



HAL
open science

Adhérence des chaussées contaminées par des particules en conditions sèches et mouillées

Yosra Hichri, Véronique Cerezo, Minh Tan Do

► To cite this version:

Yosra Hichri, Véronique Cerezo, Minh Tan Do. Adhérence des chaussées contaminées par des particules en conditions sèches et mouillées. RTS. Recherche, transports, sécurité, 2020, Comment développer une mobilité plus durable : vers une approche systémique, 2020, 9p. 10.25578/RTS_ISSN1951-6614_2020-02 . hal-02481971

HAL Id: hal-02481971

<https://hal.science/hal-02481971>

Submitted on 27 Feb 2020

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.

DOSSIER / ISSUE

Comment développer une mobilité plus durable : vers une approche systémique
How to develop a more sustainable mobility: towards a systemic approach

Adhérence des chaussées contaminées par des particules en conditions sèches et mouillées

Skid resistance of contaminated road surfaces by dry and wet particles

Yosra Hichri, Véronique Cerezo, Minh-Tan Do

© Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR 2020

Résumé L'article présente une étude en laboratoire visant à reproduire les conditions de contamination par des particules fines d'une surface de chaussée. Un protocole expérimental a été développé pour simuler le dépôt de particules sur un échantillon de chaussée, leur lessivage par l'eau de pluie ainsi que mesurer le frottement sur la surface contaminée. L'évolution du coefficient de frottement est comparée à celle de la masse des particules présentes sur la surface de l'échantillon. Des observations visuelles mettent en évidence le piégeage des particules par des creux de surface. Un modèle simple, intégrant la fraction de surface recouverte de particules, permet de reproduire les observations expérimentales en condition sèche.

Mots-clés adhérence; particules fines; analyse de masse

Abstract The article presents a laboratory study aimed at reproducing the conditions of contamination by fine particles of a pavement surface. An experimental protocol was developed to simulate the deposit of particles on a pavement sample and their washing by rainwater and to

perform friction measurements on the contaminated surface. The evolution of the coefficient of friction is compared with that of the mass of the particles present on the surface of the sample. Visual observations highlight the trapping of particles by surface troughs. A simple model, integrating the surface fraction covered with particles, makes it possible to reproduce the experimental observations in dry conditions.

Keywords skid resistance; fine particles; weight analysis

1. Introduction

Les précipitations après une période sèche augmentent le risque d'accidents routiers d'une manière significative [1]. L'origine de ce phénomène saisonnier est attribuée aux particules (poussière, débris liés au trafic, etc.) déposées sur la chaussée pendant les jours secs entre deux précipitations. La collecte de ces particules et des mesures d'adhérence ont montré que le coefficient de frottement pneu/chaussée diminue quand la quantité de particules augmente [2]. La connexion entre la présence des particules, l'adhérence de la chaussée et l'accidentologie semble donc être établie. Cependant, des questions subsistent quant aux mécanismes physiques et aux conditions météorologiques critiques (par exemple, la durée de la période sèche) amenant à une chute significative de l'adhérence.

Jusqu'à présent, les travaux sur l'adhérence des chaussées se sont essentiellement intéressés à l'influence de l'eau sans tenir compte de la présence des particules. Parallèlement, l'étude des particules, plus généralement des polluants routiers, s'est focalisée sur leur impact en termes de pollution de l'environnement (air, eau, sol). Il existe donc un champ non exploré concernant l'adhérence des chaussées contaminées par des particules.

Yosra HICHRI (✉)

AME-EASE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR,
44344 Bouguenais, France
courriel : hichri.yosra1@gmail.com

Véronique CERZO (✉)

AME-EASE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR,
44344 Bouguenais, France
courriel : veronique.cerezo@ifsttar.fr

Minh-Tan DO (✉)

AME-EASE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR,
44344 Bouguenais, France
courriel : minh-tan.do@ifsttar.fr

Cet article décrit les travaux menés au sein du laboratoire EASE de l'IFSTTAR visant à comprendre et modéliser le comportement des particules à l'interface pneu/chaussée. L'essentiel de ces travaux fait partie de la thèse de doctorat conduite par le premier auteur [3].

2. État de l'art

En analysant des données d'accidents aux États-Unis (période 1975-2000), Eisenberg [1] a noté que si globalement la pluie induit une augmentation des accidents, d'autres tendances – statistiquement significatives – peuvent être observées. 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 [1].

Eisenberg attribuait l'influence de la période sèche précédant une pluie à la présence de contaminants sur la chaussée. Ruban [4] distingue trois types de contamination : saisonnière, comme le salage en période hivernale ; accidentelle, comme le renversement des produits transportés ; et chronique. La contamination chronique est la plus courante et a pour sources les particules arrachées à la chaussée par les pneus, l'usure des pneus, des équipements de la route (glissière de sécurité) et du véhicule (garniture de freins), la combustion des essences, etc. [4]. Wilson [5] a analysé des particules collectées sur sept sites en Nouvelle-Zélande différents en termes de géographie et de milieu environnant (urbain, rural). Cet auteur a conclu à une dépendance des résultats au site de prélèvement mais les tendances générales suivantes ont été observées [5] : la taille des particules est de $21,5 \pm 5,8 \mu\text{m}$ (moyenne \pm écart-type) ; la concentration de métaux lourds est faible (Cd 1-4 $\mu\text{g/L}$, Cu 0,4-1 mg/L , Pb 0,3-2 mg/L , Zn 1-3 mg/L) ; et les résultats d'un même site peuvent varier significativement si les prélèvements sont effectués à des périodes différentes.

Plusieurs auteurs, par exemple dans les références [5] et [6], ont décrit l'évolution de l'adhérence au cours d'un cycle temps sec/pluie/temps sec en trois phases : 1) une chute importante de l'adhérence à la transition temps sec/pluie ; 2) une remontée légère de l'adhérence pendant la pluie ; 3) une remontée importante de l'adhérence après la pluie pendant le séchage de la route. Les phases 1 et 2 correspondent respectivement au dépôt des particules et à leur lessivage par l'eau de pluie. La remontée légère de l'adhérence pendant la phase 2 est attribuée à une eau moins chargée en particules et donc moins visqueuse. La

remontée importante de l'adhérence pendant la phase 3 est attribuée au contact sec restitué entre le pneu et la chaussée.

Les cycles de dépôt et de lessivage des particules affectent donc l'adhérence. Egodawatta [7], ainsi que d'autres auteurs comme Vaze et Chiew [8], ont observé et modélisé ces cycles, notamment pour le milieu urbain. Le modèle de dépôt de Egodawatta [7] décrit une variation de la concentration de particules comme une fonction puissance du nombre de jours secs entre deux précipitations. Le même auteur décrit le lessivage, exprimé en ratio entre la masse de particules après un temps (t) depuis le début de la pluie et la masse initiale (cumul pendant la période sèche), comme l'inverse d'une fonction exponentielle du temps (t) et de l'intensité pluviométrique. Des variantes à ce type de modèle peuvent être trouvées où d'autres variables comme le trafic journalier ou le vent sont ajoutées.

De leur côté, Shakely [2] et Hill [9] ont collecté des particules (à l'aide de systèmes d'aspiration) sur des sections d'autoroutes ou de routes interurbaines et réalisé des mesures d'adhérence sur ces mêmes sections. Hill [9] a constaté que la perte d'adhérence peut être maximale après 3 jours secs et que le coefficient de frottement reste stable après. Pour sa part, Shakely [2] a trouvé un minimum de coefficient de frottement pour une concentration de particules de 6 g/m^2 .

Il existe donc des travaux menés séparément pour connaître la nature des particules déposées sur la chaussée, comprendre leurs cycles de dépôt/lessivage en fonction de la météorologie, et évaluer l'adhérence résultante. Cependant, comme l'a souligné Wilson [5], les résultats peuvent dépendre fortement du site étudié. Il est donc nécessaire d'avoir une démarche complète menée sur le même site et allant à des échelles plus fines (niveau du contact entre la bande de roulement du pneu et des aspérités de la chaussée) pour comprendre les mécanismes physiques sous-jacents.

3. Démarche

Les travaux menés antérieurement dans le domaine routier [2][5][9] ont permis de souligner le rôle des particules dans les fluctuations saisonnières de l'adhérence. L'interprétation des données recueillies serait enrichie si l'on disposait d'une meilleure connaissance de ce qui se passe dans l'aire de contact entre le pneu et la chaussée, sachant que l'adhérence – donc la capacité à freiner et contrôler la trajectoire d'un véhicule – provient de cette zone. Une autre approche a donc été recherchée pour répondre à ce besoin.

La démarche suivie dans cette étude est basée sur l'approche du troisième corps développée dans le

domaine de la tribologie [10]. La tribologie regroupe des disciplines permettant d'étudier le contact entre deux solides en termes de frottement, de lubrification et d'usure. Constatant que les particules provenant de l'usure des deux solides en contact peuvent séparer leurs surfaces, voire constituer un film les protégeant et pouvant dans certains cas réduire une usure ultérieure, Godet [10] a développé une branche de la tribologie dédiée à l'étude de ces particules appelées « troisièmes corps » en nommant les solides en contact « premiers corps ». La description multiéchelle de l'ensemble du système constitué du tribomètre (dispositif qui impose les conditions opératoires), des deux premiers corps (solides en contact) et du 3^e corps constitue le « triplet tribologique ». L'approche du troisième corps est ensuite étendue aux particules introduites comme un lubrifiant solide entre deux solides en contact ; l'étude de l'adhérence des chaussées contaminées par des particules correspond à ce contexte.

Selon Godet [9], l'étude complète d'un troisième corps doit fournir des informations sur au moins les trois aspects suivants :

- Caractérisation du troisième corps (morphologie, rhéologie).
- Comportement du troisième corps à l'interface avec les deux premiers corps (mouvements en termes de flux d'entrée et de sortie, modes de déformation comme l'adhésion, le roulement ou le cisaillement).
- Théorie adaptée au contact étudié (modèle de lubrification/frottement prenant compte des caractéristiques du troisième corps).

Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons successivement des résultats obtenus sur les trois aspects. L'objectif de l'article étant d'illustrer les travaux menés, des références bibliographiques sont indiquées pour une description plus détaillée des résultats.

L'article est divisé en trois parties. Dans un premier temps, le protocole expérimental est détaillé avec un focus particulier sur les particules et les surfaces testées. Une attention particulière est donnée à la manière de reproduire fidèlement en laboratoire l'évolution de l'adhérence sur chaussée contaminée par des particules fines, que ce soit en conditions sèche ou mouillée. Les différentes phases (contamination, lessivage, séchage) seront explicitées. Ensuite, quelques résultats obtenus sur les différentes surfaces seront exposés. L'influence de la taille et de la concentration des particules est notamment abordée. Enfin, une première modélisation simplifiée de l'évolution du coefficient de frottement sur surface sèche contaminée par des particules est proposée.

4. Caractérisation des particules

Les particules étudiées ont été extraites des sédiments prélevés dans un bassin de rétention près du pont de Cheviré (région nantaise). Le choix de cette méthode, différente de celles décrites dans la littérature (brossage de la route et aspiration) [2][5][7][8], a été dicté par la difficulté de fermer une voie du pont de Cheviré à la circulation, compte tenu de son trafic journalier de 90 000 véhicules dont 8,5 % de poids-lourds, et de la quantité requise de particules (quelques centaines de grammes) pour l'étude de laboratoire (voir paragraphe 5).

Les particules sont obtenues par séchage (40°C pendant 4 jours) et tamisage des sédiments pour ne retenir que des particules de tailles inférieures à 100 µm. Des études antérieures ont indiqué que seules les particules fines (< 100 µm) restent accrochées sur la surface de la chaussée alors que les particules de taille importante sont éjectées par le trafic [11]. Pour l'étude de l'influence de la taille des particules, un autre tamisage permet de séparer quatre fractions : 0-40 µm, 40-50 µm, 50-80 µm et 80-100 µm. Le choix de ces fractions est lié aux observations faites dans la littérature sur les tailles de particules présentes sur la chaussée. La figure 1 montre des images de particules observées au microscope électronique à balayage (MEB).

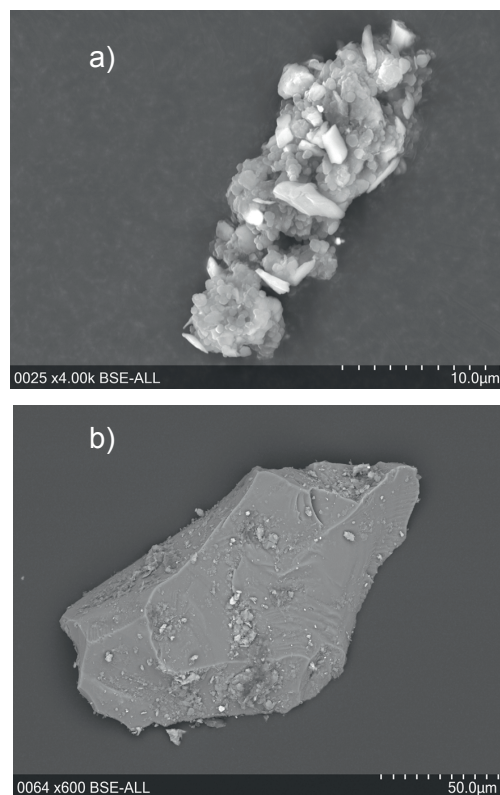
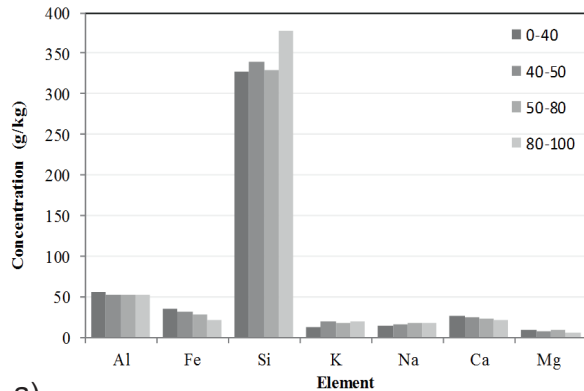
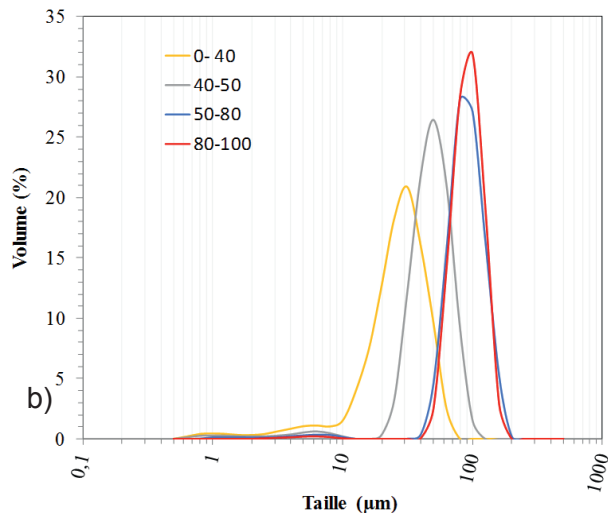


Figure 1. Observations des particules au MEB (a : particules de la fraction 0-40 µm ; b : particules de la fraction 80-100 µm)

Les particules sont analysées après séchage et tamisage par la méthode de granulométrie par diffraction laser à l'aide de l'appareil Malvern Instruments Ltd. Les résultats de la composition chimique et de la distribution de taille de quatre fractions sont présentés dans la figure 2.



a)



b)

Figure 2. Caractéristiques des particules (a : composition chimique ; b : distribution de taille)

Les analyses chimiques montrent que les particules de cette étude sont composées essentiellement du silicium (Si) qui, combiné à l'oxygène, forme de la silice, élément minéral dur. La présence du manganèse (Mg), du sodium (Na), et du potassium (K) peut être expliquée par la présence des sites industriels situés à proximité du pont de Chevire. Quelques éléments métalliques comme l'aluminium (Al), le fer (Fe) pourraient être attribués à l'usure des disques de frein et aussi à l'oxydation des carrosseries des voitures. La composition chimique ne semble pas dépendre de la fraction de tailles considérée.

5. Comportement des particules a l'interface pneu/chaussée

Échantillons

Les échantillons testés sont des plaques rectangulaires de 80 mm × 130 mm de côtés. Deux surfaces « modèles » présentant des textures contrôlées sont utilisées (aluminium grenailé et strié ; Fig. 3a et 3b). Le premier type de surface permet d'étudier l'influence de la microtexture tandis que le deuxième type permet d'étudier l'effet combiné des deux échelles de microtexture (responsable de la génération du frottement) et de macrotexture (responsable du drainage de l'eau).

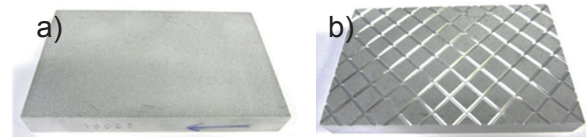
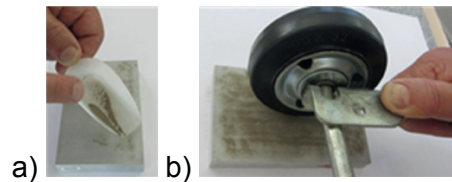


Figure 3. Échantillons

(a : aluminium grenailé ; b : aluminium grenailé et strié)

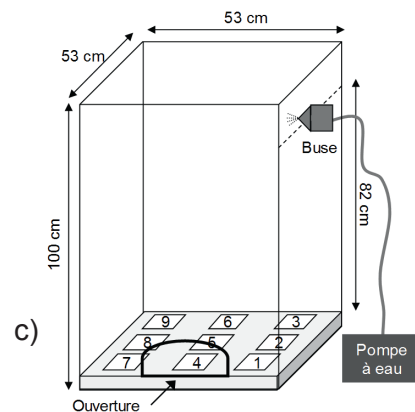
Simulation du dépôt et du lessivage des particules

La quantité de particules à déposer sur la surface de l'échantillon est déterminée par la concentration de particules ; trois concentrations sont testées : 10, 20 et 40 g/m². Ces concentrations ont été choisies à partir des données de la littérature (20 à 55 g/m² selon [8]). Les particules sont répandues manuellement sur l'échantillon (Fig. 4a). Elles sont ensuite compactées par 60 passages à l'aide d'une petite roue rigide permettant d'étaler les particules en une couche homogène (Fig. 4b).



a)

b)



c)

Figure 4. Simulations a-b : dépôt et compactage des particules ; c : précipitations et lessivage des particules

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 (53 cm × 53 cm × 100 cm) avec une ouverture qui permet d'introduire l'échantillon et une buse placée sur la paroi verticale (Fig. 4c). La buse permet de projeter des gouttelettes d'eau ayant une taille inférieure à 50 µm. La buse est liée à une pompe à eau reliée au réseau de distribution d'eau urbain qui assure un débit d'eau constant. Le système développé peut simuler des précipitations de faible intensité.

Un calibrage du système de mouillage a permis de définir le meilleur emplacement de l'échantillon dans la chambre de mouillage en termes de répétabilité de la quantité d'eau reçue (coefficient de variation de 6%) et de durée de précipitation nécessaire (10s pour simuler une profondeur d'eau moyenne de 0,015 mm avec un coefficient de variation de 7% ; on simule donc une pluviométrie de 6,3 mm/h). Les essais de calibrage sont détaillés dans [12].

Mesures de frottement

Les mesures de frottement sont réalisées à l'aide d'un appareil appelé Pendule SRT (du nom anglais Skid Resistance Tester) (Fig. 5). Il s'agit d'un appareil normalisé [13] dans le domaine routier. Il mesure le coefficient de frottement d'un patin de gomme (caractéristiques normalisées également [13]) glissant à une vitesse de 3 m/s sur la surface testée. Le patin est fixé au bout d'un bras articulé. A chaque lâcher, le pendule est réglé de manière à ce que le bras, libéré d'une position horizontale, emmène le patin au contact avec la surface de l'échantillon sur une distance de 126 mm. La position du bras à la remontée est lue sur un cadran dont les graduations peuvent être reliées au coefficient de frottement entre le patin et la surface testée.

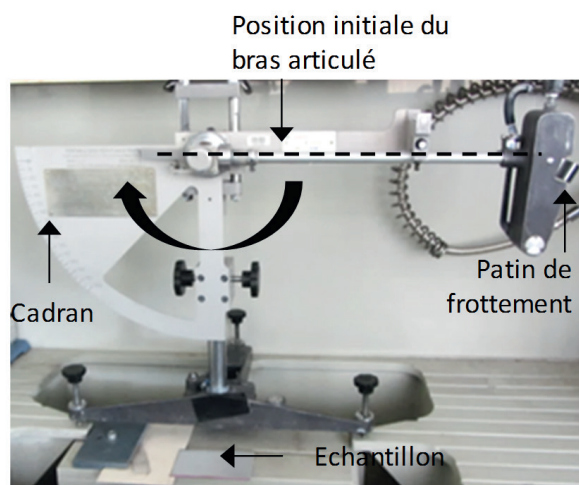


Figure 5. Pendule SRT utilisé pour des mesures de frottement

Les essais ont été réalisés en conditions sèche et mouillée. Sur une surface initialement recouverte de particules avec une concentration donnée :

- En condition sèche, des lâchers successifs sont effectués. A chaque lâcher, des pesées de l'échantillon avant et après le lâcher permettent d'estimer diverses quantités de particules (éjectées, résiduelles, etc.).
- En condition mouillée, la surface de l'échantillon est mouillée pendant 10 s (voir description de la simulation des précipitations) avant chaque lâcher du pendule. Les opérations de pesées sont les mêmes qu'en condition sèche. Le protocole comporte une phase finale de séchage où, sans ajout d'eau, des mesures de coefficient de frottement et des pesées sont effectuées toutes les 60 s jusqu'à ce que le coefficient de frottement retrouve sa valeur à l'état propre et sec ou dépasse la valeur de 1.

Les courbes de résultats présentées dans l'article correspondent à chaque fois à une série de mesure de frottement réalisée sur une surface donnée pour une concentration initiale donnée de particules. Sur l'ensemble de l'étude, nous avons testé 2 surfaces, 3 concentrations et 4 fractions de taille soit 24 séries d'essai indépendantes pour chaque condition (sec et mouillée).

Compte-tenu de la durée d'exécution des essais (1/2 journée par série), de la nécessité d'utiliser des particules provenant de la même source et des difficultés de collecte des sédiments, il n'a pas été possible de répéter les séries d'essais pour toutes les configurations. Néanmoins, quelques séries ont été répétées afin d'évaluer la robustesse du protocole. Ces essais réalisés avec une concentration de 20 g/m² ont montré sur 5 répétitions que le coefficient de variation du coefficient de frottement était inférieur à 4% à chaque étape.

Résultats sur l'adhérence des surfaces contaminées sèches

L'évolution du coefficient de frottement lors d'une série d'essais sur une surface grenailée et sur une surface grenailée-striée en condition sèche est illustrée sur la figure 6. L'étape 0 représente la surface propre et sèche ; l'étape 1 représente la surface recouverte de particules après leur dépôt et leur compactage ; les étapes suivantes représentent la surface après des passages (lâchers) successifs du patin de frottement.

On voit que le coefficient de frottement chute significativement lorsqu'une surface initialement propre est recouverte de particules. L'évolution de la masse des particules présentes sur la surface (différence entre la pesée avant la mesure de frottement et le poids de l'échantillon propre) montre que plus la masse de particules est importante plus le coefficient de frottement est faible. Les allures similaires mais inverse des deux

courbes d'évolution (coefficient de frottement et masse de particules) montrent une forte dépendance entre ces deux grandeurs.

On observe par ailleurs que la masse de particules restantes sur la surface striée est plus importante que sur la surface grenailée, ce qui s'explique par un piégeage très rapide des particules dans les stries. Elles ne peuvent plus être évacuées par le passage du patin SRT.

De plus, la forme des courbes reste identique pour toutes les fractions de taille de particules étudiées (Figure 7). La différence entre les fractions de taille de particules concerne la vitesse de remontée de la courbe de frottement. Plus les particules sont grosses et plus elles sont éjectées rapidement de la surface. Les petites particules ($< 40 \mu\text{m}$) ont quant à elles tendance à rester en partie bloquées dans la microtexture de la surface et à s'agglomérer entre elles.

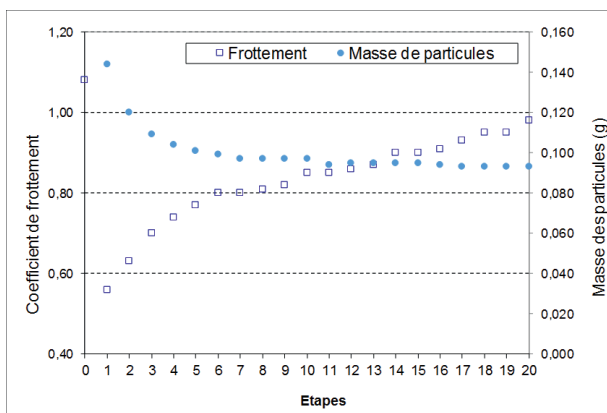
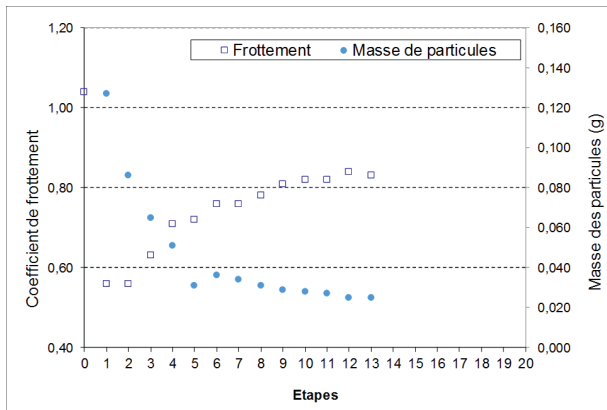


Figure 6. Condition sèche – Évolution du coefficient de frottement et de la masse de particules de taille 0-40 μm pour une concentration de 20 g/m^2 sur (a) aluminium grenailé et (b) aluminium grenailé-strié

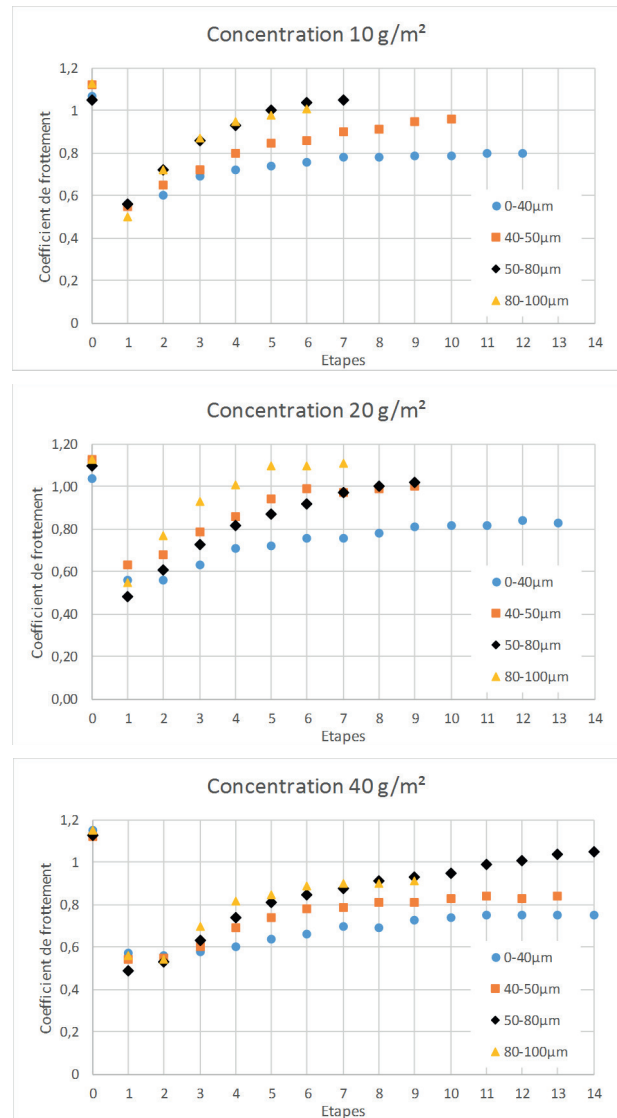


Figure 7. Condition sèche – Évolution du coefficient de frottement sur aluminium grenailé selon la taille et la concentration en particules

La figure 6 montre également que le coefficient de frottement d'une surface contaminée remonte avec le nombre de lâchers mais reste inférieur à celui d'une surface propre que ce soit sur la surface grenailée ou la surface grenailée et striée. Des photos réalisées au Microscope à Balayage Electronique (MEB) montrent qu'il reste des particules dans les creux de la surface de l'échantillon à la fin de l'essai (Fig. 8a). Ces particules, de tailles inférieures à 30 μm (Fig. 8b), seraient à l'origine d'une valeur plus faible du coefficient de frottement des surfaces contaminées, même après plusieurs passages du patin de frottement. En revanche, toutes les grosses particules ($> 50 \mu\text{m}$) semblent avoir été éjectées de la surface grenailée ou s'accumuler en partie dans les stries de la surface grenailée-striée.

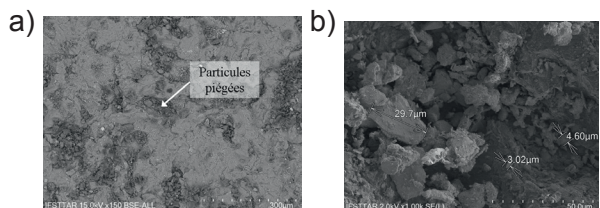


Figure 8. Particules piégées (a : emplacement ; b : tailles des particules)

Résultats sur l’adhérence des surfaces contaminées en présence d’eau

L’évolution du coefficient de frottement lors d’une série d’essais en condition mouillée sur surface grenailée et surface grenailée–striée est illustrée dans la figure 9. On voit que le coefficient de frottement chute d’abord brutalement (valeurs divisées par deux) lorsqu’on passe d’un état sec et propre à un état mouillé et contaminé (étapes 1 et 2). Ensuite, le coefficient de frottement remonte avant de se stabiliser (étapes 3 à 11) ; c’est la phase de lessivage où l’ajout de l’eau disperse les particules. Pendant la phase de séchage (étapes 12 et ultérieures), le coefficient de frottement remonte rapidement pour atteindre une valeur supérieure à 1. On peut noter en passant que le protocole développé permet de reproduire les différentes phases d’évolution de l’adhérence décrites dans la littérature (voir l’état de l’art).

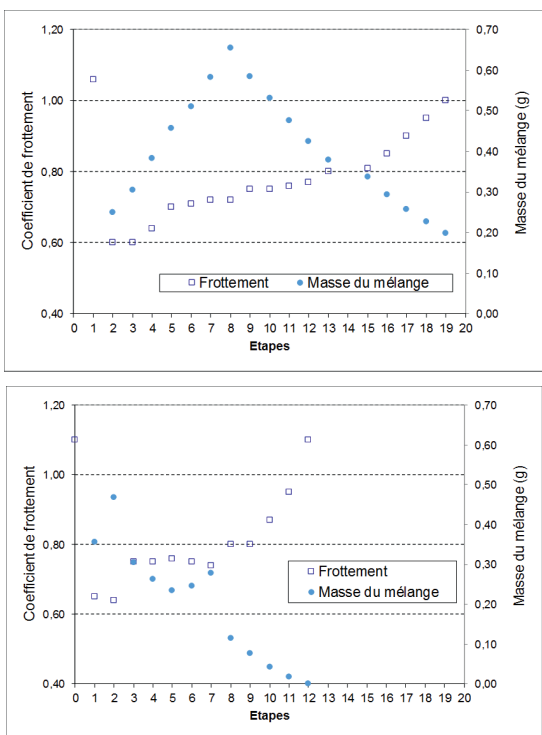


Figure 9. Condition mouillée – Evolution du coefficient de frottement et de la masse du mélange d’eau et de particules de taille 0-40 µm pour une concentration de 20 g/m² sur (a) aluminium grenailé et (b) aluminium grenailé-strié

Comme dans le cas d’une surface sèche, on observe des évolutions similaires mais en sens inverse du coefficient de frottement et de la masse du mélange d’eau et de particules. Contrairement aux essais en condition sèche, des observations au MEB ne sont pas possibles. Une interprétation qualitative est donc fournie en considérant les particules comme un milieu granulaire : 1) lorsque les premières gouttes d’eau sont versées sur les particules, des « ponts » d’eau sont formés entre les particules ; 2) l’ajout de l’eau a pour effet de saturer l’espace disponible entre les particules puis ; 3) si l’on continue à ajouter de l’eau, de disperser les particules. Goldszal [14] décrit les états 1) et 2) comme étant le passage du régime pendulaire au régime capillaire durant lesquels la viscosité du mélange peut être élevée. Pendant l’état 3), la viscosité du mélange est réduite. L’évolution du coefficient de frottement serait donc liée à celle de la viscosité du mélange d’eau et de particules, comme déjà supposée dans les travaux antérieurs [5][6]. Cette interprétation qualitative doit évidemment être confirmée par des investigations ultérieures basées, entre autres, sur l’étude de la viscosité du mélange d’eau et de particules.

6. Modélisation du frottement

Les résultats du paragraphe précédent ont permis de dresser un schéma de contact entre le patin de frottement (représentant un pain de gomme du pneu) et la surface des échantillons testés (représentant un revêtement de chaussée) en conditions sèche et mouillée (Fig. 10). A sec, le patin cisailerait le film de particules et, avec les passages successifs, il entrerait progressivement en contact avec les aspérités de la surface testée. Les particules les plus fines (< 40 µm d’après la Fig. 8) sont piégées dans les creux de la surface et, de ce fait, continuent de lubrifier l’interface patin/surface. En présence d’eau, le même mécanisme se produirait avec cette fois-ci un mélange d’eau et de particules dont la viscosité évoluerait avec l’ajout de l’eau et l’éjection des particules (Fig. 10).

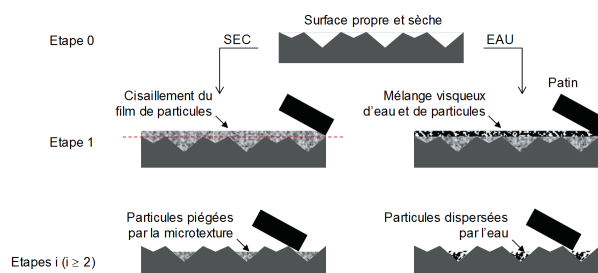


Figure 10. Schématisation des conditions de contact pneu/ chaussée en présence des particules sur la chaussée

Une première tentative de modélisation a été faite pour reproduire l'évolution du frottement en condition sèche. Pour la condition mouillée, une étude préalable de la viscosité du mélange d'eau et de particules est nécessaire avant de modéliser le frottement.

Le modèle présenté ci-dessous a été inspiré des travaux de Higgs [15]. Le coefficient de frottement (noté μ) est supposé égal à une somme pondérée du coefficient de frottement à l'état propre (noté μ_{surface}) et du coefficient de frottement minimal (noté μ_{film} et assimilé à la valeur obtenue à l'étape 1 sur une surface recouverte de particules compactées). Le facteur de pondération (noté X) représente la fraction de surface recouverte de particules. L'équation de base s'écrit donc :

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

D'après Higgs [15], le facteur X peut être écrit sous la forme :

$$X = h / h_{\text{max}} \quad (2)$$

Où h est la hauteur des creux remplis par les particules ; h_{max} est la hauteur maximale de h .

On voit que pour $X = 0$ (surface propre), $\mu = \mu_{\text{surface}}$; pour $X = 1$ (surface recouverte), $\mu = \mu_{\text{film}}$.

Or, les résultats expérimentaux ont démontré l'impact de la masse de particules sur le coefficient de frottement pour les différentes tailles et concentrations de particules. Comme h représente l'espace rempli par des particules, il semble donc pertinent de poser :

$$h \text{ (étape } i) = \text{masse de particules à l'étape } i \quad (3)$$

D'après l'équation (3), h_{max} est égale à la masse de particules à l'étape 1. Finalement, le facteur X_i à l'étape (i) peut s'écrire sous la forme :

$$X_i = \text{masse des particules à l'étape } i / \text{masse des particules à l'étape } 1 \quad (4)$$

Une première comparaison entre le modèle et la mesure (Fig. 11, ligne en pointillés) montre une surestimation du coefficient de frottement par le modèle pour l'ensemble des conditions testées. Des ajustements numériques ont permis de déterminer que l'ajout d'un exposant (n) au facteur X_i permettait d'obtenir une estimation satisfaisante. Ainsi, le coefficient de frottement μ_i à l'étape (i) s'écrit :

$$\mu_i = X_i^n \cdot \mu_{\text{film}} + (1 - X_i^n) \cdot \mu_{\text{surface}} \quad (5)$$

Cet exposant permettrait de prendre en compte le fait qu'une partie des particules localisées au fond des creux ne peut pas participer à la génération des forces de

frottement car le patin n'entrerait pas en contact avec elles. La contribution du film de lubrifiant à considérer ne serait donc pas linéairement liée à l'épaisseur de contaminant h_i présent sur toute la surface. L'ajustement de l'équation (5) aux données expérimentales donne une valeur $n = 0,28$. Des recherches complémentaires permettront de mieux caractériser du point de vue physique cet exposant (n) et d'étudier plus précisément son degré de dépendance aux paramètres caractéristiques des particules telles que la taille ou la concentration.

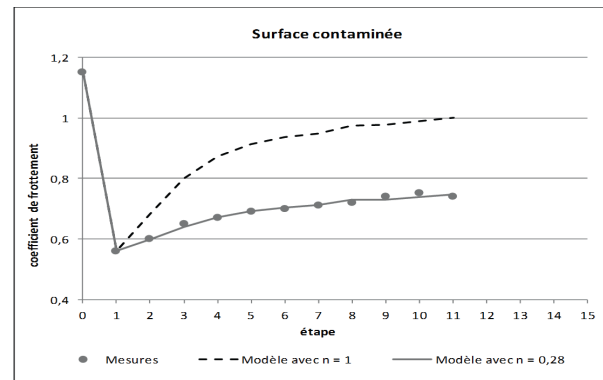


Figure 11. Comparaison entre le modèle proposé et la mesure

7. Conclusions

Dans cet article, nous avons présenté une étude en laboratoire visant à reproduire les conditions de contamination d'une surface de chaussée par des particules fines (tailles inférieures à 100 μm). Les particules ont été extraites de sédiments collectés dans des bassins de rétention puis séchés et tamisés en laboratoire. Un protocole expérimental a été développé pour simuler les cycles de dépôt et de lessivage des particules et mesurer le coefficient de frottement des surfaces contaminées.

Le coefficient de frottement chute significativement lorsqu'une surface initialement propre est recouverte de particules. L'évolution du coefficient peut être reliée à celle des particules présentes sur la surface : plus la quantité de particules est importante, moins le coefficient de frottement est élevé. A sec, malgré des passages répétés du patin de frottement, il reste des particules piégées dans les creux de la surface. La présence de ces particules résiduelles induit un coefficient de frottement toujours inférieur à celui d'une surface propre. En présence d'eau, la viscosité du mélange d'eau et de particules réduit le coefficient de frottement. L'ajout d'eau (qui correspond à une poursuite de la pluie) tend à disperser les particules et fait remonter le coefficient de frottement.

Un modèle simple a été proposé pour reproduire l'évolution observée du coefficient de frottement en condition sèche. Ce modèle représente le coefficient

de frottement d'une surface contaminée comme une pondération entre l'état propre et un état « contaminé » où la surface est recouverte de particules. Le facteur de pondération, représentant la fraction de surface recouverte de particules, peut être relié à la masse de particules présentes sur la surface. Les premiers résultats se sont avérés satisfaisants mais des travaux complémentaires seront menés afin d'affiner la modélisation en condition sèche. En particulier, les valeurs de μ_{film} et μ_{surface} sont déterminées expérimentalement ou par ajustement. Un calcul théorique de la valeur du coefficient de frottement sur une surface propre en fonction de la texture pourra être réalisé en utilisant notamment la méthode des motifs.

De plus, cette approche pourra être étendue au cas mouillé en utilisant un modèle de dépôt sur la surface et en le couplant avec un calcul de la viscosité du mélange.

Enfin, le comportement des particules à l'interface et la compréhension des phénomènes physiques seront approfondis à l'aide de méthodes d'observation complémentaires (Microscope à Balayage Électronique, caméra rapide). L'objectif sera de confirmer les mouvements des particules (éjection, piégeage sur la surface) et de faire le lien avec les flux définis dans le triplet tribologique (éjection, recirculation, etc.).

Références

- Eisenberg D (2004) The mixed effects of precipitation on traffic crashes, *Accident Analysis and Prevention* 36, 637-647
- Shakely RB, Henry JJ, Heinsohn RJ (1980) Effects of pavement contaminants on skid resistance, *Transportation Research Record* 788, 23-28
- Hichri Y. (2018) Adhérence des chaussées contaminées par des particules, Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, 219 pages
- Ruban V, Conil P, Clozel B, Durand C (2003) Origine, caractérisation et gestion des boues de l'assainissement pluvial routier et urbain, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 246-247, 117-126
- Wilson D (2006) An analysis of the seasonal and short-term variation of road pavement skid resistance, *Thèse de doctorat*, Université d'Auckland, Nouvelle-Zélande
- Persson B, Tartaglino U, Albohr O, Tosatti E (2005) Rubber friction on wet and dry road surfaces: the sealing effect, *Physical Review B* 71, DOI: 10.1103/PhysRevB.71.035428
- Egodawatta P, Thomas E, Goonetilleke A (2009) Understanding the physical processes of pollutant build-up and washoff on roof surfaces, *Science of the Total Environment* 407, 1834-1841
- Vaze J, Chiew FHS (2002) Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface », *Urban Water* 4, 379-389
- Hill BJ, Henry JJ (1981) Short-term, weather-related skid resistance variations, *Transportation Research Board* 836, 76-81
- Godet M (1984) The third-body approach: A mechanical view of wear, *Wear* 100, 437-452
- Arias-Cuevas O, Li Z, Lewis R, Gallardo-Hernandez EA (2010) Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts, *Wear* 268, 543-551
- Hichri Y, Cerezo V and Do MT (2017) Friction on road surfaces contaminated by fine particles: some new experimental evidences, *Proc. IMechE Part J: J. Engineering Tribology* 231(9), 1209-1225
- EN 13036-4: 2009, Method for measurement of slip/skid resistance of surface – Part 4: the Pendulum test, 2009
- Goldszal A, Bousquet J (2001) Wet agglomeration of powders: from physics toward process optimization, *Powder Technology* 117, 221-231
- Higgs C.F., Wornoyoh E.Y.A. (2008) An in situ mechanism for self-replenishing powder transfer films: Experiments and modeling, *Wear*, 264, 131-138