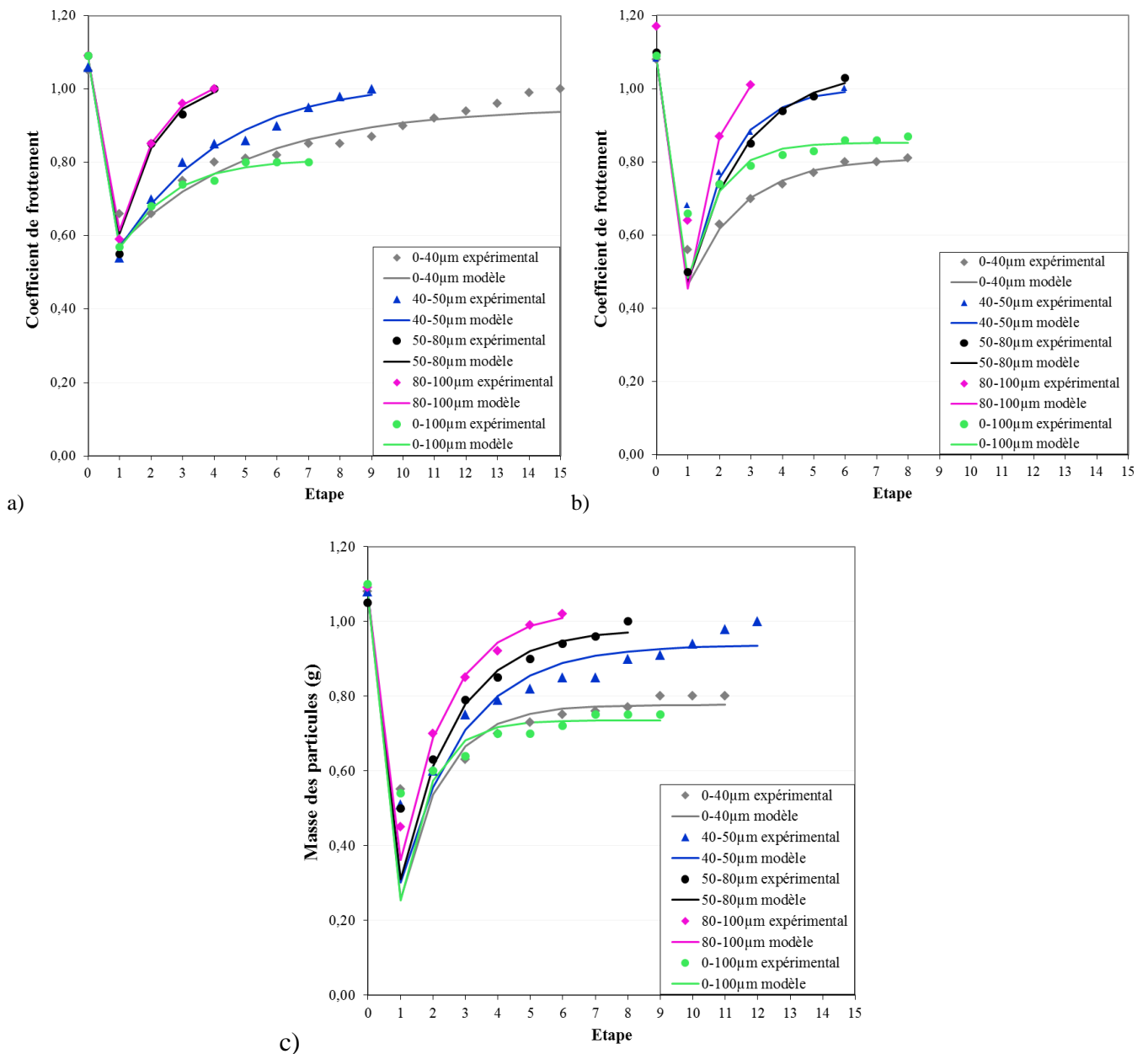


Figure 7.15 Comparaison des résultats expérimentaux et du modèle : échantillon Sablé Strié, concentration initiale des particules a) 10g/m² b) 20g/m² c) 40g/m²

On peut voir sur les différentes figures la capacité du modèle proposé à décrire le comportement en frottement sur les surfaces contaminées. L'accord entre le modèle et les mesures est satisfaisant pour toutes les configurations d'essais. On voit néanmoins que le modèle sous-estime le niveau de frottement à l'étape 1 pour la concentration initiale de 40g/m². Ceci serait dû à une surestimation du taux de recouvrement à cette concentration induisant donc une part plus importante du frottement lubrifié μ_{film} dans le calcul du frottement global.

La Figure 7.16 montre deux exemples d'ajustement du modèle de frottement avec les termes $X \cdot \mu_{\text{film}}$ et $(1 - X) \cdot \mu_{\text{surface}}$ (l'état propre n'est pas montré pour ne pas encombrer le graphique).

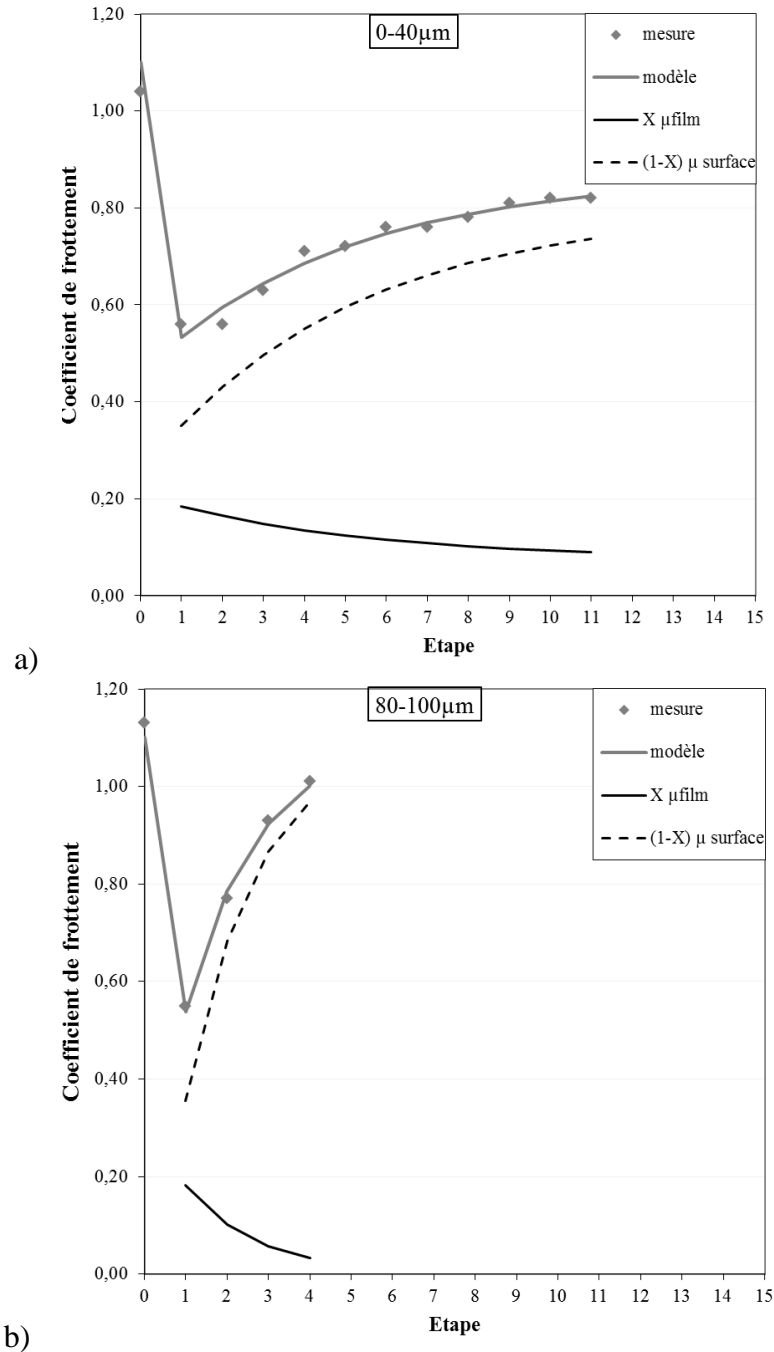


Figure 7.16 Frottement et les composantes liées à μ_{film} et μ_{surface} : échantillon Sablé, concentration 20g/m² a) fraction 0-40µm b) fraction 80-100µm

On voit que la composante de frottement liée au film de particules diminue avec le nombre de passages alors que la composante liée à la surface augmente. Cette observation corrobore ce qu'on observe pendant les essais et quantifiée par des analyses quantitatives comme celle de la masse des particules, à savoir, la quantité de particules présente à la surface diminue avec les passages du patin

SRT et de ce fait il y a de plus en plus de fraction de surface propre. La taille des particules a un impact sur l'évolution des deux termes de frottement. Sur la fraction 0-40 μm (Figure 7.16a), les deux termes évoluent progressivement, corroborant les observations au MEB de l'échantillon Sablé (6.2.1) des pastilles collectant des particules éjectées (6.2.2) qui montrent un enlèvement progressif des particules. On voit aussi que le terme $X \cdot \mu_{\text{film}}$ ne s'annule pas (dans la limite des passages étudiés) ce qui traduit bien l'effet de piégeage des particules (commenté dans les chapitres 5 et 6), qui continuent donc à lubrifier l'interface entre le patin et la surface. Sur la fraction 80-100 μm , le terme $(1 - X) \cdot \mu_{\text{surface}}$ croît très rapidement et le terme $X \cdot \mu_{\text{film}}$ atteint très vite la valeur nulle. De plus, on voit que le frottement global dépend essentiellement de la composante liée à la surface. Le modèle traduit donc une éjection très rapide des particules grossières et, de ce fait, la surface redevient propre après peu de passages du patin SRT.

7.5. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons développé un modèle permettant de calculer le frottement sur une surface contaminée par des particules. Le modèle de base est classique car il suit la règle de mélange linéaire (linear mixture rule en anglais) qui pondère la valeur du coefficient de frottement entre deux valeurs extrêmes ; dans le cadre de cette thèse, ces valeurs extrêmes sont respectivement les coefficients de frottement générés par un film continu de particules (μ_{film}) et par la surface de l'échantillon (μ_{surface}). La principale difficulté réside dans la modélisation du taux de recouvrement de la surface (X) sur laquelle tous efforts sont concentrés.

Trois approches ont été testées pour modéliser le taux de recouvrement. La première approche, basée sur une relation de proportionnalité entre le taux de recouvrement et l'épaisseur du film de particules, conduit rapidement à des incohérences liées au calcul des épaisseurs à partir des cartographies de hauteurs. La deuxième approche est basée sur l'utilisation de la masse des particules dont la relation avec le frottement a été démontrée dans le chapitre 5. Une relation linéaire entre le taux de recouvrement et la masse conduit à une surestimation du coefficient de frottement. Une relation non-linéaire, en ajoutant un exposant à la masse, permet d'ajuster le modèle sur les mesures expérimentales mais aucune signification physique n'a pu être déterminée pour l'exposant. Une modélisation plus complète a donc été menée en partant des flux de particules observées dans le chapitre 6 (caméra rapide) et en établissant un parallèle entre les mécanismes d'éjection et de recirculation des particules et les mécanismes d'adsorption et d'enlèvement des dépôts gazeux. Le modèle analytique développé par Dickrell et al (2004) a été transposé pour le calcul du taux de recouvrement de la surface par des particules.

Le modèle de taux de recouvrement a été incorporé dans le modèle de frottement et l'ensemble a été confronté aux mesures expérimentales du chapitre 5. Les ajustements sont très satisfaisants pour toutes les configurations d'essais (surface, taille et concentration de particules). L'interprétation des valeurs du taux de recouvrement, même si elles ne peuvent pas être mesurées dans le cadre de cette thèse, fournit de nouvelles connaissances sur les mécanismes de recouvrement et sur l'influence des

caractéristiques des particules. La variation des ratios d'éjection et de recirculation avec la texture de surface et les caractéristiques des particules corrobore les observations visuelles au MEB et à la caméra rapide (Chapitre 6). L'examen des deux termes de frottement liés respectivement au film de particules et à la surface corrobore les analyses du chapitre 5 et les observations visuelles du chapitre 6.

Chapitre 8

Phases de lessivage et de séchage

Plan du chapitre

8.1. Introduction.....	174
8.2. Frottement à l'interface.....	174
8.2.1. Calcul de la masse du mélange à partir des pesées.....	174
8.2.2. Evolution avec les états de contamination.....	175
8.2.3. Influence des caractéristiques liées aux particules, à la surface et à l'eau.....	177
8.2.3.1. Taille des particules.....	177
8.2.3.2. Texture de la surface.....	180
8.2.3.3. L'ajout d'eau.....	181
8.2.4. Relation entre le frottement et la masse du mélange.....	182
8.3. Vers une prédiction du frottement.....	184
8.3.1. Estimation de la fraction volumique des particules et d'eau dans le mélange.....	184
8.3.1.1. Hypothèses et application.....	184
8.3.1.2. Fraction volumique des particules dans le mélange.....	185
8.3.2. Estimation de la viscosité du mélange d'eau et des particules.....	190
8.3.2.1. Approche expérimentale.....	190
8.3.2.2. Approche théorique.....	191
8.3.2.3. Viscosité du mélange.....	195
8.3.3. Application au calcul du frottement.....	197
8.3.3.1. Modèle de frottement.....	197
8.3.3.2. Résultats.....	199
8.4. Conclusions.....	201

8.1.Introduction

Après avoir discuté l'effet des particules sèches situées dans l'interface sur le coefficient de frottement, ce chapitre est consacré à l'effet sur le frottement d'un mélange d'eau et de particules à l'interface. Les travaux réalisés dans le domaine routier sur l'évolution du frottement sur une surface contaminée lorsqu'il pleut, mettent en lumière les phénomènes rencontrés et leur impact sur le frottement de manière qualitative (Figure 8.1). Au travers de ce chapitre, nous essayons d'aller plus loin en représentant l'évolution frottement en fonction d'un indicateur quantitatif. La phase de dépôt (à sec) a été abordée dans les chapitres précédents. Les deux phases de lavage et de séchage seront traitées dans ce chapitre.

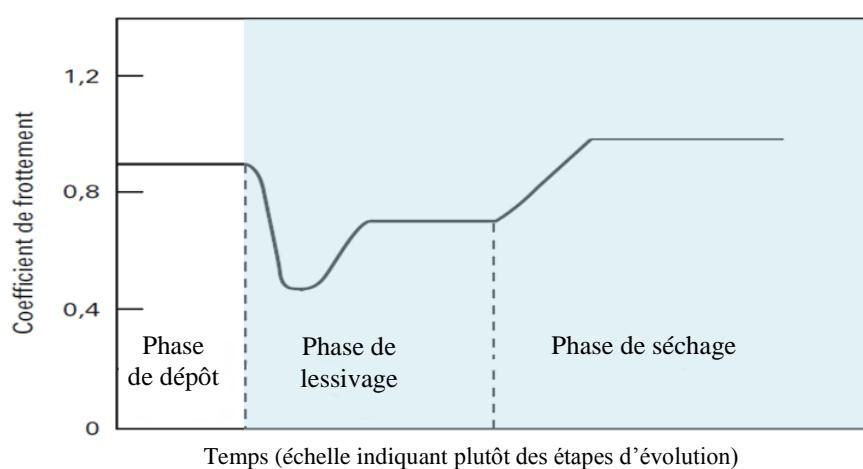


Figure 8.1 Phases étudiées

Le comportement du mélange de particules et d'eau à l'interface pneu/chaussée sera évalué par des mesures de frottement au pendule SRT et des mesures de masse du mélange avant et après chaque mesure de frottement. L'influence des caractéristiques des particules (taille) et du mélange (fraction volumique des particules dans l'eau) ainsi que des caractéristiques de la surface d'essai (microtexture, macrotexture) sur le frottement sera abordée. Dans le cas mouillé, il est compliqué de faire des visualisations à l'interface comme dans le cas sec. Ceci demande des outils spécifiques, comme un Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE). Dans ce chapitre on se limite à la mesure de frottement et de la masse du mélange. On détermine par la suite la viscosité du mélange.

8.2.Frottement à l'interface

8.2.1. Calcul de la masse du mélange à partir des pesées

Le protocole expérimental, présenté dans le chapitre 4 (paragraphe 4.6.3.2), consiste à simuler une phase de mouillage suivie par une phase de séchage sur une surface initialement contaminée par des particules.

- Dans la phase de mouillage, il s'agit de répéter des séquences de mouillage consistant à exposer l'échantillon pendant 10s au simulateur de pluie puis de mesure du coefficient de frottement. Le critère d'arrêt de ces séquences est défini de manière arbitraire par l'enregistrement de trois valeurs consécutives du coefficient de frottement qui ne diffèrent pas de plus de 0,01.
- Dans la phase de séchage, il s'agit de répéter des séquences consistant à laisser l'échantillon sécher pendant 60s puis à passer le patin du pendule SRT sur la surface de l'échantillon. Le critère d'arrêt de ces séquences est défini de manière arbitraire par l'enregistrement de trois valeurs consécutives du coefficient de frottement qui ne diffèrent pas de plus de 0,01 ou lorsque le coefficient de frottement dépasse 1.

Entre chaque mesure de frottement et chaque étape de mouillage/ séchage, la plaque est pesée et la quantité du mélange présente sur la surface est déduite (en connaissant la masse de la plaque propre). Les formules adoptées pour déterminer la masse des particules à chaque étape sont présentées ci-dessous :

$$m_{\text{mélange},i}^{\text{avant}} = m_{\text{échantillon},i}^{\text{avant}} - m_0 \quad (8.1)$$

$$m_{\text{mélange},i}^{\text{après}} = m_{\text{échantillon},i}^{\text{après}} - m_0 \quad (8.2)$$

$$m_{\text{mélange},i}^{\text{avant mouillage/séchage}} = m_{\text{mélange},i}^{\text{après SRT}} \quad (8.3)$$

$$m_{\text{mélange},i}^{\text{après mouillage/séchage}} = m_{\text{mélange},i}^{\text{avant SRT}} \quad (8.4)$$

Où

m_0 : masse de l'échantillon propre et sec ;

$m_{\text{mélange},i}^{\text{avant}}$: masse du mélange à l'étape (i) avant chaque opération (SRT, mouillage, séchage);

$m_{\text{échantillon},i}^{\text{après}}$: masse de l'échantillon à l'étape (i) après chaque opération (SRT, mouillage, séchage).

Comme dans le cas sec, les équations ci-dessus ne sont valables que si les pesées n'incluent pas de pertes de masses du patin de frottement et de la plaque d'aluminium. Aussi, on considère qu'entre chaque étape (SRT/mouillage/séchage) et pesée, sous un intervalle de temps très court (quelques secondes), la quantité d'eau évaporée est négligeable.

8.2.2. Evolution avec les états de contamination

Un exemple de la variation du coefficient de frottement et de la masse du mélange en fonction des étapes du protocole est présenté dans la Figure 8.2.

Pour rappel :

- L'étape 0 correspond à la mesure du coefficient de frottement à l'état propre de la surface ;
- De l'étape 1 jusqu'à la stabilisation du coefficient de frottement, il s'agit de la phase de mouillage.
- A partir de l'étape (n) où le mouillage s'interrompt, jusqu'à la stabilisation à nouveau du coefficient de frottement, il s'agit de la phase de séchage.

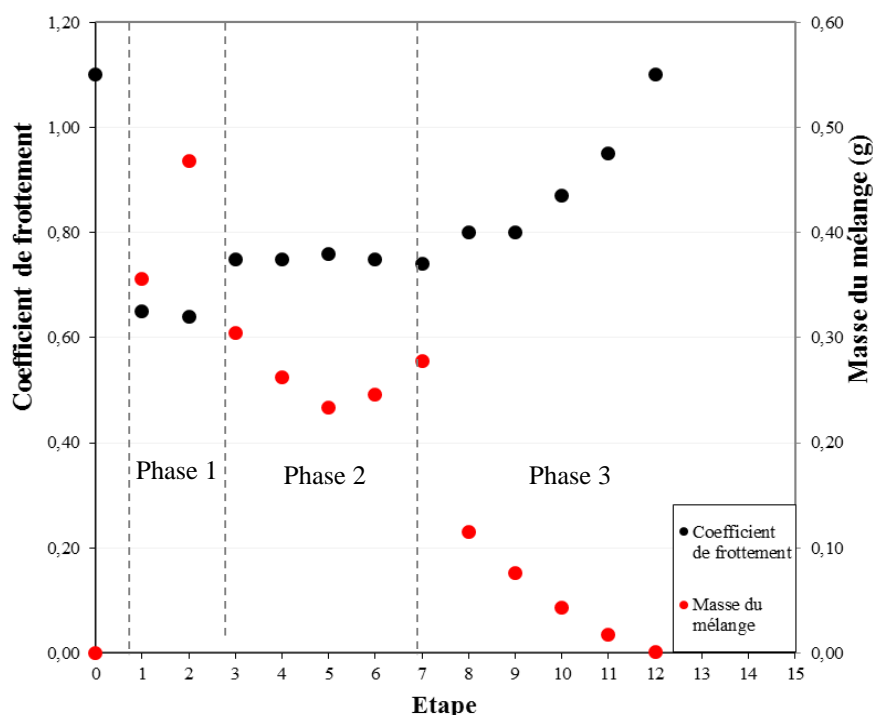


Figure 8.2 Variation typique du coefficient de frottement et de la masse du mélange des particules et d'eau en fonction des étapes du protocole (échantillon Sablé ; concentration 20g/m² ; fraction 0-40µm)

Dans le cas des conditions mouillées, le coefficient de frottement d'une surface contaminée chute au début et remonte progressivement ensuite avec les passages du patin et l'ajout de l'eau avant qu'il ne se stabilise. Dès la phase de séchage, le coefficient de frottement remonte de nouveau jusqu'à atteindre le niveau de frottement d'une surface propre. Sans tenir compte de l'étape 0 (surface propre et sèche), l'évolution du frottement peut être divisée en trois phases : une rapide croissance qui se manifeste par un lessivage progressif de la surface par l'eau au début de mouillage (phase 1), une phase stable où l'eau domine le frottement, (phase 2); et, de nouveau, une rapide croissance, quand la surface commence à sécher (phase 3). Ces trois phases sont décrites dans la littérature (Chapitre 2 ; Figure 2.21). Ces résultats montrent que le protocole expérimental permet de simuler en laboratoire les phénomènes observés in-situ sur une chaussée contaminée.

La masse du mélange suit une allure générale opposée à celle du coefficient de frottement. La masse diminue quand le coefficient de frottement augmente. Les trois phases identifiées pour le

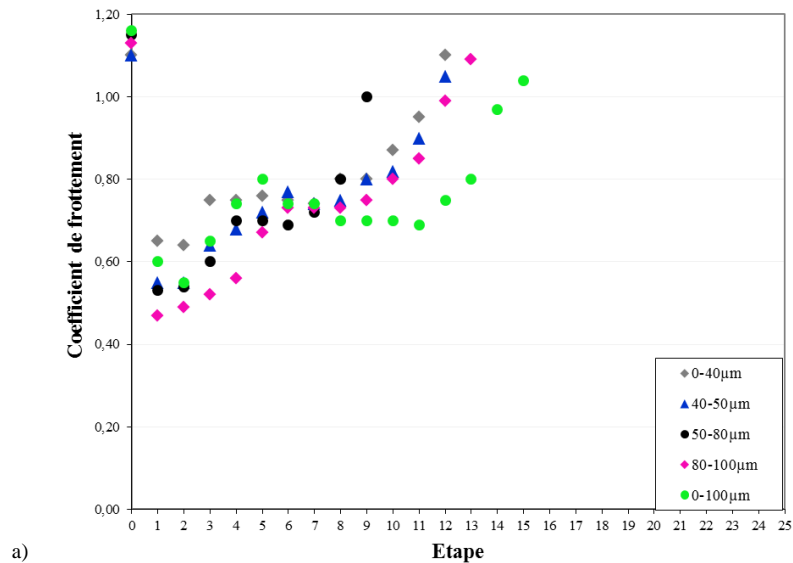
coefficient de frottement sont présentes également pour la masse du mélange. La phase 1 où la masse du mélange augmente lors de premières phases de mouillage, la phase 2 où la masse des particules décroît ensuite augmente légèrement quand le coefficient de frottement se stabilise et la phase 3 où la masse du mélange décroît rapidement quand la surface commence à sécher.

Lors de la première phase de mouillage (phase 1), les courbes montrent que l'éjection du mélange est plus faible que dans les étapes qui suivent (en tenant en compte de la variation de la masse de mélange). Avec une faible quantité d'eau le mélange est retenu par la texture de la surface, ce qui rend l'éjection plus difficile. En ajoutant de l'eau, le mélange devient plus dilué, l'éjection de ce mélange devient donc plus facile.

8.2.3. Influence des caractéristiques liées aux particules, à la surface et à l'eau

8.2.3.1. Taille des particules

L'effet de la taille des particules est présenté dans la Figure 8.3 pour les deux surfaces « Sablé et Sablé Strié ».



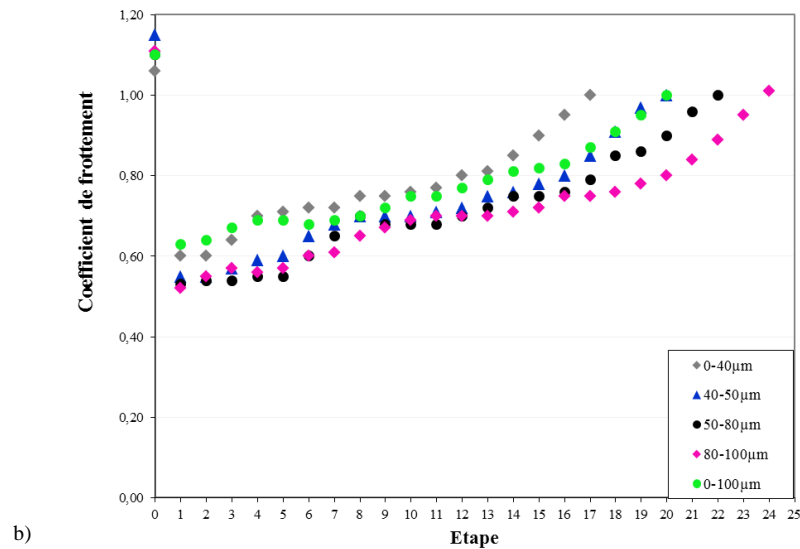


Figure 8.3 Variation du coefficient de frottement pour les cinq fractions de taille des particules : a) Sablé, b) Sablé Strié

A partir de ces courbes, on peut observer que le coefficient de frottement est plus important quand la taille des particules est plus faible sauf dans le cas de la fraction 0-100µm sur la plaque Sablé. Prenant en exemple la fraction de taille 0-40µm et la fraction de taille 80-100µm sur la plaque Sablé, lors de la première étape du protocole l'écart entre les deux mesures de frottement $\Delta\mu$ est égal à 0,18. Cet écart diminue au fur et à mesure des étapes du protocole. De même, plus la taille des particules est importante, plus la transition entre les trois phases (présentées dans la partie 8.2.2) est lente. Prenant le même exemple, le passage de la phase 1 à la phase 2 se fait à l'étape 3 pour la fraction de taille 0-40µm et à l'étape 5 pour la fraction 80-100µm. Ceci pourra être expliqué par le fait que les particules fines, et donc légères, sont plus susceptibles de flotter sur la surface de l'eau à cause de leur densité, ce qui contribue à leur éjection et leur lavage plus rapidement de la surface. De plus, l'état de mouillage des particules joue un rôle important sur le comportement des particules en suspension. Une schématisation des différents états de mouillage et différents régimes est présentée dans la Figure 8.4. De manière générale, selon l'état de mouillage et la nature et la taille des particules, quatre régimes peuvent être présentes : hygroscopique, pendulaire, funiculaire et capillaire (Figure 8.4).

Lors des premiers mouillages, des situations très hétérogènes peuvent se produire. Certaines zones peuvent contenir beaucoup de liquide, tandis que d'autres en contiennent peu. Selon la taille et la nature minéralogique des particules, l'eau peut rester sur la surface des particules (régime hygroscopique). Lorsqu'on fait subir une force à cet amas de particules désordonnées, comme le glissement du patin, le volume du mélange augmente car l'eau qui était en surface est aspirée dans les pores entre les particules pour former des ponts capillaires, ce qui entraîne une attraction des particules entre elles (régime pendulaire). Le comportement du mélange s'apparente donc à celui d'un solide. A partir d'une certaine quantité d'eau, les ponts de liquide peuvent se déplacer plus librement entre les particules ; la force d'attraction entre les particules diminue et les particules commencent à se disperser (régime funiculaire). Enfin avant d'arriver à la saturation complète du

mélange, les particules passent par un régime pour lequel ses pores sont totalement remplis par l'eau dans laquelle l'air n'est présent que sous forme de bulles (régime capillaire) ; on obtient donc le comportement d'une suspension. La quantité d'eau nécessaire pour pouvoir englober les particules est plus importante pour les particules grossières, ce qui explique la transition plus lente entre les deux premières phases. La transition à la deuxième phase signifie que l'effet des particules devient négligeable devant l'effet de l'eau et le coefficient de frottement se stabilise quel que soit la quantité d'eau ajoutée.

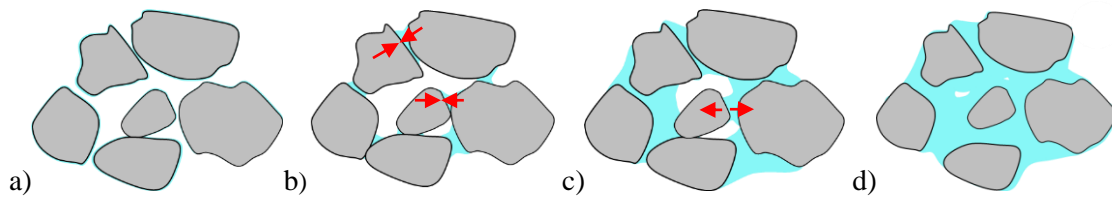


Figure 8.4 Schématisation des différents états de l'eau dans les particules : a) régime hygroscopique, b) régime pendulaire, c) régime funiculaire, d) régime capillaire

Les variations de la masse du mélange en fonction des étapes sont plus compliquées à interpréter (Figure 8.5). Dans le cas de la plaque Sablé, la masse du mélange sur la plaque augmente lors des trois premiers passages et chute progressivement par la suite. La croissance de la masse dure plus longtemps pour la plaque Sablé Strié que sur la plaque Sablé. Sur la plaque Sablé, il faut noter que la phase de séchage commence, au minimum, à partir de l'étape 7 (fraction 50-80 μ m). La chute de la masse du mélange entre l'étape 1 et l'étape 5 montre que la quantité du mélange éjecté est plus importante que la quantité d'eau ajoutée au cours de ces étapes. Sur la plaque Sablé Strié, la masse des particules poursuit son accroissement. En effet, l'effet des creux perturbe les analyses de masse. La masse du mélange mesurée lors des essais tient compte de la masse du mélange sur la surface et de la masse du mélange éjecté dans les creux, ce qui explique que la masse du mélange à l'étape finale reste supérieure à zéro. Les deux formes différentes de la variation de la masse du mélange en fonction des étapes rendent la correction de la masse du mélange en surface (appliquée sur les particules sèche dans le chapitre 5) difficile.

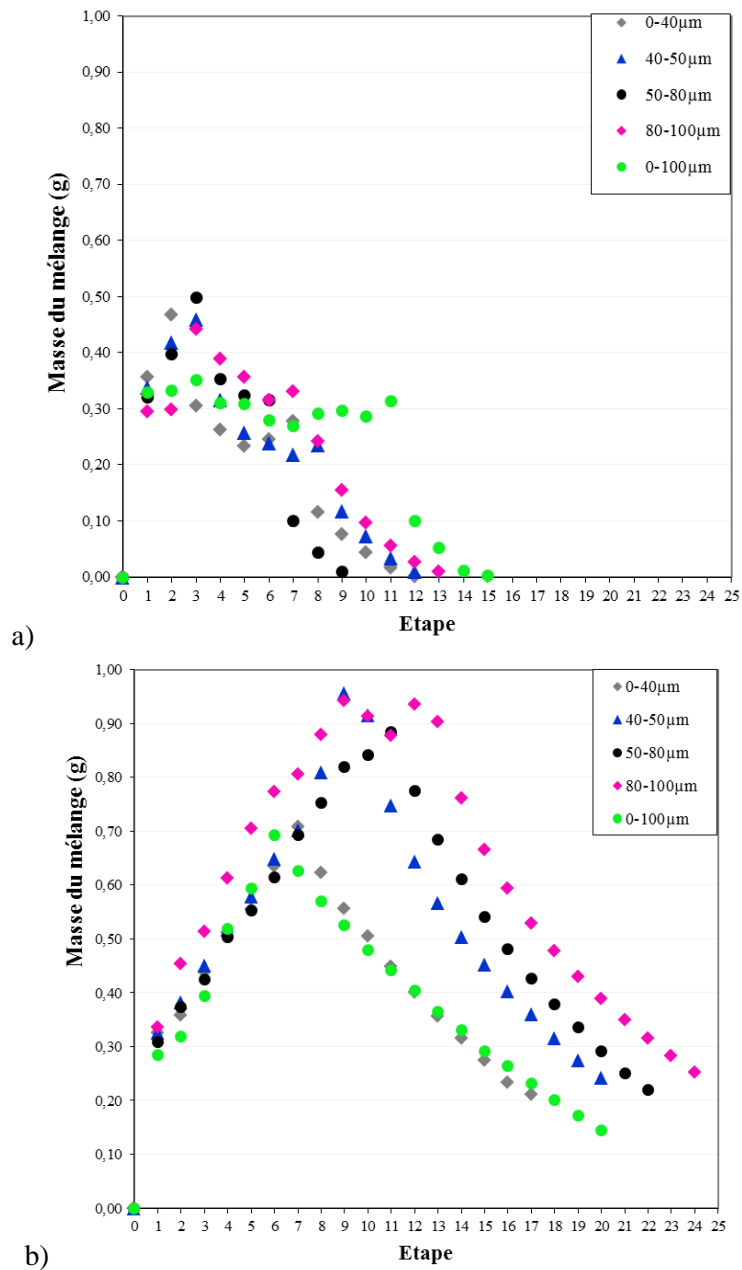


Figure 8.5 Variation de la masse du mélange en fonction des étapes pour les cinq fractions de taille des particules : a) Sablé, b) Sablé Strié

8.2.3.2. *Texture de la surface*

L'effet de la texture de surface est montré sur la Figure 8.6 pour la même fraction de taille des particules et les deux surfaces d'essai.

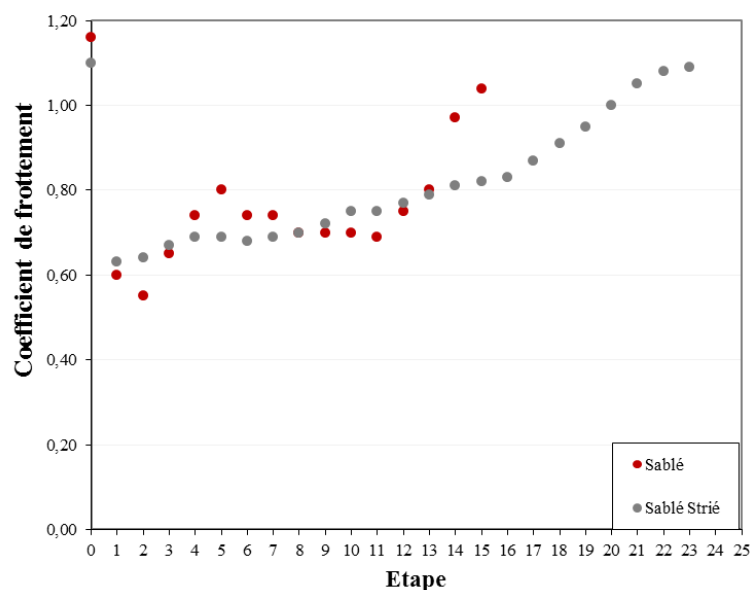


Figure 8.6 Variation du coefficient de frottement sur les quatre surfaces d'essai (fraction 0-100 μm ; concentration 20g/m²)

On observe que la surface «Sablé Strié» qui présente de la macrotecture est celle pour laquelle le coefficient de frottement remonte le plus lentement. On observe que la localisation des transitions des phases est moins visible. Ce comportement est logique puisqu'il s'agit de l'échantillon dont la texture de la surface facilite le plus l'évacuation d'eau de la surface de contact lors de chaque phase de mouillage. Par conséquent, le lessivage de la surface est plus difficile sur la plaque Sablé Strié.

8.2.3.3. L'ajout d'eau

La Figure 8.7 présente une comparaison de l'évolution du coefficient de frottement pour un mélange d'eau et des particules avec celle des particules sèches (présentée dans le chapitre 5) pour la même fraction de taille et la même concentration initiale de particules sur la plaque Sablé. Avec la fraction fine (0-40 μm), en tenant en compte de la différence entre les deux premières mesures de frottement sur la même surface propre (dû au réglage de l'appareil de mesure SRT), on considère que la variation du coefficient de frottement est similaire lors de la première phase de lavage (phase 1). Quand la surface est lavée des particules et saturée d'eau (phase 2), le comportement en frottement est plus important sur une surface sèche présentant une faible quantité de particules (à partir de l'étape 5) qu'une surface saturée d'eau. Toutefois, l'eau permet de laver la surface et d'évacuer les particules piégées, contrairement aux conditions sèches, ce qui permet de rétablir le niveau de frottement d'une surface propre à la fin du séchage (phase 3). Ceci montre que l'effet des particules sèches est aussi significatif à long terme sur le coefficient de frottement qu'en présence d'eau. Avec la fraction grossière (80-100 μm), la croissance du coefficient de frottement est plus rapide en conditions sèches qu'en conditions mouillées. En effet le piégeage

des particules est négligeable sur la fraction grossière des particules (cf. chapitre 5). Néanmoins, le lavage de ces particules de la surface en conditions mouillées est plus difficile.

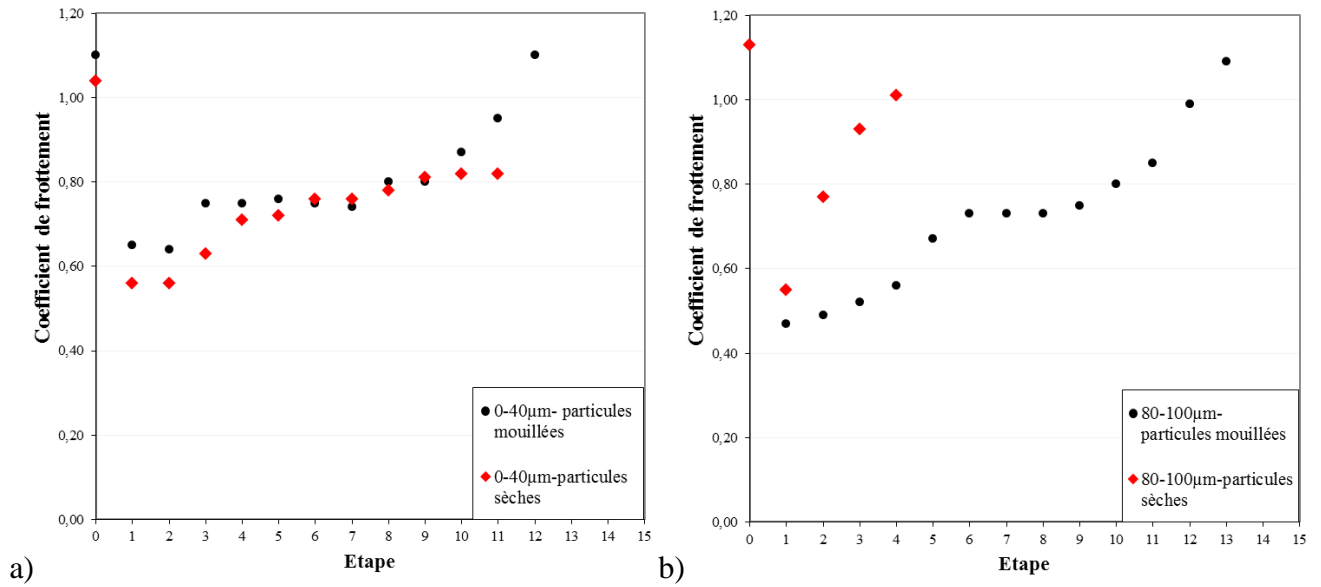


Figure 8.7 Comparaison de la variation du coefficient de frottement dans les conditions sèches et dans les conditions mouillées (aluminium grenailé ; concentration 20g/m²) : a) fraction 0-40µm b) fraction 0-80µm

8.2.4. Relation entre le frottement et la masse du mélange

La relation entre le coefficient de frottement et la masse du mélange pour les cinq fractions de taille de particules et les deux surfaces est présentée dans la Figure 8.8.

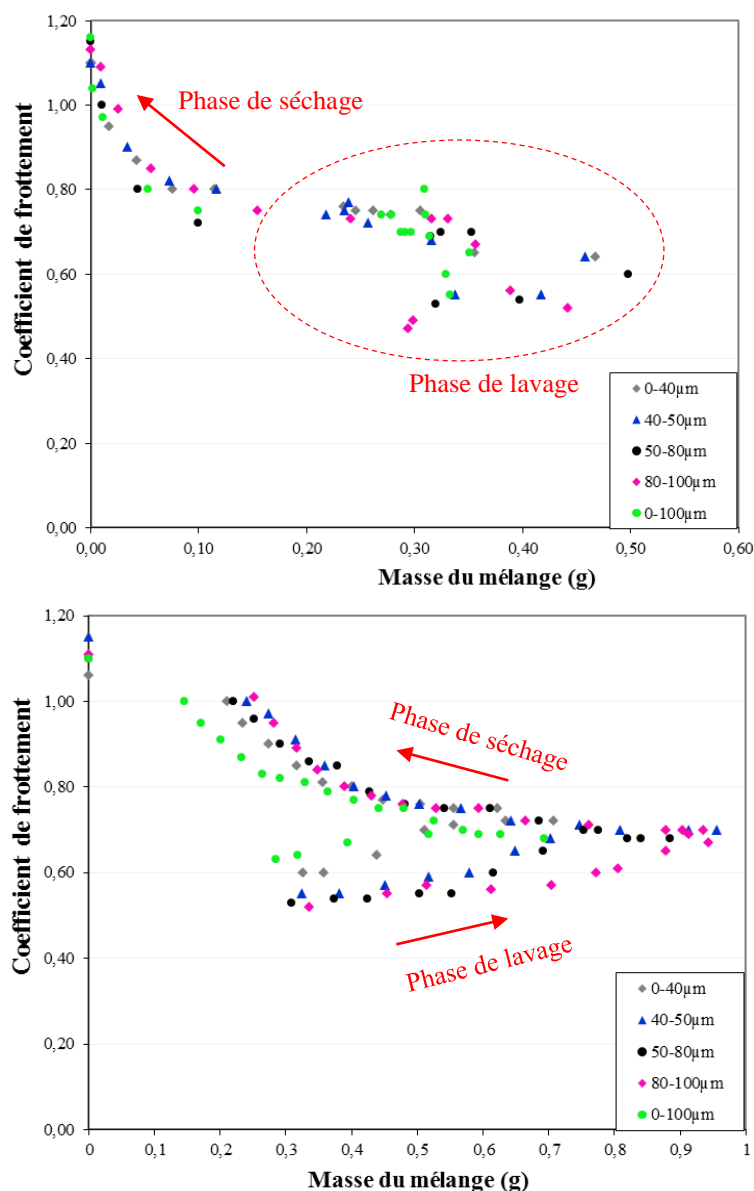


Figure 8.8 Variation du coefficient de frottement en fonction de la masse du mélange pour les cinq fractions de taille des particules : a) Sablé, b) Sablé Strié

La variation du coefficient de frottement en fonction de la masse du mélange est différente pour les deux surfaces d'essai (Sablé et Sablé Strié). On observe sur la plaque Sablé, lors de la phase de lavage des particules une dispersion des points entourés (cercle rouge sur la Figure 8.8a). A partir de l'étape de séchage, la masse du mélange diminue et le coefficient de frottement augmente en suivant une courbe maitresse pour toutes les fractions de taille des particules. Sur la plaque Sablé Strié, les deux phases de lessivage et de séchage sont distinctes : une croissance du coefficient de frottement quand la masse du mélange augmente en phase de lavage ; et une croissance du coefficient de frottement quand la masse du mélange diminue en phase de séchage. Ces résultats montrent que la masse du mélange n'est pas un indicateur fiable pour exprimer l'évolution du coefficient de frottement. En regardant la masse du mélange, on voit que pour une même masse

du mélange le coefficient de frottement peut avoir deux niveaux. Or, la masse du mélange pourrait être la même pour deux mélanges ayant des fractions volumiques de particules et d'eau différentes. Les interactions des particules dans l'eau jouent un rôle important sur le comportement en frottement. En effet, ces interactions sont liées aux fractions de particules et d'eau dans le mélange. La fraction volumique est donc un indicateur permettant de traduire les interactions entre les particules et leur influence sur le frottement. La partie suivante explicite la démarche appliquée pour estimer la fraction volumique à partir de la masse du mélange. L'analyse des résultats expérimentaux sera centrée sur la phase de lessivage (Figure 8.1) uniquement dans la suite du chapitre.

8.3. Vers une prédiction du frottement

8.3.1. Estimation de la fraction volumique des particules et d'eau dans le mélange

8.3.1.1. Hypothèses et application

Pour estimer la fraction volumique des particules dans l'eau, il faut séparer la masse des particules présentes sur la surface après chaque passage du patin et la masse d'eau ajoutée par pulvérisation à chaque étape du protocole. Pour cela, deux hypothèses sont émises (Figure 8.9) :

- Le mélange d'eau et de particules est un mélange homogène.
- La partie éjectée par le patin est une proportion de ce mélange homogène ; la fraction volumique des particules dans l'eau avant et après le passage du patin reste constante.

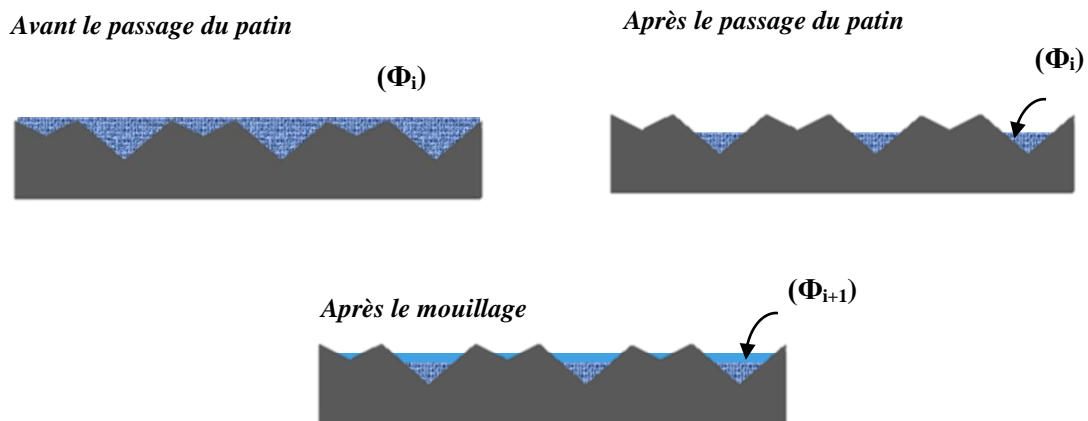


Figure 8.9 Hypothèses

A partir de ces hypothèses, la fraction volumique des particules à chaque étape peut se déduire des équations suivantes :

$$m_{\text{mélange}} = m_{\text{particules}} + m_{\text{eau}} \quad (8.5)$$

$$\Phi_{\text{particules},i} = \frac{\left(\frac{m_{\text{particules},i}}{\rho_{\text{particules}}}\right)}{\left(\frac{m_{\text{particules},i}}{\rho_{\text{particules}}}\right) + \left(\frac{m_{\text{eau},i}}{\rho_{\text{eau}}}\right)} \quad (8.6)$$

$$\Phi_{\text{eau},i} = \frac{\left(\frac{m_{\text{eau},i}}{\rho_{\text{eau}}}\right)}{\left(\frac{m_{\text{particules},i}}{\rho_{\text{particules}}}\right) + \left(\frac{m_{\text{eau},i}}{\rho_{\text{eau}}}\right)} \quad (8.7)$$

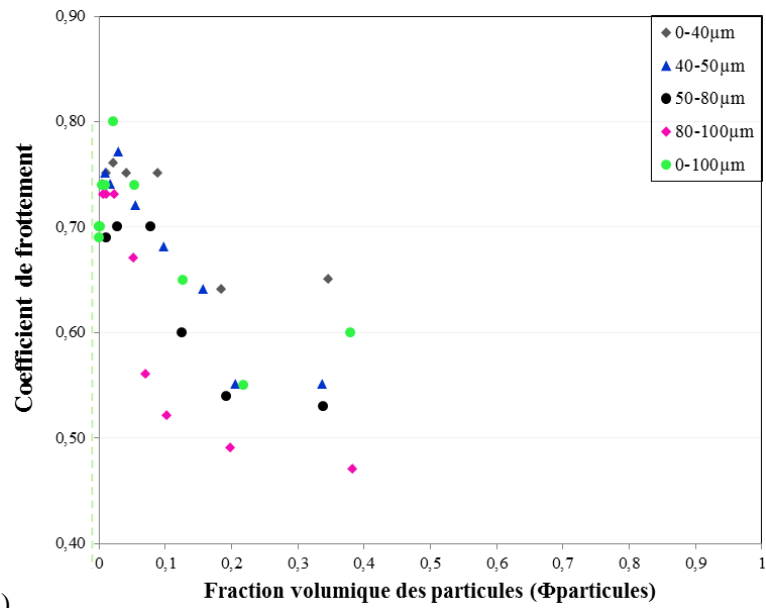
Où Φ est la fraction volumique des particules dans le mélange ; $m_{\text{particules}}$ est la masse des particules ; m_{eau} est la masse de l'eau ajouté avant chaque étape ; $m_{\text{mélange}}$ est la masse du mélange après le mouillage; $\rho_{\text{particules}}$ est la masse volumique des particules pour chaque fraction de taille et ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau qui est égale à 1.

Connaissant la masse des particules après compactage, la masse d'eau ajoutée est calculé par l'équation 8.5. La fraction volumique des particules à l'étape 1 (avant le passage du patin) est ensuite calculée à partir de l'équation 8.6. Déduisant la masse du mélange éjectée après le passage du patin à chaque étape et ajoutant la masse de l'eau ajoutée avant chaque étape i , la fraction volumique des particules à l'étape i est calculée par l'équation 8.6.

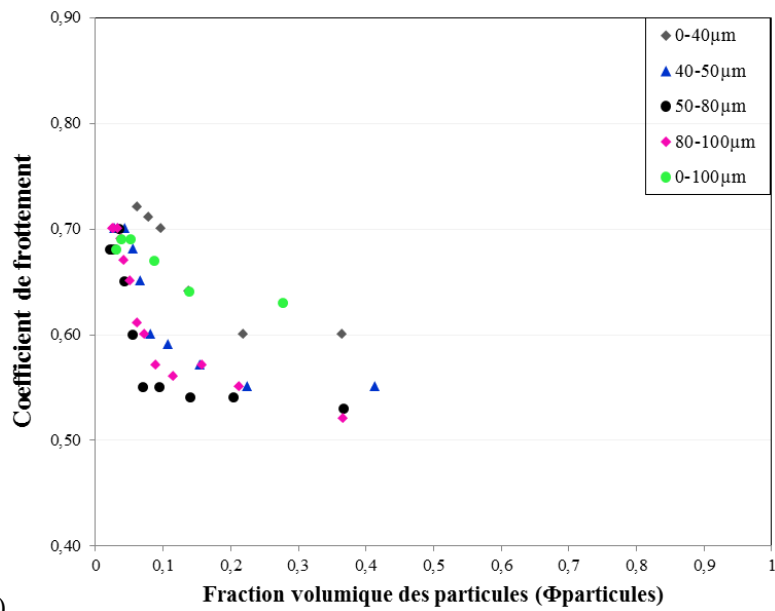
8.3.1.2. Fraction volumique des particules dans le mélange

La variation du coefficient de frottement en fonction de la fraction volumique des particules dans le mélange est présentée dans la Figure 8.10. Les courbes présentent trois phases :

- Dans la première partie, le frottement suit un plateau quand la fraction volumique des particules est très faible ($\Phi < 0,1$).
- La deuxième partie présente une décroissance de la valeur du coefficient de frottement en fonction de la fraction volumique ;
- Dans la troisième partie, le coefficient de frottement se stabilise autour d'une valeur minimale.



a)



b)

Figure 8.10 Variation du coefficient de frottement en fonction de la fraction volumique des particules pour les cinq fractions de taille des particules : a) Sablé, b) Sablé Strié

On rappelle que la fraction volumique des particules part d'une valeur initiale élevée et décroît au fur et à mesure de l'ajout d'eau. La figure 8.11 indique la localisation des phases 3, 2 et 1 décrites dans la figure 8.2 ainsi qu'une représentation, schématique du film à l'interface.

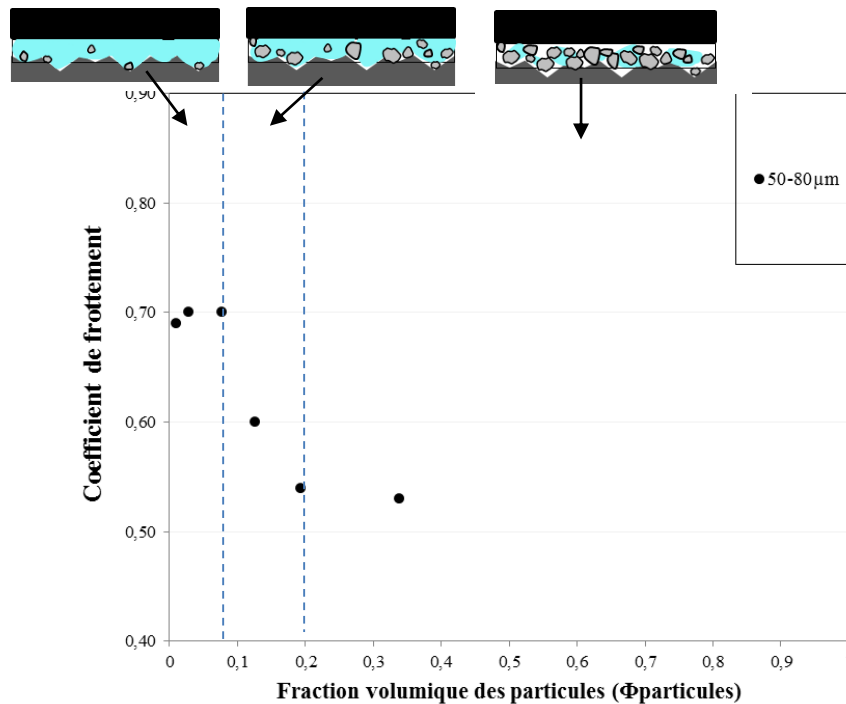


Figure 8.11 Présentation des trois phases sur l'exemple de variation du coefficient de frottement en fonction de la fraction volumique des particules (50-80 μ m, plaque Sablé)

La forme en "S inversé" des courbes obtenues rappelle fortement la courbe de Stribeck qui explique le frottement de deux surfaces en contact séparées par un film de lubrifiant (chapitre 2, partie 2.5.2.1). Cette courbe permettant d'appréhender les différents régimes de lubrification que l'on peut rencontrer dans un contact, relie la vitesse de glissement V , la viscosité du fluide η et la pression de contact p , en utilisant le nombre $\frac{\eta V}{p}$ au frottement.

Le pendule SRT utilisé dans le cadre de ces travaux mesure le frottement à l'aide d'un patin en gomme qui glisse sur la surface avec une vitesse constante (0,3m/s) et une pression de contact constante (0,2 MPa). Puisque à chaque étape de protocole, une éjection du mélange et un ajout d'eau se produisent, le patin de mesure SRT glisse sur un film de particules ayant un comportement rhéologique qui varie en fonction des étapes. Pour mieux interpréter ces résultats, il faudrait donc étudier les variations du coefficient de frottement en fonction de la viscosité du mélange, étant donné que cette dernière est liée à la fraction volumique des particules dans le mélange (cf. partie 8.3.2.).

Pour de faibles valeurs de fraction volumique de particules, le coefficient de frottement est stable et élevé. Ensuite, les courbes d'évolution du coefficient de frottement en fonction de la fraction volumique présentent une chute importante. La transition entre ces deux phases permet de définir une nouvelle grandeur caractérisant l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la fraction volumique des particules dans le mélange qu'on appelle «fraction volumique critique

des particules ». Il s'agit de la fraction volumique des particules des particules à partir de laquelle le frottement décroît brutalement. Ce paramètre définit la limite entre la phase 3 et la phase 2. Cette fraction est appelée critique car jusqu'à cette valeur, l'ajout des particules sur la surface n'a pas d'influence sur le frottement. Cependant, à partir de cette fraction volumique, la moindre quantité de particules supplémentaire dans le mélange fait chuter considérablement le niveau de frottement (phase 2).

Pour estimer cette valeur de fraction volumique des particules critique, deux droites sont dessinées :

- La première présente une droite horizontale. Son ordonnée est la moyenne des points de la phase 3.
- La deuxième présente une droite oblique. Elle est définie par régression linéaire sur les points de la phase 2.

L'intersection de ces deux droites donne la valeur de $\Phi_{\text{particules, critique}}$. L'équation de la deuxième droite de définir cette valeur en prenant en y la moyenne des valeurs de frottement mesuré à la phase 3.

Prenant l'exemple de la fraction 40-50 μm sur la plaque Sablé (Figure 8.12), la fraction volumique critique des particules est égale à 8%. Les valeurs de la fraction volumique critique des particules pour chaque fraction de taille sont présentées dans le Tableau 8.1.

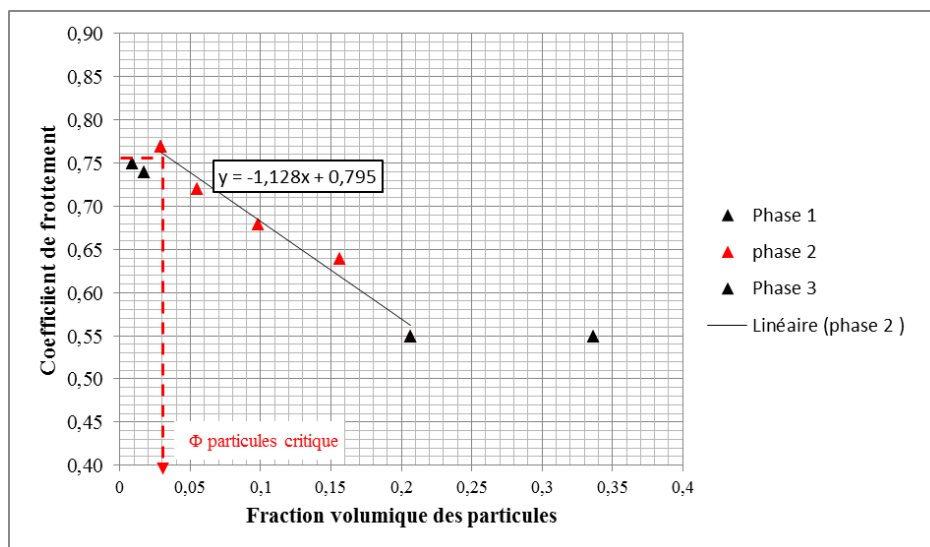


Figure 8.12 Fraction volumique critique dans le cas de la fraction de taille des particules 40-50 μm et la surface Sablé

Tableau 8.1 Valeurs de la fraction volumique critique pour chaque fraction de taille

$\Phi_{\text{particules, critique}} (\%)$	Fraction de taille des particules				
	0-40 μm	40-50 μm	50-80 μm	80-100 μm	0-100 μm
Plaque Sablé	8,8	3,9	6,8	2,3	6
Plaque Sablé Strié	9,1	4,5	3,8	2,9	5,2

La valeur de $\Phi_{\text{particules, critique}}$ varie en fonction de la fraction de taille des particules sur la plaque Sablée. En supposant que la valeur trouvée pour la fraction de taille 50-80 μm est une valeur non cohérente, $\Phi_{\text{particules, critique}}$ diminue quand la taille des particules augmente.

Des physiciens ont étudié l'effet de la fraction volumique d'eau et des particules dans un mélange sur le frottement (Fall et al., 2014). A partir de leurs expérimentations, ils montrent que des ponts capillaires se forment entre les grains de sable par l'ajout d'une quantité bien dosée d'eau dans le sable. Par conséquent, une augmentation du module de cisaillement est générée par l'attraction entre les grains qui rend le sable moins déformable et donc le coefficient de frottement moins élevé. Cette quantité d'eau permet de déterminer la fraction volumique minimale au-delà de laquelle le coefficient de frottement commence à chuter par rapport au niveau de frottement mesuré sur une surface contaminée par des particules sèches. Néanmoins, à partir d'une certaine proportion d'eau, les ponts fusionnent et finissent même par disparaître quand le sable est saturé. Leur étude montre également que la dispersion de la taille des particules de sable joue un rôle sur la diminution des forces de frottement par l'ajout d'une faible quantité d'eau. Cette diminution est plus significative avec du sable (poly-dispersé) dont les grains sont de dimensions différentes qu'avec du sable (mono-dispersé) dont les grains sont de même dimension. Cela peut s'expliquer par le fait que le sable poly-dispersé a un module de cisaillement plus élevé, ce qui induit un coefficient de frottement plus faible. Ce niveau plus élevé du module de cisaillement s'explique par le fait que le sable poly-dispersé peut être plus dense, ce qui implique un nombre de ponts capillaires plus important par unité du volume (Fall et al., 2014). Dans notre cas, les tailles des particules sont assez faibles par rapport au sable, ce qui donne une densité plus élevée. On considère donc que les particules utilisées dans notre étude comme des particules poly-dispersées. Fall et ses coauteurs (2014), trouvent des valeurs de fraction volumique critique d'eau variant entre 3 et 5% selon le type du sable. Cette fraction volumique critique d'eau ne peut pas être déduite dans notre étude. En effet, si la quantité d'eau ajoutée lors des premières étapes du protocole était beaucoup plus faible, la fraction volumique critique d'eau pourrait être identifiée. Néanmoins, la fraction volumique d'eau la plus faible (calculé à l'étape 1 à partir de l'équation 8.7) se situe aux alentours 62 % (dans le cas la fraction 80-100 μm sur la plaque Sablé, et plus importante pour les autres fractions de tailles et l'autre surface).

La Figure 8.13 illustre les deux fractions critiques (des particules et d'eau) sur la courbe représentative du phénomène.

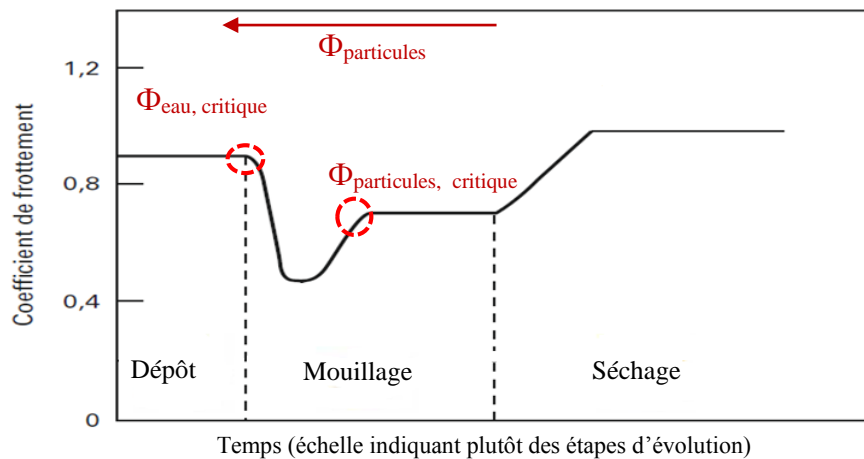


Figure 8.13 Présentation des fractions volumique critique dans le mélange

La partie suivante présente les approches utilisées pour représenter la variation du coefficient de frottement en fonction d'un indicateur (la viscosité) qui nous permette d'identifier les différents régimes de lubrification.

8.3.2. Estimation de la viscosité du mélange d'eau et des particules

8.3.2.1. Approche expérimentale

En première approche, nous avons essayé de mesurer la viscosité d'un mélange d'eau et de particules présentant une fraction volumique donnée. Les mesures sont réalisées à l'aide d'un viscosimètre de type couette (viscosimètre à cylindres coaxiaux, l'un est fixe, l'autre peut être mis en rotation). Pour assurer une dispersion homogène des particules dans le liquide, le mélange a été bien agité avant son introduction dans le viscosimètre. Néanmoins, l'essai a fait apparaitre des difficultés liées à l'homogénéité du mélange (Figure 8.14). La masse volumique des particules ($\approx 2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$) étant largement supérieure à la masse volumique de l'eau ($\approx 10^3 \text{ kg/m}^3$), elle a pour conséquence la possibilité d'une sédimentation de ces particules ; ceci peut modifier les propriétés rhéologique du mélange.

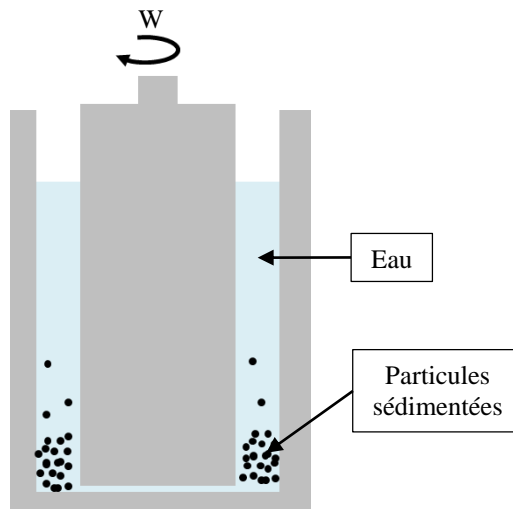


Figure 8.14 Problème de sédimentation des particules

Cette approche montre des limites pour mesurer la viscosité d'un mélange d'eau est des particules. Elle a donc été abandonnée. Un recours à une approche théorique a semblé plus pertinent. En effet, il est possible de calculer la viscosité d'une suspension à partir de la fraction volumique estimée précédemment. Ceci fait l'objet de la partie suivante.

8.3.2.2. Approche théorique

Modèle d'estimation

De nombreux modèles existent dans la littérature, permettant de calculer la viscosité d'une suspension à partir de la connaissance de la viscosité du fluide suspens η_0 et de la fraction volumique de la phase solide dans la suspension « Φ ».

Maron et Pierce (1956) et ensuite Quemada (1977) ont proposé un modèle analytique, nommé MPQ, couramment utilisé pour prédire la viscosité des suspensions avec une fraction volumique des solides variant de 0,2% jusqu'à atteindre une fraction où la viscosité relative diverge vers l'infini. La viscosité relative du mélange s'écrit de la manière suivante :

$$\eta_r = \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_m}\right)^{-2} \quad (8.8)$$

$$\eta_r = \frac{\eta_{\text{mélange}}}{\eta_{\text{solvant}}} \quad (8.9)$$

Avec ϕ la fraction volumique des solides dans le mélange ; ϕ_m la fraction maximale de remplissage dans la suspension au voisinage de laquelle la viscosité diverge. Cette fraction volumique est souvent utilisée comme paramètre ajustable dans les modèles de viscosité. La valeur de ϕ_m varie sensiblement dans la littérature entre 0.53 et 0.74.

Shewan et Stokes (2015) ont quant à eux regroupé des résultats expérimentaux de la littérature et aussi de leurs travaux présentant la viscosité relative η_r pour des suspensions colloïdales et non colloïdales de sphères dures en fonction de la fraction volumique de particules. Une comparaison des modèles trouvés dans la littérature, dont le modèle MPQ, et des résultats expérimentaux est présentée sur la Figure 8.15. Cette comparaison montre que le modèle MPQ suit bien les résultats expérimentaux, ce qui valide notre choix de modèle.

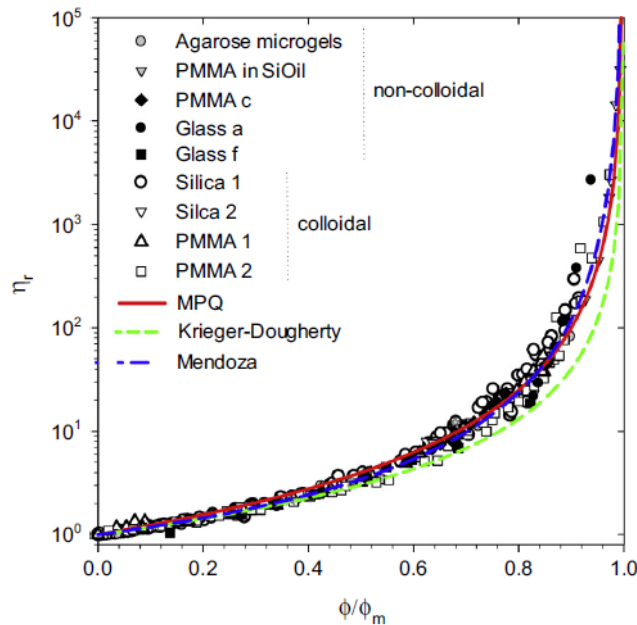


Figure 8.15 Représentation de η_r comme une fonction de ϕ/ϕ_m en utilisant des données de la littérature et des travaux de Shewan et Stokes (2015)

La définition théorique de ϕ_m est encore sujette à débat. Cependant, il est généralement accepté que ϕ_m puisse être exprimée par ϕ_{rcp} qui correspond à l'empilement aléatoire des sphères (« random close packing »). Pour des suspensions de sphères dures, ϕ_{rcp} est définie géométriquement comme l'empilement le plus consolidé réalisable par tapotement ou vibration d'un grand conteneur de sphères (Mewis and Wagner, 2009).

Shewan et Stokes (2015) ont utilisé le modèle de Farr et Groot (2009) pour prédire ϕ_{rcp} à partir de la distribution de taille des particules, puisqu'il est simple et applicable pour des particules bi,

tri et poly-dispersées. La Figure 8.16 présente l'évolution de $\phi_{r_{cp}}$ en fonction de la distribution de taille moyenne σ des travaux de Farr et Groot (2009) et Shewan et Stokes (2015).

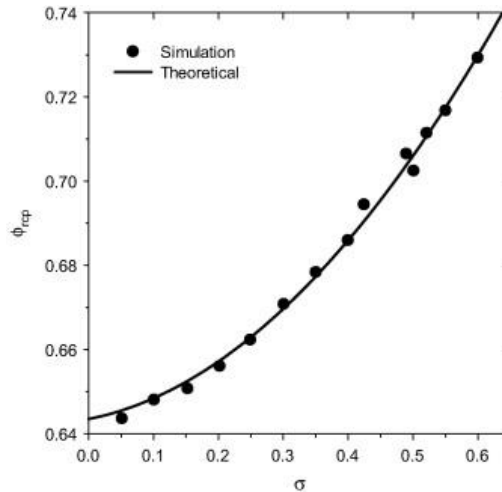


Figure 8.16 Evolution de $\phi_{r_{cp}}$ en fonction de la distribution de taille moyenne σ (Shewan et Stokes, 2015)

La distribution de taille est définie à partir de deux paramètres $D_{4,3}$ et $D_{3,2}$ qui sont respectivement le diamètre moyen pondéré en volume total et en surface total des particules :

$$\sigma = \sqrt{\ln\left(\frac{D_{4,3}}{D_{3,2}}\right)} \quad (8.10)$$

Application au mélange eau-particules

Dans le cas étudié, le mélange d'eau et des particules est considéré comme une suspension à concentration modérée, puisque la fraction volumique est supérieure à 0,2 %. Le modèle MPQ est donc applicable. Pour calculer la viscosité d'un mélange d'eau et de particules, nous pouvons donc :

- Utiliser le modèle MPQ qui définit la viscosité à partir de la fraction volumique des particules « $\phi_{particules}$ » et l'empilement aléatoire des sphères « $\phi_{r_{cp}}$ » et la viscosité du solvant ($\eta_{eau}=10^{-3}$ Pa.s) ;
- Déterminer la distribution de taille « σ » à partir des paramètres de taille $D_{4,3}$ et $D_{3,2}$ qui ont été déterminés expérimentalement pour les différentes fractions de taille de particules
- Déterminer l'empilement aléatoire des sphères « $\phi_{r_{cp}}$ » à partir de la distribution de taille « σ ».

Shewan et Stokes (2015) n'ont pas publié l'équation qui permet de calculer l'empilement aléatoire des sphères « ϕ_{rcp} » à partir de la distribution de taille « σ » dans leur article. Nous avons donc reconstruit les points expérimentaux publiés par Shewan et Stokes (2015) pour trouver une relation entre ϕ_{rcp} et σ . La Figure 8.17 présente le retracé de la prédiction de ϕ_{rcp} à partir de σ .

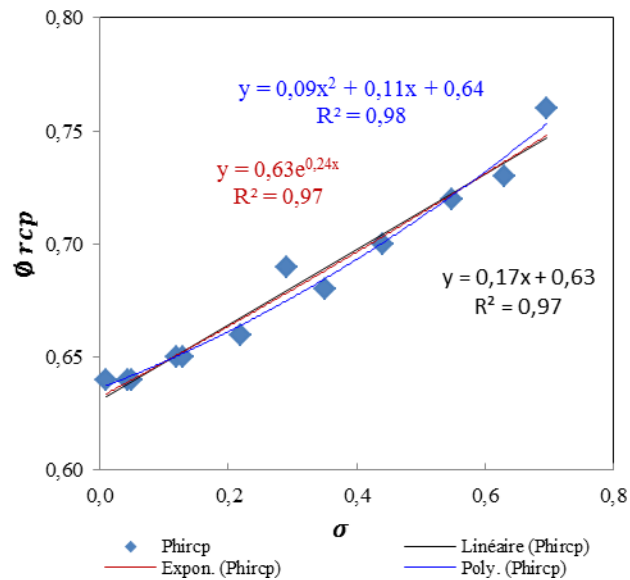


Figure 8.17 Retracer de la prédiction de ϕ_{rcp} à partir de σ d'après les travaux de Shewan et Stokes (2015)

Les modèles d'ajustement testés (Figure 8.17) donnent des résultats équivalents (en termes de R^2) et nous avons donc retenu le modèle le plus simple, à savoir le modèle linéaire :

$$\phi_{rcp} = 0,17\sigma + 0,63 \quad (8.11)$$

La distribution de taille σ est calculée à partir des paramètres de taille $D_{4,3}$ et $D_{3,2}$ mesurées par la méthode de granulométrie à diffraction laser pour chaque fraction de taille des particules (Chapitre 4).

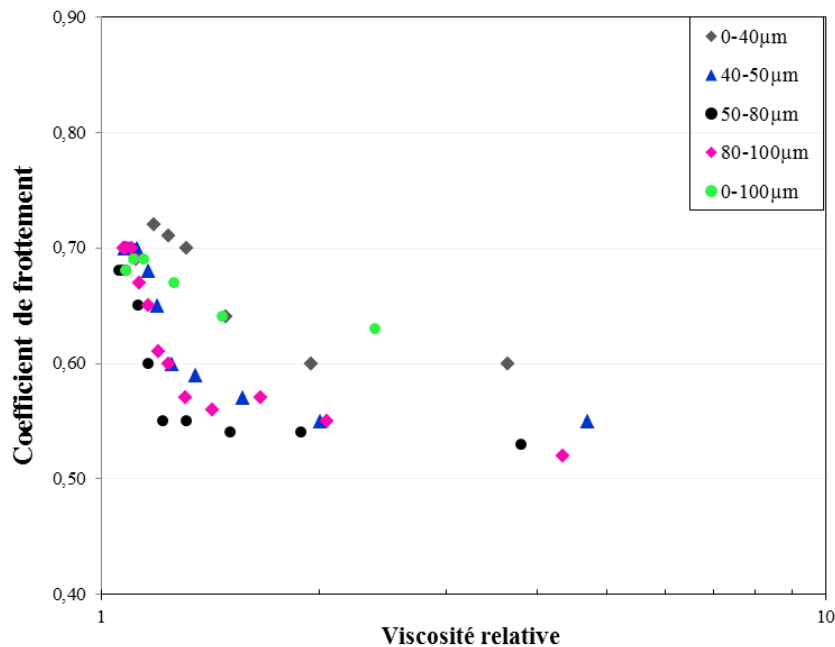
Le Tableau 8.2 résume les valeurs des paramètres utilisées et calculées pour estimer la viscosité du mélange pour toutes les fractions de taille des particules.

Tableau 8.2 Les valeurs de σ et de ϕ_{rcp} calculée pour toutes les fractions de taille des particules

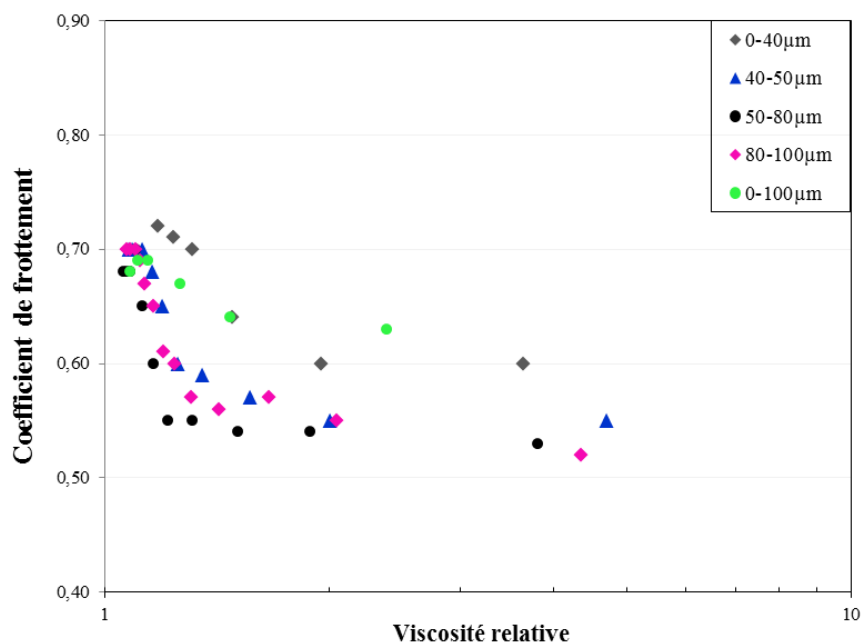
	0-40 μm	40-50 μm	50-80 μm	80-100 μm	0-100 μm	eau
$D_{4,3}$	32	54,8	81,4	105	48,8	-
$D_{3,2}$	17	29	48,2	87,2	20,5	-
ρ (t/m ³)	2,526	2,553	2,672	2,575	2,5	1
σ	0,795	0,798	0,724	0,431	0,931	-
ϕ_{rcp}	0,765	0,766	0,753	0,703	0,788	-

8.3.2.3. Viscosité du mélange

Le coefficient de frottement est maintenant analysé en fonction de la viscosité relative du mélange (Figure 8.18). On observe la même variation que celle trouvée avec la fraction volumique des particules ; le coefficient de frottement est stable pour les faibles valeurs de viscosité relative avec un plateau dont la largeur varie selon la fraction de tailles de particules, puis il diminue et enfin il se stabilise avec l'augmentation de la viscosité relative. Dans certains cas, il augmente légèrement après être passé par une valeur minimale.



a)



b)

Figure 8.18 Variation du coefficient de frottement en fonction de la viscosité relative du mélange pour les cinq fractions de taille des particules ; a) Sablé b) Sablé Strié

On observe que la valeur de frottement correspondant à une viscosité relative de 1 varie autour de 0,75 pour les différentes fractions de taille de particules. Cette valeur a été retrouvée expérimentalement lorsque l'on a mesuré l'évolution du coefficient de frottement sur la surface Sablé propre au fur et à mesure de l'ajout d'eau. La valeur de 0,75 représente la valeur minimale du coefficient de frottement lorsqu'il est stabilisé.

La forme de la courbe donnant le frottement en fonction de la viscosité relative du mélange présente trois phases qui pourraient représenter trois régimes de lubrification différents (limite, mixte, hydrodynamique). Ce point mérite des investigations complémentaires en étudiant en particulier l'épaisseur du film de lubrifiant à l'interface et sa dispersion lors du passage du patin.

Selon la fraction de taille de particules, la transition d'un régime à un autre ne se produit pas au même moment (i.e. avec la même viscosité) ; quand la taille des particules est plus fine (le cas de la fraction 0-40 et 0-100µm), le régime mixte dure plus longtemps et le coefficient de frottement varie plus lentement. Contrairement aux particules grossières, où le régime hydrodynamique est atteint plus rapidement. On observe également sur le régime hydrodynamique pour la même viscosité, que le coefficient de frottement est différent. Pour des particules plus grosses, le coefficient de frottement est plus faible. En effet, quand la taille des particules est plus importante, la quantité d'eau nécessaire pour développer les ponts capillaires est plus importante. Même si la viscosité du mélange est similaire, les interactions entre les particules (les forces d'attraction) sont plus importantes quand la taille des particules est plus importante (Mitchell, 1993). Ce comportement agit sur le coefficient de frottement, puisque le mélange d'eau et des particules se

comporte comme un solide à l'interface. Quand les particules sont plus fines, le régime mixte est atteint plus rapidement à partir du régime hydrodynamique.

8.3.3. Application au calcul du frottement

8.3.3.1. Modèle de frottement

Le modèle de frottement développé dans les conditions sèches permet de calculer le coefficient de frottement sur une surface contaminée par des particules en fonction du taux de recouvrement de la surface, initialement propre. Le modèle (eq. 7.1 du chapitre 7) pondère la valeur du coefficient de frottement entre deux valeurs extrêmes ; les coefficients de frottement générés par un film continu de particules (μ_{film}) et celui induit par la surface de l'échantillon (μ_{surface}). Le taux de recouvrement de la surface par des particules est calculé à chaque étape (i).

Dans le cas mouillé, en particulier dans la phase de mouillage, l'état de la surface passe d'une surface recouverte par un film d'un mélange d'eau et des particules (le début de la phase de mouillage) à une surface recouverte par un film d'eau (à la fin de la phase de mouillage). Si on transpose le modèle de frottement développé dans le cas sec au cas mouillé, le coefficient de frottement généré par un film continu de particules (μ_{film}) correspond au coefficient de frottement généré par un film continu du mélange d'eau et des particules (μ_{film}); le coefficient de frottement généré par la surface de l'échantillon (μ_{surface}) correspond au coefficient de frottement généré par le film d'eau qu'on appelle μ_{eau} . La Figure 19 illustre la transposition du modèle développé dans le cas sec au cas mouillé. Cette formulation rejoint celle proposée par Azushima et al. (2009) dans le cas d'un contact lubrifié de pièces de machineries en acier.

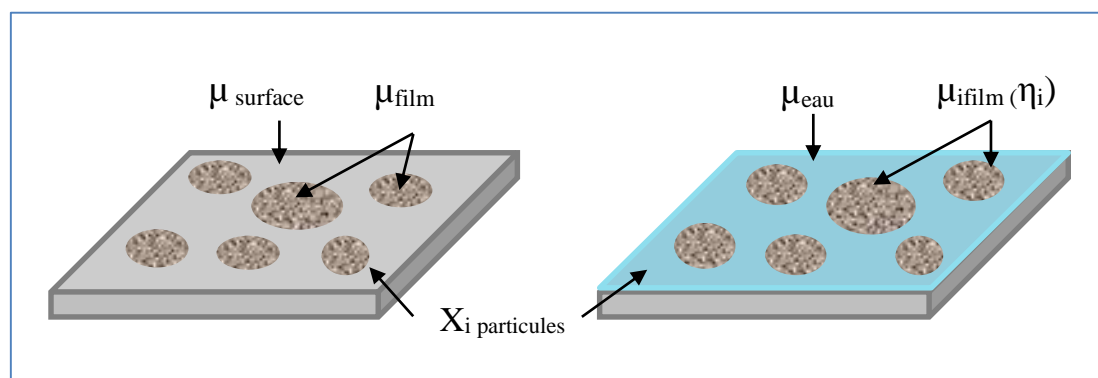


Figure 8.19 Illustration des hypothèses de modèle dans les conditions sèches et dans les conditions mouillées

Le modèle de frottement lors de la phase de mouillage pourra donc être formulé de la manière suivante :

$$\mu_i = X_i \mu_{film} + (1 - X_i) \mu_{eau} \quad (8.12)$$

Où X_i : le taux de recouvrement de la surface par le mélange d'eau et de particules ; μ_{eau} : le coefficient de frottement mesuré sur une surface recouverte par un film d'eau et μ_{film} : le coefficient de frottement correspondant à un film de mélange d'eau et de particules.

Le paragraphe 8.3.2.3 a permis d'étudier l'évolution du coefficient de frottement généré par un mélange eau/particules en fonction de la viscosité dynamique relative du mélange η_r . Pour toutes les tailles de particules, on a pu observer une décroissance du coefficient de frottement en fonction de η_r . En se basant sur les travaux de Lee et al. (2002) qui reliait le coefficient de frottement à la viscosité cinématique du film de lubrifiant à l'aide d'une fonction mathématique inverse, on fait l'hypothèse qu'on peut établir une relation entre le coefficient de frottement d'un mélange eau/particules (μ_{film}) et sa viscosité relative sous la forme :

$$\mu_{film} = \frac{a}{\eta_r^c} \quad (8.13)$$

Où μ_{film} est le coefficient de frottement mesuré sur un film de lubrifiant de viscosité relative η_r ; a et c : paramètres à calibrer.

En considérant comme condition aux limites que lorsque $\eta_r = 1$ (viscosité relative de l'eau) $\mu = \mu_{eau}$, on en déduit que $a = \mu_{eau}$.

Le coefficient de frottement d'une surface recouverte par un film d'eau est déterminé par des mesures SRT sur la plaque Sablé. En partant d'une surface sèche, de l'eau est rajoutée en suivant le même protocole que pour l'étude du mélange eau/particules. Lorsque la quantité d'eau devient trop importante, le coefficient de frottement cesse de décroître et se stabilise. La valeur trouvée de μ_{eau} est égale à 0,75. On note que cette valeur est également proche à celle mesurée à la fin de la phase de mouillage pour toutes les fractions de taille des particules (Figure 8.3).

Le modèle s'écrit donc :

$$\mu = \frac{0,75}{\eta_r^c} \quad (8.14)$$

La valeur de c est déterminée par ajustement des résultats du modèle par rapport aux résultats expérimentaux.

La dernière étape de la modélisation nécessite d'estimer le taux de recouvrement de la surface par le mélange d'eau et des particules. En première approximation, on va considérer que ce taux de

recouvrement a des variations similaires à celles du taux de recouvrement d'une surface contaminée par des particules sèches. On utilisera donc le X_i calculé dans le chapitre 7.

8.3.3.2. Résultats

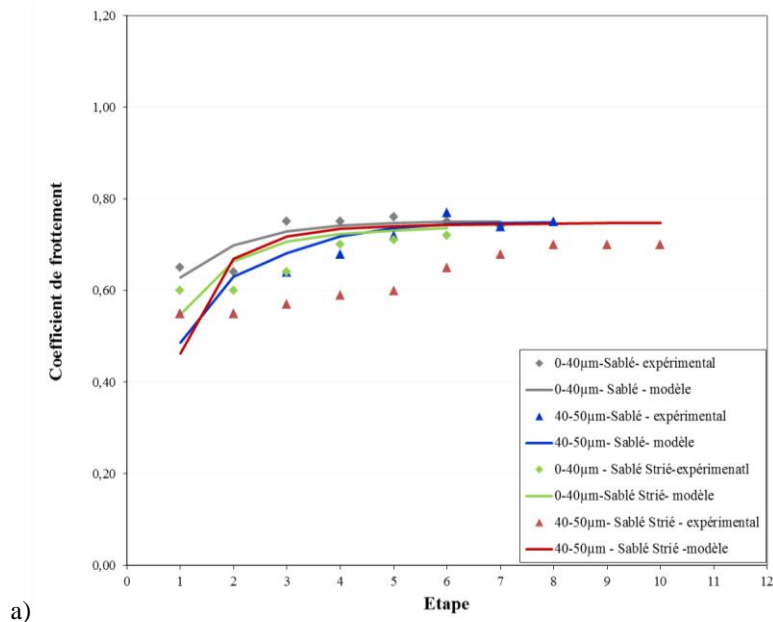
Les valeurs du paramètre c sont présentées dans le Tableau 8.3.

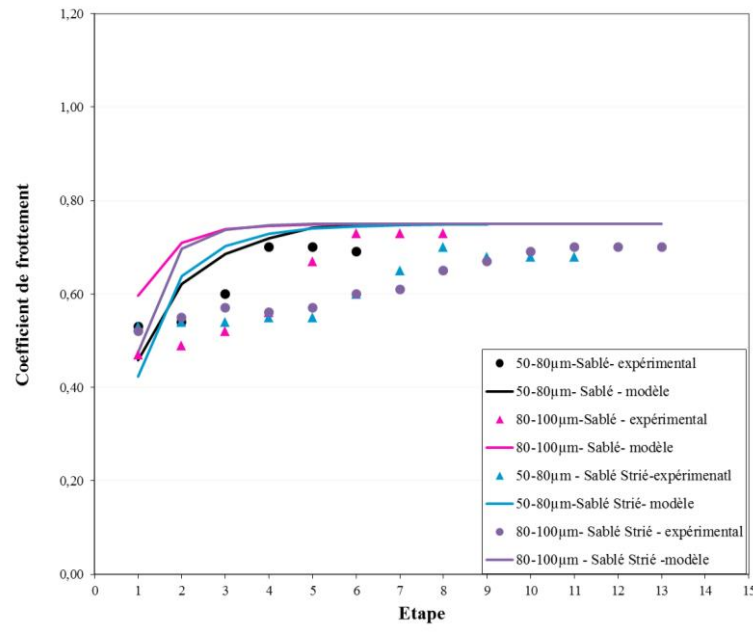
Tableau 8.3 Les valeurs de c trouvées pour toutes les fractions de taille des particules et les deux surfaces d'essais

c	0-40 μm	40-50 μm	50-80 μm	80-100 μm	0-100 μm
Sablé	0.22	0.63	0.58	1.14	0.41
Sablé Strié	0.34	0.45	0.65	0.44	0.39

Si on exclut la valeur de « c » déterminée pour la fraction 80-100 μm sur la surface Sablé Strié (considérée comme une valeur non cohérente), on constate que la valeur de c a tendance à augmenter avec la taille des particules.

Une comparaison des résultats expérimentaux et du modèle est présentée dans la Figure 8.20. Sur la figure 8.21a, les ajustements obtenus sur les fractions fines (< 50 μm) sur les surfaces Sablé et Sablé Strié sont fournies. La figure 8.20b montre les ajustements obtenus sur les fractions grossières (> 50 μm) sur les surfaces Sablé et Sablé Strié.





b) Figure 8.20 Comparaison des résultats expérimentaux et du modèle pour les fractions a) 0-40µm et 40-50µm sur les deux surfaces ; b) 50-80µm et 80-100µm sur les deux surfaces

On peut voir sur la figure 8.20a que le modèle proposé décrit correctement les tendances d'évolution du comportement en frottement des fractions fines (0-40µm et 40-50µm) sur la surface Sablé. Pour la surface Sablé Strié, l'ajustement sur la fraction 40-50 µm n'est pas de très bonne qualité. Un résultat similaire est obtenu sur la fraction 0-100µm, ce qui est logique puisqu'elle contient plus de 60% de particules de taille 0-40µm. En revanche, quand la taille des particules devient plus importante (> 50µm), l'écart entre les résultats du modèle et les résultats expérimentaux se creuse. Le modèle a tendance à surestimer le coefficient de frottement sur une surface contaminée par un mélange d'eau et de particules. Ces écarts pourraient s'expliquer par le fait que les mécanismes induits en présence d'eau sont différents de ceux induits dans le cas d'un assemblage de particules sèches.

En effet, ce modèle prend en compte les interactions entre les particules et l'eau au travers de la viscosité du mélange. Dans le cas des fractions fines (< 50 µm), on observerait essentiellement un mécanisme de cisaillement dans la couche de lubrifiant (comme dans le cas sec) qui pourrait être pris en compte au travers de la viscosité du mélange eau/particules. La quantité d'eau est très importante par rapport à la quantité de particules fines (fractions volumiques en eau sont supérieures à 60% dès la 2^{ème} étape du protocole d'essais, ce qui peut laisser penser que nous sommes déjà en régime capillaire). Quand la taille des particules devient plus importante, un mécanisme de roulement entre les particules et la surface pourrait intervenir en plus des interactions entre les particules et l'eau (Wu et al., 2006), ce qui tendrait à diminuer le coefficient de frottement réel. Ce mécanisme n'est pas pris en compte dans l'estimation du coefficient de frottement dans le modèle.

Enfin, l'estimation du taux de recouvrement de la surface par le mélange eau/particules nécessite d'être approfondi. Il n'a pas été possible dans le cadre de cette travail de se pencher plus précisément sur cette fonction de recouvrement par un mélange eau/particules.

8.4. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons abordée l'effet de la pluie sur la variation du coefficient de frottement sur une surface contaminée par des particules. Le protocole expérimental développé a permis de simuler les deux dernières phases de contamination (lavage et séchage) en laboratoire (voir figure 8.1). Ce protocole nous a permis d'évaluer le comportement du mélange de particules et d'eau à l'interface pneu/chaussée à l'aide d'indicateurs quantitatifs (mesures de frottement et mesures de masses du mélange).

Tout d'abord, l'influence des caractéristiques des particules (comme la taille, la fraction volumique des particules dans l'eau) et des caractéristiques de la surface d'essai (microtexture, macrotexture) sur le frottement est démontrée.

Ensuite, les analyses sont basées sur des approches développées dans le domaine des suspensions colloïdales permettant de caractériser le mélange d'eau et de particules, en partant de la fraction volumique des particules dans le mélange jusqu'à la viscosité de l'ensemble. A partir des masses mesurées tout au long du protocole d'essais, la fraction volumique des particules dans le mélange a été estimée. La présentation de la variation du coefficient de frottement en fonction de cette fraction volumique a permis d'identifier une fraction volumique critique de particules, qui semble légèrement dépendante de la fraction de taille des particules.

En utilisant la fraction volumique des particules estimée, un modèle analytique développé par Maron and Pierce (1956) nous a permis de calculer la viscosité du mélange. Le traçage du coefficient de frottement en fonction de cette viscosité permet de déterminer différentes phase de comportement du lubrifiant à l'interface en fonction des caractéristiques des particules dans le mélange et de la texture de la surface. Les courbes de frottement en fonction de la viscosité montrent que les transitions d'une phase à une autre sont dépendantes de la taille des particules.

Enfin, une première approche en modélisation a été proposée en se basant sur le même principe que dans le cas sec. Le coefficient de frottement total serait obtenu par une pondération du coefficient de frottement mesurée sur un film d'eau et sur celui mesuré sur un film constitué d'un mélange d'eau et de particules. Les premiers résultats semblent cohérents pour les particules de petite taille ($< 50 \mu\text{m}$) mais le modèle aurait tendance à surestimer le frottement pour les particules de grandes tailles. Il faudra approfondir cette approche et travailler plus particulièrement sur l'estimation du taux de recouvrement de la surface par le mélange eau/particules.

Chapitre 9

Conclusions et perspectives

Plan du chapitre

9.1. Bilan des travaux.....	204
9.2. Perspectives.....	207
9.2.1. Influence de la texture	207
9.2.2. Amélioration de la prédiction du niveau d'adhérence	208
9.2.3. Transposition aux routes réelles	209
9.2.4. Vers une évaluation des risques.....	211

9.1. Bilan des travaux

Cette recherche porte sur l'adhérence des chaussées contaminées par des particules fines. Dans la littérature, les études qui ont traité de l'impact des contaminants particulaires, seuls ou se mélangeant avec l'eau de pluie, sur l'adhérence se sont limitées à une représentation qualitative de l'évolution du coefficient de frottement sans donner plus de détails sur les différents facteurs influents comme la durée et l'intensité de la pluie, la quantité et la nature du contaminant, etc. A travers cette thèse, nous avons cherché à comprendre les phénomènes physiques qui interviennent à l'interface pneu/chaussée d'une surface contaminée en mettant en évidence les interactions entre les particules et la texture de la surface et à modéliser les mécanismes de lubrification induits par ces particules.

Dans un premier temps, un état de l'art (chapitre 2) concernant l'adhérence des chaussées contaminées a permis de définir les différents types de contaminants et, pour les particules, leurs cycles géochimiques (cycles de dépôt et de lessivage). Un bilan de différentes études d'adhérence dédiées aux particules a montré les limites de ces travaux qui restent partiels de par leur manque de précisions sur le rôle de la texture des revêtements de chaussée et ses interactions avec les caractéristiques des particules (taille, quantité), sur la viscosité du mélange d'eau (de pluie) et de particules. De ce fait, une approche différente des études antérieures a été choisie dans cette thèse en exploitant le concept du troisième corps, pour la compréhension des mécanismes de lubrification induits par les particules, et les théories de lubrification (sèche en particulier), pour prédire le frottement entre le pneu et la chaussée. La démarche adoptée a été présentée dans le chapitre 3.

Un vaste plan d'expériences a été conduit en laboratoire pour évaluer l'effet des caractéristiques des particules (taille, concentration) et de la texture de la chaussée. Ce plan d'expériences, détaillé dans le chapitre 4, avait pour objectifs la simulation des phénomènes rencontrés sur une surface de chaussée contaminée : la phase de dépôt et la phase de lessivage et séchage. Pour la phase de dépôt, le protocole expérimental a permis de simuler le dépôt des particules, leur compactage par le trafic et le glissement des pneus sur la surface contaminée ; d'analyser les flux de particules dans le contact par des mesures de masses des particules et des observations au MEB ; et d'observer les interactions entre les particules et la texture de la surface de chaussée. Pour la phase de lessivage et de séchage, le protocole expérimental a permis de simuler une pluviométrie contrôlée à l'aide d'un système spécifique (simulateur de pluie) et d'analyser les flux de mélange par des mesures de masses.

Le chapitre 5 est consacré à l'étude de frottement pendant la phase de dépôt. Il a présenté l'effet de la taille et de la concentration des particules et de la texture sur le coefficient de frottement et la masse des particules. Les résultats ont montré l'existence d'une courbe maîtresse entre le frottement et la masse des particules indiquant une diminution du frottement lorsque la masse augmente pour toutes les tailles et concentrations de particules. L'analyse des résultats a permis de faire des hypothèses sur les mécanismes de frottement. En excluant les particules stockées par la macrotecture à l'aide d'un modèle, il a été montré qu'il existe deux mécanismes impliqués pendant le passage du patin de frottement : une éjection des particules de la surface et un blocage des particules par la

microtexture. En fonction de la taille et de la concentration initiale, le blocage peut induire un cisaillement dans le film de particules ou un roulement du patin sur les particules. Il a été observé que les particules les plus fines (de l'ordre de $20\mu\text{m}$ dans cette étude) peuvent être piégées dans les vallées de la surface et continueraient à lubrifier l'interface patin/surface ; ce piégeage expliquerait une valeur stable du coefficient de frottement (après plusieurs passages du patin) qui reste inférieur à ce qu'on obtient sur une surface propre.

Les observations de l'interface de contact au MEB et à la caméra rapide (chapitre 6) ont permis tout d'abord de valider les hypothèses émises sur les mécanismes de piégeage des particules dans le chapitre 5. Ensuite, d'autres mécanismes ont été révélés. Les observations ont montré que les flux sont plus complexes car un troisième mouvement – soulèvement des particules – induit un flux d'éjection et un flux de recirculation. Le flux de recirculation induit également un recouvrement de la surface de l'échantillon qui vient s'ajouter au recouvrement statique lié au dépôt initial des particules. Ces nouvelles données ont permis donc de mieux prendre en compte les flux impliqués dans la modélisation du frottement .

La modélisation a en premier lieu été consacrée au frottement lors de la phase du dépôt (chapitre 7). Le chapitre 7 présente d'abord la modélisation du taux de recouvrement en suivant trois approches différentes. La première basée sur une relation de proportionnalité entre le taux de recouvrement et l'épaisseur du film de particules, qui a conduit rapidement à des incohérences liées au calcul des épaisseurs à partir des cartographies de hauteurs. La deuxième approche est basée sur l'utilisation de la masse des particules dont la relation avec le frottement a été démontrée dans le chapitre 5. En supposant que le taux de recouvrement suit une relation linéaire avec la masse des particules, une surestimation du coefficient de frottement est observée. Ensuite, en ajoutant un exposant qui traduit la non linéarité entre le taux de recouvrement et la masse des particules, le modèle s'ajuste bien aux résultats expérimentaux. Néanmoins, aucune signification physique n'a pu être déterminée pour cet exposant défini par ajustement. Les analyses statistiques ont montré que cet exposant est essentiellement lié à la concentration initiale de particules, qu'il dépendait partiellement de la rugosité de surface et qu'il dépendait peu de la taille des particules. Néanmoins, ceci s'est avéré insuffisant pour approfondir cette piste. La troisième approche, basée un modèle analytique de Dickrell et al (2004) concernant les dépôts gazeux, a été transposée pour le calcul du taux de recouvrement de la surface par des particules. Elle a été menée en partant des flux de particules observées dans le chapitre 6 (caméra rapide) et en établissant un parallèle entre les mécanismes d'éjection et de recirculation des particules et les mécanismes d'adsorption et d'enlèvement des dépôts gazeux. Le modèle de taux de recouvrement a ensuite été incorporé dans un modèle de frottement qui suit la règle de mélange linéaire (« linear mixture rule » en anglais) et pondère la valeur du coefficient de frottement entre deux valeurs extrêmes (μ_{surface} et μ_{film}). Les résultats des ajustements sont très satisfaisants pour toutes les configurations d'essais (surface, taille et concentration de particules). La variation des ratios d'éjection et de recirculation avec la texture de surface et les caractéristiques des particules corrobore les observations visuelles du chapitre 6.

Après avoir exploré la phase de dépôt, le chapitre 8 a été consacré à l'étude de frottement pendant la phase de lessivage et du séchage. En suivant un protocole défini dans le chapitre 4, il a été possible d'évaluer le comportement du mélange de particules et d'eau à l'interface pneu/chaussée à l'aide d'indicateurs quantitatifs (mesures de frottement et mesures de masses du mélange). Les analyses ont montré que la masse du mélange n'est pas un indicateur approprié et qu'il est préférable d'utiliser la fraction volumique des particules dans le mélange (le volume occupé par les particules par rapport au volume total du mélange). Cette fraction volumique a été estimée à partir de la masse du mélange en émettant des hypothèses sur l'empilement des particules. Cette fraction volumique a été incorporée dans le modèle de Maron and Pierce (1956) pour calculer la viscosité du mélange dont la mesure expérimentale n'a pas été possible à cause de la décantation des particules pendant la mesure. La présentation de l'évolution du coefficient de frottement en fonction de cette viscosité a permis de retrouver une courbe d'évolution rappelant celle de Stribeck mais la mise en relation avec les régimes de lubrification doit être approfondie. En revanche, l'impact des caractéristiques des particules dans le mélange et de la texture de la surface sur le frottement mouillé a pu être étudié.

A travers ce travail de thèse il a donc été possible de reproduire en laboratoire les phénomènes de contamination de la chaussée par des particules fines et de prédire l'évolution du coefficient de frottement avec des indicateurs physiques. La Figure 9.1 récapitule les phases reproduites ainsi que le modèle qui permet de prédire le frottement sur la phase de dépôt et la phase de lessivage en fonction du taux de recouvrement et de deux paramètres liées à chaque phase. A la phase de dépôt, les deux paramètres sont μ_{film} et μ_{surface} qui représentent, respectivement, le coefficient de frottement mesuré sur un film de particules sèches et le coefficient de frottement mesuré sur une surface propre. A la phase de lessivage, ces deux paramètres (μ_{film} et μ_{surfaces}) représentent, le coefficient de frottement mesuré sur un film du mélange d'eau et de particules (lié à la viscosité) et le coefficient de frottement mesuré sur une surface saturé d'eau. L'estimation du coefficient de frottement dans la phase de mouillage doit être complétée et fera l'objet de travaux ultérieurs.

Toutefois, il faut souligner que cette prédiction du coefficient de frottement a été rendue possible par une meilleure compréhension du comportement des particules à l'interface pneu/chaussée en s'appuyant sur des visualisations du contact (caméra rapide, MEB) et de l'analyse des flux de particules. Les résultats obtenus ont montré aussi l'intérêt de l'approche du troisième corps qui fournit un cadre méthodologique pour conduire les expérimentations et les analyses.

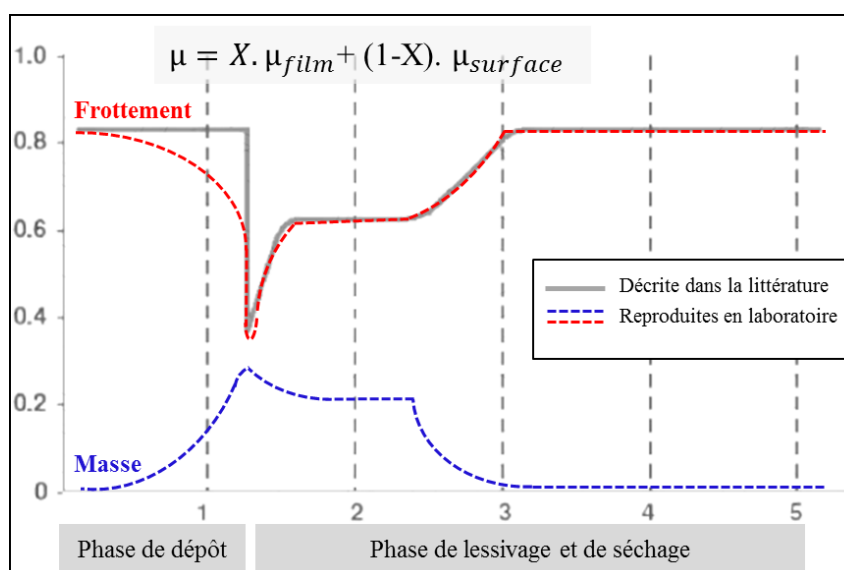


Figure 9.1 Représentation des phénomènes

9.2.Perspectives

L'état de l'art et la veille réalisées au cours de cette thèse ont montré que l'effet de contaminants de type particules sur l'adhérence des chaussées est relativement peu traité jusqu'ici. Or, les résultats expérimentaux présentés dans ce mémoire ont confirmé l'importance de cet effet, que ce soit avec des particules sèches ou mélangées avec de l'eau. Plusieurs sujets mériteraient des travaux de recherche complémentaires à la suite de cette thèse.

9.2.1. Influence de la texture

En premier lieu, il sera intéressant d'approfondir les analyses sur l'effet de la microtexture de la surface, celle-ci étant responsable de l'effet de piégeage des particules ce qui affecte le frottement à long terme. Pour cela, il sera intéressant d'étudier d'autres niveaux de microtexture sur des surfaces modèles. De même, le passage à des surfaces réelles est indispensable. Les expérimentations présentés dans ce manuscrit se limitent à un seul niveau de microtexture ($S_q = 13,9\mu\text{m}$) et un seul type de matériau (l'aluminium). Or, la surface des granulats constituant de la chaussée présente une texture variable selon le niveau du trafic (usure de la texture sous l'effet du polissage). Des essais préliminaires ont été réalisés dans le cadre de cette thèse sur une surface de granulats « usés » ayant une texture proche de celle de la plaque d'aluminium ($S_q = 30\mu\text{m}$) et une surface de granulats « brut » ayant une texture plus élevée que celle de la plaque d'aluminium ($S_q = 45\mu\text{m}$). Dans le cas sec, les résultats ont montré un niveau de frottement proche de celui de la plaque Sablé Strié pour la surface des granulats usés et un niveau de frottement plus élevé pour la surface des granulats bruts (Figure 9.2a). Dans le cas mouillé, l'évolution du coefficient de frottement est plus compliquée à analyser (Figure 9.2b). Une étude de l'effet des particules sur une surface réelle comme celle des granulats mérite être approfondie en analysant les interactions entre les particules et une surface une texture

non homogène. En particulier, les mécanismes liés à la création de ponts capillaires entre les particules ainsi que les liaisons avec les rugosités de différentes tailles (tension superficielle de surface) doivent être analysés.

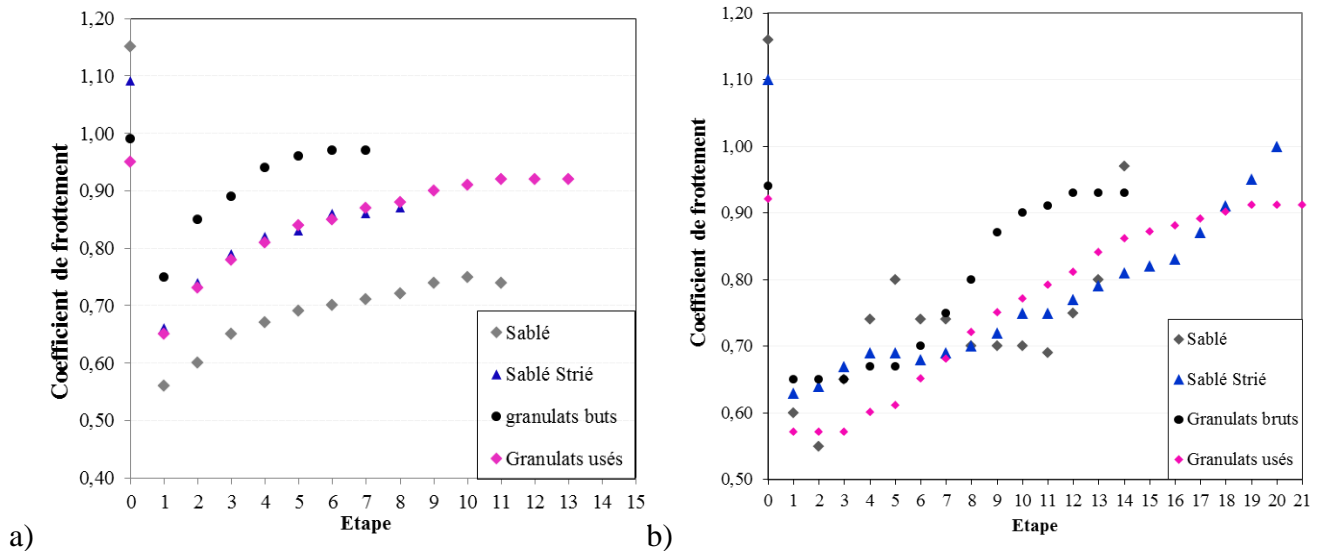


Figure 9.2 Résultats préliminaires de l'évolution du coefficient de frottement pour les quatre surfaces différentes (concentration 20g/m², fraction 0-100µm) : a) phase de dépôt, b) phase de mouillage et de séchage

9.2.2. Amélioration de la prédiction du niveau d'adhérence

Par ailleurs, cette thèse a également proposé des modèles prédictifs du frottement en conditions sèches et mouillées. Ces modèles font intervenir deux paramètres liés à la surface (μ_{surface}) et au film de lubrifiant (μ_{film}). Le premier paramètre est déterminé à partir des mesures expérimentales sur une surface propre. Le deuxième paramètre est déterminé par ajustements. Pour améliorer ce modèle de frottement proposé dans cette thèse, une modélisation de ces deux paramètres avec des approches physiques en utilisant les motifs de la texture de la surface ou la viscosité du film des particules est nécessaire. Il sera également nécessaire de travailler sur la fonction de taux de recouvrement de la surface par le mélange eau/particules et de modéliser son évolution d'une manière plus fine.

De plus, pour aller plus loin que la modélisation analytique basée sur ce taux de recouvrement de la surface, l'utilisation d'une autre approche se basant sur la lubrification à l'interface est possible. Tichy (1995) a étudié le contact entre deux surfaces en glissement séparées par un fluide dans un écoulement unidimensionnel. Tichy dans son modèle considère que il existe trois couches de lubrifiant : deux couches intermédiaire proches des surfaces de glissement ayant une viscosité η_1 et une épaisseur δ et une couche loin des surfaces ayant une viscosité η_0 . Le cisaillement de couche de lubrifiant intervient dans la couche au milieu (Figure 9.5).

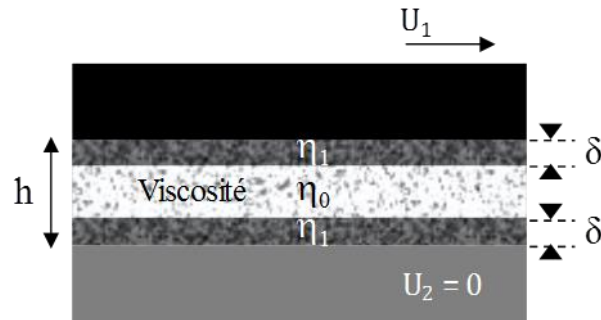


Figure 9.3 Cas particulier étudié par Tichy (1995)

Considérant la couche de particules comme un film de lubrifiant continu, le cas particulier traité par Tichy est finalement très proche des conditions de contact étudiées dans la thèse. On supposant que le patin de frottement entraîne aussi couche de particules adhérentes en surface (ceci est observé lors de l'essuyage de la surface du patin après chaque mesure de frottement). La deuxième couche intermédiaire présente les particules piégées par la microtexture. Cette approche pourrait être prise en compte dans les futures études.

9.2.3. Transposition aux routes réelles

Il faut ensuite travailler sur la transportation de ces travaux au cas des routes réelles. En effet, une campagne d'essais in-situ a été lancée dans le cadre de cette thèse. L'objectif est de mesurer le frottement sur la surface de la chaussée pendant des étapes différentes de contamination (traduites par le nombre de jours secs depuis la dernière pluie) et d'observer un échantillon de granulat prélevé pour voir l'état de contamination de la surface. De lier l'état de la contamination de la surface (épaisseur du film de contaminant, nature et taille du contaminant, etc) avec le coefficient de frottement et de comparer ces résultats à ce qui était réalisé en laboratoire permet d'enrichir cette étude. Jusqu'à maintenant, seulement deux campagnes ont été réalisées : la première, qui a servi de point de départ de notre protocole de suivi, a été réalisée à un jour sec après une période pluvieuse ; la deuxième a été réalisée à neuf jours secs depuis la dernière pluie. Les mesures de frottement correspondant à un jour sec donnent un coefficient de frottement (moyenné sur trois mesures à trois zones différentes) égal à 0,97 à sec et 0,56 à l'état humide (en réalisant deux pulvérisations manuelles, ce qui correspond à une étape de mouillage par le simulateur de pluie). Les mesures de frottement réalisées à neuf jours secs donnent un coefficient de frottement égal à 0,98 à sec et 0,58 à l'état humide. En parallèle, des observations ont été réalisées au MEB sur deux granulats prélevés dans la bande de roulement (Figure 9.3). Il a été observé la présence de particules fines (taille $< 10\mu\text{m}$) qui se déposent sur la surface de chaque granulat. Ces particules sont moins nombreuses et plus fines sur la surface du granulat prélevé à un jour sec. Les analyses EDX ont montré que ces particules ont la même composition chimique que celle du granulat. Elles proviennent probablement de l'usure des aspérités de la surface des granulats par le trafic. Des observations en profondeur (en coupe) des deux

granulats prélevés (Figure 9.4) ont montré qu'il n'existe pas des particules libres sur la surface mais plutôt des particules enrobées par un film du liant. Les analyses de ces résultats préliminaires sont de type exploratoire. Il faut poursuivre les mesures et les prélèvements dans des états de contamination plus importante.

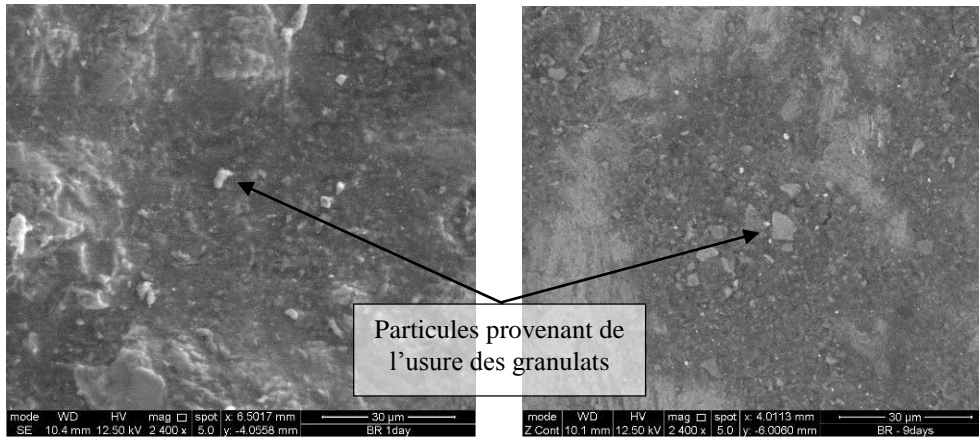


Figure 9.4 Observation en surface du granulat prélevé de la bande de roulement à : a) 1 jour sec b) 9 jours secs

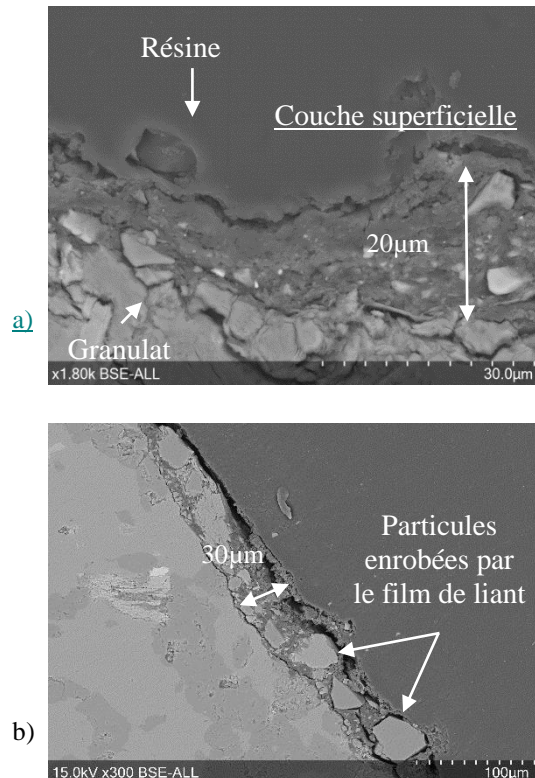


Figure 9.5 Observation en coupe des granulats prélevés de la bande de roulement à : a) 1 jour sec b) 9 jours secs

9.2.4. Vers une évaluation des risques

Pour aller plus loin, l'évaluation des risques sur chaussée contaminée est la cible à atteindre. La plus grande difficulté méthodologique, dans le domaine de l'accidentologie, consiste à ne pas se contenter de mesurer la fréquence des accidents mais à évaluer le risque c'est-à-dire la fréquence des accidents rapportés à l'exposition au risque qui est souvent le nombre de kilomètres parcourus, mais qui peut être une autre variable. C'est souvent là que les données manquent ou sont imprécises, et c'est la raison pour laquelle il faut recourir à un certain nombre d'enquêtes complémentaires pour avoir des informations plus précises.

Généralement, la collecte d'informations pour les études de sécurité reprend les paramètres les plus couramment analysés comme le mode de déplacement (véhicule léger, poids lourd, etc.), les caractéristiques de l'utilisateur (âge, sexe, etc.), le type de réseau (autoroute, route nationale, etc.), le moment (mois, jour, heure) et l'infraction (alcool, vitesse, port de la ceinture). Il est souvent plus difficile d'avoir les caractéristiques de l'infrastructure (géométrie) et encore plus rare d'avoir une évaluation de l'état de surface (adhérence, texture).

Or, pour intégrer l'effet des variations saisonnières (comme la contamination) sur la sécurité routière, il faudrait d'abord construire une base de données statistique en intégrant ces phénomènes, ce qui suppose de réaliser de nombreuses campagnes de suivi sur des sites aux caractéristiques variées. De cette manière, on pourrait évaluer le sur-risque d'accident sur chaussée contaminée, déterminer les paramètres prépondérants et leurs interactions (texture et nombre de jours secs antécédents, etc.) et proposer à terme des valeurs seuils pour certains d'entre eux.

Annexe A : méthodes de caractérisations des particules

Granulométrie par diffraction laser

La diffraction laser est largement employée comme technique granulométrique pour des matériaux allant de quelques dizaines de nanomètres à plusieurs millimètres. Cette technique mesure les distributions de taille des particules en mesurant la variation angulaire de l'intensité de lumière diffusée lorsqu'un faisceau laser traverse un échantillon de particules dispersées. Plus les particules sont de taille importante, plus la lumière diffusée suit de petits angles par rapport au faisceau laser. Les données relatives à l'intensité diffusée en fonction de l'angle sont ensuite analysées pour calculer la taille des particules qui ont créé l'image de diffraction. La taille des particules représente le diamètre de la sphère équivalente ayant un même volume que la particule.

Le granulomètre à diffraction laser utilisé dans cette étude est de type *Malvern® Mastersizer 2000*. Cet appareil permet d'effectuer des mesures de taille de particules sur des suspensions en voie liquide. L'appareil se compose d'un pot d'échantillon, d'une cellule de mesure et d'un passeur automatique permettant de transférer l'échantillon des pots vers la cellule de mesure. Ce passeur dispose d'une tête de prélèvement munie d'un agitateur et d'une pompe permettant d'assurer de la dispersion homogène de l'échantillon prélevé. Dans la cellule échantillon, les particules sont mises en suspension dans l'eau qui est mise en circulation. Le modèle physique utilisé pour le calcul de la courbe granulométrique suit la théorie de Fraunhofer.

Annexe B : méthodes de mesures et de traitement des cartographies

Traitement par défaut sur toutes les cartographies

Les analyses réalisées avec le logiciel MOUTAINS MAP, permettant l'extraction des différents paramètres de la texture. Le protocole utilisé au cours de ces analyses peut être présentée sous la forme du diagramme suivant (Figure A.1).

Les étapes sont les suivantes :

1. Suppression des points aberrants
2. Rebouchage des points non mesurés avec un algorithme utilisant les points voisins ;
3. Redressement de la surface par la méthode de moindres carrés;
4. Seuillage de 0.5% les plus hauts et 0.5% les plus bas de la surface pour enlever les artéfacts dues aux mesures.



Figure B.1 Méthode de traitement appliquée sous MountainsMap sur toutes les cartographies

Indentation du patin

Après avoir réalisé le traitement par défaut réalisé sur chaque cartographie, l'indentation en profondeur du patin de l'appareil de mesure SRT sur les aspérités de la surface d'essai est prise en compte. Ceci permet d'extraire la surface du contact entre le patin et la surface en tranchant la profondeur d'indentation de la gomme sur la surface (0.3mm) à partir du point le plus haut des aspérités. Les étapes du traitement sont :

1. Suppression des points aberrants
2. Rebouchage des points non mesurés avec un algorithme utilisant les points voisins ;
3. Redressement de la surface par la méthode de moindres carrés;
4. Seuillage de 0.5% les plus hauts et 0.5% les plus bas de la surface pour enlever les artéfacts dues aux mesures.
5. Tranche en profondeur à 0.3mm du point le plus haut (correspond à l'enfoncement du patin) pour extraire l'aire du contact.

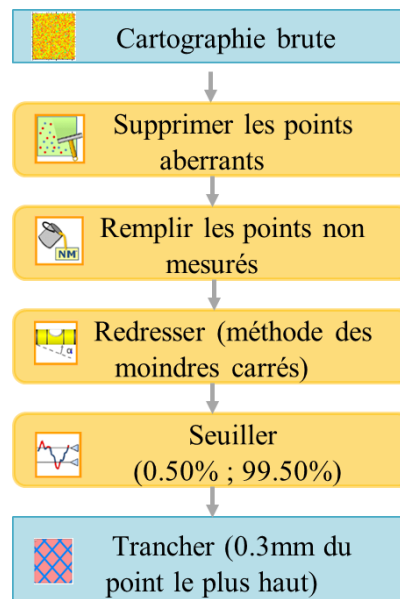


Figure B.2 Méthode de appliquée sous MountainsMap pour extraire la surface de contact après l'indentation de la gomme

Annexe C : phase de dépôt – frottement à l'interface

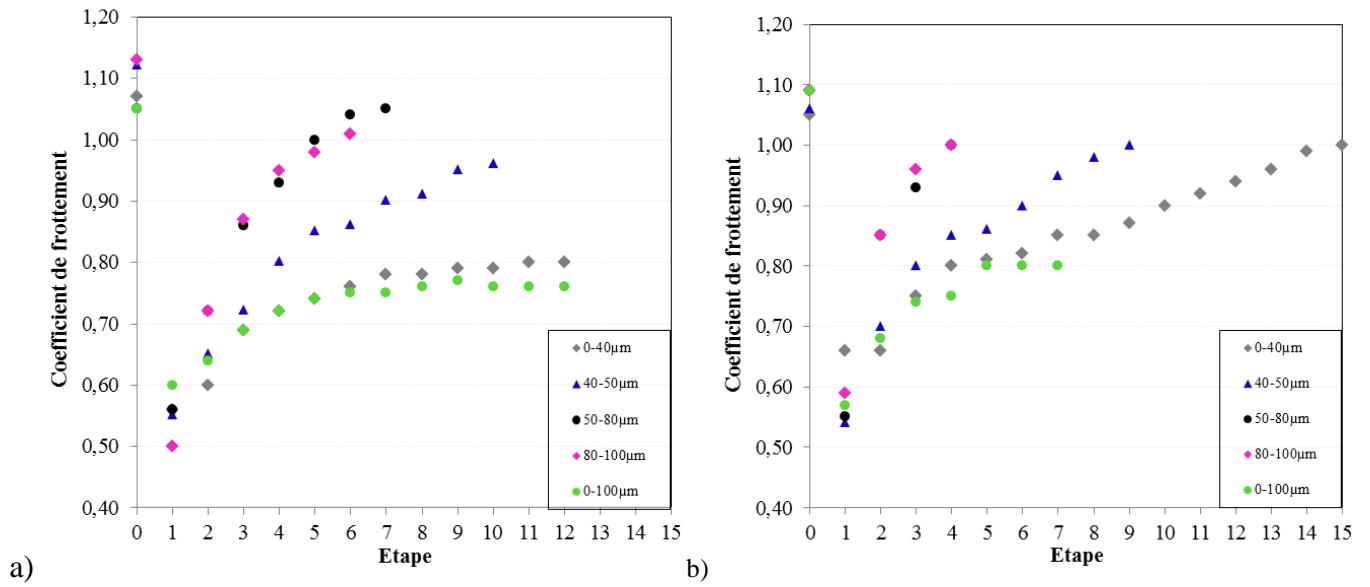


Figure C.3 Variation du coefficient de frottement pour les cinq fractions de taille des particules (concentration 10g/m²): a) Sablé, b) Sablé Strié

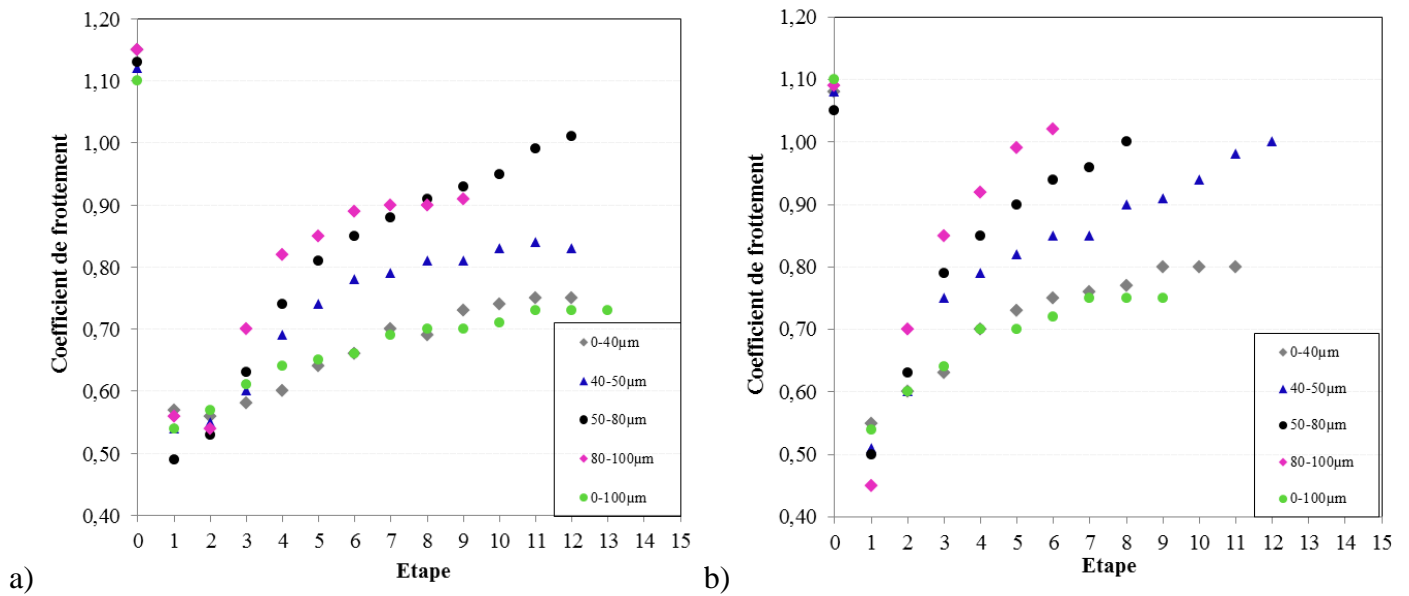


Figure C.4 Variation du coefficient de frottement pour les cinq fractions de taille des particules (concentration 40g/m²): a) Sablé, b) Sablé Strié

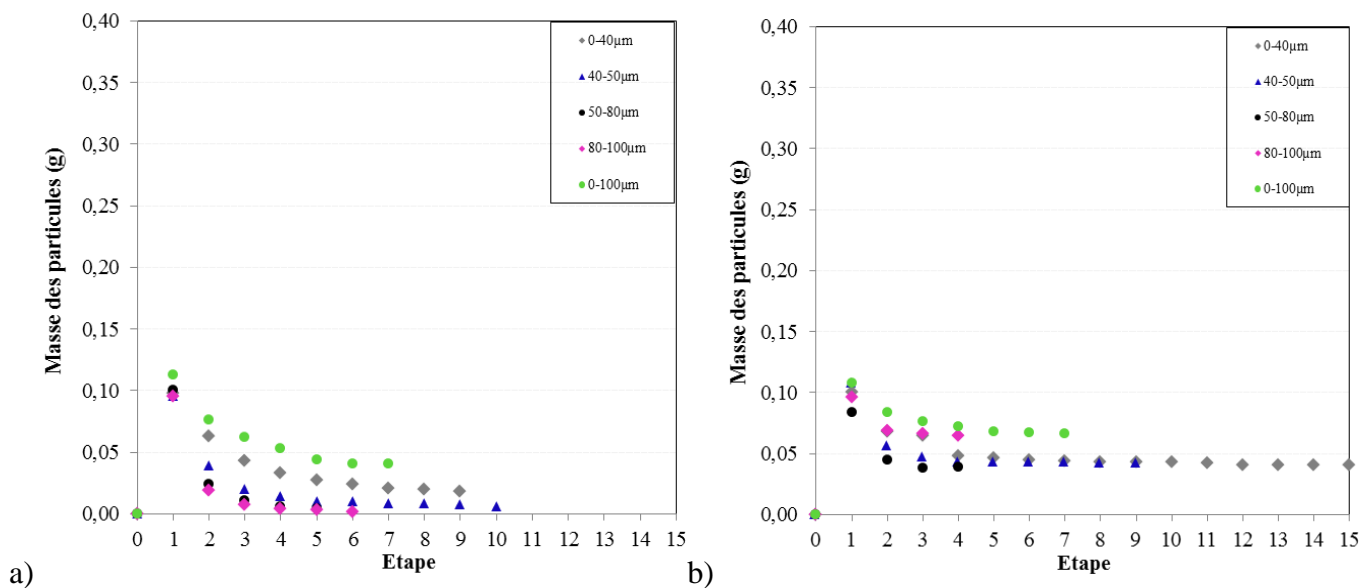


Figure C.5 Variation de la masse des particules pour les cinq fractions de taille des particules (concentration 10g/m²) : a) Sablé, b) Sablé Strié

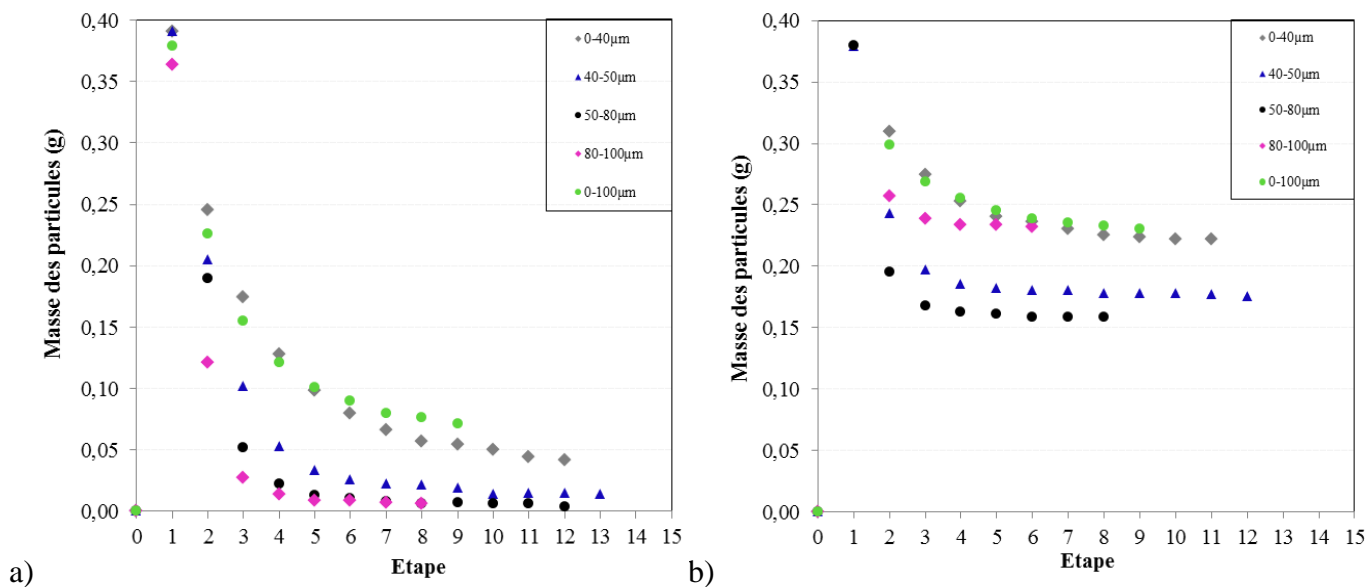


Figure C.6 Variation de la masse des particules pour les cinq fractions de taille des particules (concentration 40g/m²) : a) Sablé, b) Sablé Strié

Liste des références

- Andresen, A., Wambold, J.C., 1999. Friction fundamentals, concepts and methodology.
- Archard, J.F., 1953. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *J. Appl. Phys.* 24, 981–988.
- AURAN, 2014. Trafic routier en Loire Atlantique [WWW Document]. Agence Urban. Région Nantaise. URL <http://www.auran.org/actualites/trafic-routier-en-loire-atlantique> (accessed 4.19.18).
- Azushima, A., Xue, W.D., Yoshida, Y., 2009. Influence of Lubricant Factors on Coefficient of Friction and Clarification of Lubrication Mechanism in Hot Rolling. *ISIJ International*, Vol. 49, No. 6, pp. 868–873
- B. Shakely, R., Jewett Henry, J., J. Heinsohn, R., 1980. Effect of pavement contaminants on skid resistance. *Transp. Reaserch Rec.*
- Bennis, T.A., De Wit, B.L., 2003. STATE OF THE ART ON FRICTION AND TEXTURE MEASUREMENTS. Presented at the The XXIIInd PIARC World Road CongressWorld Road Association - PIARC.
- Berthier, Y., 1990. Experimental evidence for friction and wear modelling. *Wear* 139, 77–92.
- Berthier, Y., Godet, M., Brendle, M., 1989. Velocity accommodation in friction. *Tribol. Trans.* 32, 490–496.
- Bird, G., Scott, W.J.O., 1936. Measurement of the Non-Skid Properties of Road Surfaces. *Road Res. Bull.*, Departement of scientific and industriel research 17–19.
- Cenek, P.D., Davies, R.B., Loader, M., McLarin, M.W., 2004. Crash risk relationships for improved safety management of roads, in: *Towards Sustainable Land Transport Conference*. pp. 21–24.
- Chebbo, G., 1992. Solides des rejets pluviaux urbains : caractérisation et traitabilité (phdthesis). Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Choupas, M., Ranchet, J., Biau, D., Valin, M., CAMPBELL, J.L.E.E., 1995. Réhabilitation de l'assainissement des voies rapides urbaines. *Guide Tech. Qual. Environ. VRU* 15.
- Deletic, A., Orr, D.W., 2005. Pollution Buildup on Road Surfaces Vol 131, No 1.
- Denape, J., 2014. Third body concept and wear particle behavior in dry friction sliding conditions. *Tribol. Asp. Mod. Aircr. Ind.* 640, 1–12.
- Denape, J., Berthier, Y., Vincent, L., 2001. Wear Particle Life in a Sliding Contact Under Dry Conditions : Third Body Approach, in: *Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap Between the Macro- and Micro/Nanoscales*, NATO Science Series. Springer, Dordrecht, pp. 393–411.
- Descartes, S., Berthier, Y., 2002. Rheology and flows of solid third bodies: background and application to an MoS 1.6 coating. *Wear* 252, 546–556.
- Descartes, S., Desrayaud, C., Niccolini, E., Berthier, Y., 2005. Presence and role of the third body in a wheel–rail. *Wear* 258, 1081–1090.
- Dickrell, P.L., Sawyer, W.G., Erdemir, A., 2004. Fractional Coverage Model for the Adsorption and Removal of Gas Species and Application to Superlow Friction Diamond-Like Carbon. *J. Tribol.* 126, 615–619.

- Do, M., Cerezo, V., Zahouani, H., 2014. Laboratory test to evaluate the effect of contaminants on road skid resistance. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* 228, 1276–1284.
- Do, M.T., 2010. Adhérence des chaussées : de l'étude cognitive aux applications (HDR). Universit  de Bordeaux I.
- Do, M.-T., 2005. Relation entre la microtexture et l'adhérence. *Bull. Lab. Ponts Chaussées Num ro Spec. Adhérence.*
- Do, M.-T., Cerezo, V., Beautru, Y., Kane, M., 2013. Modeling of the connection road surface microtexture/water depth/friction. *Wear, Wear of Materials 2013* 302, 1426–1435.
- Dougherty, P.S.M., Pudjoprawoto, R., Higgs, C.F., 2011. An investigation of the wear mechanism leading to self-replenishing transfer films. *Wear* 272, 122–132.
- Durand, C., 2003. Caractérisation physico-chimique des produits de l'assainissement pluvial : origine et devenir des métaux traces et des polluants organiques. Poitiers.
- Durand, C., Ruban, V., Legret, M., 2004. Caractérisation physico-chimique des sédiments de deux bassins de retenue des eaux pluviales : Wissous (urbain) et Ronchin (routier).
- Durin, D., 2006. Transfert et transport colloidal de polluants métalliques. Université de Nantes.
- Egodawatta, P., Goonetilleke, A., 2008. Modelling pollutant build-up and wash-off in urban road and roof surfaces.
- Egodawatta, P., Thomas, E., Goonetilleke, A., 2007. Mathematical interpretation of pollutant wash-off from urban road surfaces using simulated rainfall. *Water Res.* 41, 3025–3031.
- Egodawatta, P.K., 2007. Translation of small-plot scale pollutant build-up and wash-off measurements to urban catchment scale (Thesis). Queensland University of Technology.
- Eisenberg, D., 2004. The mixed effects of precipitation on traffic crashes. *Accid. Anal. Prev.* 36, 637–647.
- El-Mufleh, A., 2011. Répartition des micropolluants métalliques et organiques au sein de la matrice solides des sédiments issus de l'assainissement des eaux pluviales urbaines : comparaisons et critiques de méthodes de fractionnement. Ecole centrale de Nantes.
- Fahl C F, 1982. Motif combination—a new approach to surface profile analysis *Wear* 83 165–79.
- Fall, A., Weber, B., Pakpour, M., Lenoir, N., Shahidzadeh, N., Fiscina, J., Wagner, C., Bonn, D., 2014. Sliding Friction on Wet and Dry Sand. *Phys. Rev. Lett.* 112, 175502.
- Farr, R.S., Groot, R.D., 2009. Close packing density of polydisperse hard spheres. *J. Chem. Phys.*
- Fillot, N., Jordanoff, I., Berthier, Y., 2007. Wear modeling and the third body concept. *Wear* 262,
- Forster S W, 1981. Aggregate microtexture: profile measurement and related frictional levels, Report FHWA /RD-81/107, FHWA.
- Godet, M., 1984. The third-body approach: A mechanical view of wear. *Wear* 100, 437–452.
- Gothié, M., 2005. Les mesures de l'adhérence des chaussées en France et leur interprétation. *Bull. Lab. Ponts Chaussées Num ro Spec. Adhérence.*
- Greenwood, J.A., 1984. A Unified Theory of Surface Roughness. *Proc. R. Soc. Lond. Math. Phys. Eng. Sci.* 393, 133–157.
- Hall, J., Glover, L., Smith, K., Evans, L., Wambold, J.C., Yager, T.J., Rada, Z., 2006. Guide for Pavement Friction.
- Heshmat, H., 1994. On the theory of quasi-hydrodynamic lubrication with dry powder: application to development of high-speed journal bearings for hostile environments. *Tribol. Ser.* 27, 45–64.

- Heshmat, H., 1993. Wear reduction systems for coal-fueled diesel engines II. Experimental results and hydrodynamic model of powder lubrication. *Wear, Wear of Materials: Proceedings of the 9th International Conference* 162–164, 518–528.
- Higgs, C.F., Worniyoh, E.Y.A., 2008. An in situ mechanism for self-replenishing powder transfer films: Experiments and modeling. *Wear* 264, 131–138.
- Hill, B.J., Henry, J.J., 1981. Short-term, weather-related skid resistance variations 836.
- ISO 25178, 2016. Spécification géométrique des produits (GPS) -- État de surface: Surfacique -- Partie 1: Indication des états de surface.
- ISO, E., 1997. 13473-1. Charact. Pavement Texture Use Surf. Profiles–Part 1 Determ. Mean Profile Depth ISO 13473-1 1997 This Page Has Been Intentionally Left Blank 15901–7.
- Ives, L.K., Peterson, M.B., 1985. Fundamentals of High-Temperature Friction and Wear With Emphasis on Solid Lubrication for Heat Engines 41.
- Kayhanian, M., Suverkropp, C., Ruby, A., Tsay, K., 2007. Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration. *J. Environ. Manage.* 85, 279–295.
- Kreider, M.L., Panko, J.M., McAtee, B.L., Sweet, L.I., Finley, B.L., 2010. Physical and chemical characterization of tire-related particles: comparison of particles generated using different methodologies. *Sci. Total Environ.* 408, 652–659.
- Lambourn, R.F., Viner, H.E., 2006. Friction tests on contaminated road surfaces. TRL 26.
- Lee, P.K., 1996. Contribution a l'étude de la contamination de l'hydrosphère (eau, mes) par les métaux lourds (pb, zn, cd) en domaine autoroutier : étude d'un site pilote (les ardillères, a-71) ; comparaisons avec d'autres systèmes d'épuration et études expérimentales. Orléans.
- Lee, B.H., Keum, Y.T., Wagoner, R.H., 2002. Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* 130–131. 60–63
- Legret, M., Pagotto, C., 1999. Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway. *Sci. Total Environ.* 235, 143–150.
- Liu, A., Egodawatta, P., Goonetilleke, A., 2011. Variability of input parameters related to pollutants build-up in stormwater quality modelling, in: Valentine, E.M. (Ed.), *Proceedings of 34th IAHR World Congress. Presented at the 34th International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR) World Congress, Engineers Australia, Brisbane Convention and Exhibition Centre, Brisbane, Qld*, pp. 2647–2654.
- Loo-Morrey, M., 2006. Dry contaminants scoping study.
- Maron, S.H., Pierce, P.E., 1956. Application of ree-eyring generalized flow theory to suspensions of spherical particles. *J. Colloid Sci.* 11, 80–95.
- Mewis, J., Wagner, N.J., 2009. Current trends in suspension rheology. *J. Non-Newton. Fluid Mech., Whither Rheology?* 157, 147–150.
- MICHELIN, 2001. Le pneu L'adhérence : Les mécanismes de l'adhérence sur route.
- Mills, R., Dwyer-Joyce, R.S., Loo-Morrey, M., 2009. The mechanisms of pedestrian slip on flooring contaminated with solid particles. *Tribol. Int.* 42, 403–412.
- Mitchell, J.K., 1993. *Fundamentals of Soil Behavior*, second Edition.
- Moore D. F., 1971. The Influence of Surface Topography on the Friction and Lubrication of Elastomers. *Ann. CIRP*.

- Moore D.F., 1975. The Friction of Pneumatic Tyres. Eisevier, Amsterdam. [WWW Document].
- Namdeo, A.K., Colls, J.J., Baker, C.J., 1999. Dispersion and re-suspension of fine and coarse particulates in an urban street canyon. *Sci. Total Environ.* 235, 3–13.
- NF EN 933-1, 2012. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats Partie 1 : Détermination de la granularité — Analyse granulométrique par tamisage.
- NF EN ISO 11885, 2009. Qualité de l'eau Dosage d'éléments choisis par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-OES).
- Novotny, V., Sung, H.-M., Bannerman, R., Baum, K., 1985. Estimating Nonpoint Pollution from Small Urban Watersheds. *J. Water Pollut. Control Fed.* 57, 339–348.
- Pagotto, C., 1999. Etude sur l'émission et le transfert dans les eaux et les sols des éléments traces métalliques et des hydrocarbures en domaine routier. Poitiers.
- Persson, B.N.J., Tartaglino, U., Albohr, O., Tosatti, E., 2005. Rubber friction on wet and dry road surfaces: The sealing effect. *Phys. Rev. B* 71, 035428.
- Ping, C., Xinping, Y., Xiuqin, B., Chengqing, Y., 2010. Effects of Contaminants on Skid Resistance of Asphalt Pavements. *Traffic Transp. Stud., Proceedings.*
- Pitt, R.E., 1987. Small-storm urban flow and particulate washoff contributions to outfall discharges. Wisconsin Univ., Madison (USA).
- Popov, V.L., Voll, L., Li, Q., Chai, Y.S., Popov, M., 2014. Generalized law of friction between elastomers and differently shaped rough bodies. *Sci. Rep.* 4, 3750.
- Quemada, D., 1977. Rheology of concentrated disperse systems and minimum energy dissipation principle. *Rheol. Acta* 16, 82–94.
- Roesner, L.A., 1982. Quality of Urban Runoff, in: Kibler, D.F. (Ed.), *Urban Stormwater Hydrology.* American Geophysical Union, pp. 161–187.
- Roger, S., Montrejaud-Vignoles, M., Andral, M.C., Herremans, L., Fortune, J.P., 1998. Mineral, physical and chemical analysis of the solid matter carried by motorway runoff water. *Water Res.* 32, 1119–1125.
- Ruban, V., Clozel, B., Conil, P., Durand, C., 2003. Origine, caractérisation et gestion des boues de l'assainissement pluvial routier et urbain : Point sur les connaissances actuelles et perspective.
- Sartor, J.D., Boyd, G.B., 1972. *Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants.* U.S. Government Printing Office.
- SETRA, 1997. L'eau et la route - vol 4 : les atteintes aux milieux aquatiques.
- SETRA, 1995. Pollution de proximité par voie aérienne-constat et perspectives. *Note Inf. Econ. Environ. Concept.*
- Shewan, H.M., Stokes, J.R., 2015. Analytically predicting the viscosity of hard sphere suspensions from the particle size distribution. *J. Non-Newton. Fluid Mech., Rheometry (and General Rheology): Festschrift dedicated to Professor K Walters FRS on the occasion of his 80th birthday* 222, 72–81.
- Singer, I.L., Pollock, H., 1991. *Fundamentals of friction: macroscopic and microscopic processes.* Springer Science & Business Media.
- Tyfour, W.R., 2009. Tire skid resistance on contaminated wet pavements. *Jordan J. Mech. Ind. Eng.* 119–124.

- Vaze, J., Chiew, F.H., 2003. Study of pollutant washoff from small impervious experimental plots. *Water Resour. Res.* 39.
- Vignoles, M., 1991. Données qualitatives et quantitatives concernant les sédiments contenus dans les eaux de ruissellement à leur entrée dans le réseau.
- Wang, C., Quddus, M.A., Ison, S.G., 2013. The effect of traffic and road characteristics on road safety: A review and future research direction. *Saf. Sci.* 57, 264–275.
- Wijesiri, B., Egodawatta, P., McGree, J., Goonetilleke, A., 2015. Process variability of pollutant build-up on urban road surfaces. *Sci. Total Environ.* 518–519, 434–440.
- Wilson, D.J., 2013. The effect of rainfall and contaminants on road pavement skid resistance.
- Wilson, D.J., 2006. An analysis of the seasonal and short-term variation of road pavement skid resistance (Thesis). *ResearchSpace@Auckland*.
- Wu, Y.Y., Tsui, W.C., Liu, T.C., 2007. Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives. *Wear.* 262. 819-825.
- Zahouani, H., Vargiolu, R., Do, M.-T., 2000. Characterization of microtexture related to wet road/tire friction. Presented at the SURF 2000: Fourth International Symposium on Pavement Surface Characteristics on Roads and Airfields World Road Association - PIARC.

Titre : Adhérence des chaussées contaminées par des particules

Mots clés : frottement, chaussée, particules, texture, troisième corps, lubrification

Résumé : La thèse vise à prédire l'adhérence des chaussées contaminées par des particules fines. Ces particules se déposent sur la chaussée pendant les périodes sèches et agissent, seules ou se mélangeant avec l'eau de pluie, comme un lubrifiant à l'interface pneu/chaussée. La démarche de recherche est basée sur l'approche du troisième corps en distinguant les phases de dépôt et de lessivage des particules par la pluie. Les particules sont caractérisées par leur distribution granulométrique et leurs compositions chimique et minéralogique. L'étude est menée à trois échelles : globale, par des mesures de frottement et de masses du troisième corps (particules pendant le dépôt et le mélange eau/particules pendant le lessivage) ; dans l'aire de contact par des analyses de flux du troisième corps ;

et au niveau des particules par des observations au MEB. Les flux de particules pendant la phase de dépôt sont identifiés par des visualisations avec une caméra rapide. L'interaction entre les particules et la texture de la chaussée est mise en évidence par des observations microscopiques. La modélisation des flux permet d'estimer le taux de recouvrement d'une surface qui, à son tour, est utilisé comme un facteur de pondération pour calculer le coefficient de frottement pendant la phase de dépôt. En présence d'eau, la fraction volumique des particules est utilisée pour estimer la viscosité du mélange. Le coefficient de frottement pendant la phase de lessivage dépend de cette viscosité et du taux de recouvrement de la surface. Les résultats sont discutés en termes d'influence des caractéristiques des particules (concentration, taille) et de la texture de la chaussée

Title : The skid resistance of roads contaminated by particles

Keywords : Friction, road, particles, texture, third body, lubrication

Abstract : The thesis aims to predict the skid resistance of road surfaces contaminated by fine particles. These particles are deposited on the road during dry periods and act, alone or mixing with rainwater, as a lubricant at the tire / road interface. The research methodology is based on the third body approach by distinguishing the phases of deposit and washing of particles by rain. Particles are characterized by their size distribution and their chemical and mineralogical compositions. The study is conducted at three scales: global, by measurements of friction and third body masses (particles during the deposit phase and the water / particles mixture during the washing phase); in the contact area by analyses of third body flows; and at

the particle level by SEM observations. Particle flows during the deposit phase are identified by visualizations with a high-speed camera. The interaction between the particles and the road surface texture is highlighted by microscopic observations. Flow modeling is used to estimate the coverage rate of a surface that, in turn, is used as a weighting factor to calculate the coefficient of friction during the deposit phase. In the presence of water, the volume fraction of the particles is used to estimate the viscosity of the mixture. The coefficient of friction during the washing phase depends on this viscosity and the coverage rate of the surface. Results are discussed in terms of the influence of particle characteristics (concentration, size) and road surface texture.