

Évaluation en laboratoire de la résistance aux efforts tangentiels des revêtements routiers

Smail HAMLAT
Ferhat HAMMOUM*

Laboratoire central des ponts et chaussées

Pierre-Yves HICHER

*Institut de recherche en génie civil et mécanique
UMR CNRS 6183*

École centrale de Nantes - université de Nantes

Jean-Philippe TERRIER

Laboratoire central des ponts et chaussées

■ Résumé

Une nouvelle méthode permettant d'évaluer en laboratoire la résistance aux arrachements des enrobés de surface utilisés dans les couches de roulement est présentée. La mécanique de contact pneumatique-revêtement est prise en compte, afin de reproduire le plus correctement possible l'effet de l'effort tangential engendré dans les points singuliers du réseau routier. Les phénomènes d'indentation de la gomme par les aspérités des granulats sont également pris en compte. Le nouvel essai sollicite la surface d'un enrobé bitumineux avec une force oblique. L'action cyclique de cette force provoque un glissement de la gomme sur la surface de l'éprouvette et engendre un départ de granulats plus ou moins important selon la composition du matériau. Une évaluation de la résistance aux efforts tangentiels à partir de la perte de masse de l'éprouvette est proposée. Avec cet essai, il est possible de déterminer l'effet de la nature du liant sur la résistance aux efforts tangentiels. Enfin, l'évolution de la perte de masse de l'éprouvette est reliée aux propriétés des liants bitumineux utilisés.

Laboratory evaluation of the resistance to tangential forces of road surfacing materials

■ ABSTRACT

A new method for performing laboratory evaluations of the pull-out strength of asphalt surface mixes used on wearing courses will be presented herein. Tire-pavement surface contact mechanics have been taken into account for the purpose of reproducing, as accurately as possible, the effect of tangential forces generated at specific points throughout the road network. Phenomena associated with the indentation of tire rubber due to aggregate asperities have also been incorporated. The new testing protocol calls for loading the surface of an asphalt mix with an inclined force. The cyclic action of this force causes sliding of the tread rubber on the surface of the specimen and generates a loss of aggregates that varies depending on specific material composition. An assessment of the resistance to tangential forces based on specimen mass loss will be proposed. Using this test, it becomes possible to determine the effect of binder type on this resistance value. Lastly, the change in specimen mass loss will be correlated with the properties of asphalt binders introduced.

*AUTEUR À CONTACTER :

Ferhat HAMMOUM
ferhat.hamoum@lcp.fr

INTRODUCTION

Un des phénomènes de dégradation de surface des chaussées observables dans les points singuliers du réseau routier se caractérise par un arrachement de granulats dû au passage des véhicules lourds. L'ampleur de cette dégradation dépend d'un grand nombre de paramètres, parmi lesquels la géométrie de la route, le type d'essieu, la nature et l'aspect de surface des matériaux en contact (bande de roulement du pneumatique et revêtement de chaussée) ainsi que les conditions météorologiques.

Les zones concernées par ce problème ne constituent pas des cas isolés mais correspondent potentiellement à tous les points singuliers où les revêtements du réseau routier peuvent être soumis à des efforts tangentiels intenses lors des manœuvres des conducteurs (freinage, accélération, changement de direction). Ces efforts peuvent, soit provoquer immédiatement une rupture dans le mastic (le phénomène peut se produire à froid par rupture fragile ou à chaud si l'énergie de cohésion est insuffisante [1]) suivie d'un déchaussement du granulat, soit produire un endommagement progressif avec à terme un départ de matériau (figure 1a). En règle générale, une évolution au jeune âge de la macrotexture en section courante se traduit par un décapage du bitume présent sur les granulats et parfois un réarrangement des granulats les uns par rapport aux autres sans perte de matériau. Cependant, il existe aussi un autre type de réarrangement de granulats plus rapide et accentué par les sollicitations tangentielles des pneumatiques dans les points singuliers. Dans certaines conditions, qui restent à expliciter, ces efforts tangentiels peuvent aussi donner lieu à la formation de plis à la surface ou simplement à un déplacement horizontal des granulats avec ou sans départ de matériau (figure 1b).

figure 1
Effets des efforts tangentiels dans les points singuliers :
a) arrachement dans un giratoire ;
b) déplacement horizontal près d'un feu rouge.



a
b

Ce réarrangement est probablement lié à la courbe granulométrique et aux caractéristiques du liant bitumineux. Il sera plus important avec les formules discontinues (béton bitumineux très mince, béton bitumineux drainant, etc.) qu'avec les formules continues (béton bitumineux semi-grenu, etc.).

On suppose qu'au-delà d'un certain seuil de chargement répété en cisaillement, une multitude de ruptures locales se produisent dans les zones de forte déformation, ce qui conduit à un arrachement de granulats à la surface du revêtement. Ces ruptures peuvent aussi se produire dans les zones d'hétérogénéités plus ou moins marquées liées parfois aux conditions de mise en œuvre (matériau sous-compacté, ségrégation locale, enrobage insuffisant des granulats, existence d'un joint longitudinal durant la mise en œuvre, etc.).

Ces points singuliers soumis à la circulation des poids lourds ont fait l'objet de plusieurs études traitant des aspects liés à la circulation routière et au tracé géométrique, dans lesquelles la mécanique de surface est totalement absente. Il suffit pourtant d'observer les chaussées des ouvrages existants pour constater qu'elles sont parfois le siège de dégradations importantes dès les premiers mois de mise en service. Ces points singuliers posent alors aux gestionnaires des problèmes d'entretien et causent aux usagers une certaine gêne pendant les travaux.

LES REVÊTEMENTS DANS LES POINTS SINGULIERS

Les revêtements routiers sont constitués d'un mélange de granulats et de liant bitumineux dont les proportions sont déterminées de manière à satisfaire certains critères de durabilité et d'usage comme l'adhérence.

La distribution des contraintes locales dans la zone de contact dépend des caractéristiques du pneumatique et du revêtement de chaussée. Pour un véhicule léger, la surface portante d'un pneumatique sur un revêtement neuf est de 70 à 150 cm². Ce véhicule développe des pressions locales de 0,5 MPa environ sur une texture peu rugueuse et de 4,5 MPa environ sur une texture très rugueuse. Pour un poids lourd, la surface portante est de 250 à 500 cm² et ce type de pneumatique développe des pressions locales de 2 MPa environ sur une texture peu rugueuse et pouvant dépasser 16 MPa sur une texture très rugueuse [2].

Les conséquences de ces pressions locales sur l'évolution des caractéristiques de surface des revêtements sont multiples et se traduisent à différentes échelles par les phénomènes suivants : fermeture de texture, décapage du film de liant, polissage des granulats en surface, réarrangement des granulats en fonction des saisons ou en fonction de l'agressivité du trafic, arrachement des granulats par endommagement de surface, etc. Dans certains cas, certains de ces phénomènes peuvent apparaître successivement tout au long de la durée de la mise en service.

La plupart de ces phénomènes n'ont pas été étudiés en détail. Certes, on recense des travaux sur la relation entre la microtexture et le frottement sur le polissage des granulats [3] mais une étude multi-échelle avec couplage des phénomènes physico-chimiques n'en est qu'au stade préliminaire.

D'autres questions sont posées sur la distribution des contraintes et des déformations dans la zone de contact pneumatique-revêtement. Pour répondre à ces questions et comprendre dans quelles conditions se produisent les arrachements, il est nécessaire de poser correctement le problème du contact mécanique et d'étudier en laboratoire le champ de déformation en utilisant la technique de mesure par corrélation d'images [4].

Peut-on reproduire actuellement le phénomène d'arrachement en laboratoire ?

Actuellement, la question de l'évaluation de la durabilité des couches de roulement dans les points singuliers à partir d'un essai de laboratoire ne semble pas complètement résolue. Les essais existants reprennent, soit le principe d'essais réalistes de contact roue-revêtement dans les situations

de freinage [5-7] ou d'envirage (orniéreur LPC avec un angle d'envirage de 5° imposé à la roue), soit le principe d'essais non réalistes, comme l'essai Cantabro [8]. Ces essais présentent des différences fondamentales sur le plan mécanique et les résultats exprimés en perte de masse sont parfois obtenus avec des protocoles d'essai discutables (diminution de la teneur en liant, conditionnement préalable dans l'eau, etc.). De ce fait, la pertinence et la représentativité de ces essais ne permettent pas de classer les paramètres physiques ou de cerner la ou les propriétés intrinsèques des liants bitumineux pouvant intervenir dans la résistance aux efforts tangentiels.

Pour répondre à ces interrogations, un nouveau moyen d'essai a été développé avec comme objectif de reproduire les conditions mécaniques réelles. Pour définir les conditions de sollicitations de ce nouveau moyen d'essai, un travail de recherche amont a été effectué dans la thèse de Hamlat [9]. Ce travail de thèse vise à comprendre les conditions de contact mécanique entre un pneumatique et un revêtement, à la fois à l'échelle de la roue et à l'échelle d'un élément de gomme en contact direct avec un granulat.

LES SOLLICITATIONS DANS LA ZONE DE CONTACT ENTRE UN PNEUMATIQUE ET UN REVÊTEMENT

L'adhérence entre un revêtement et un pneumatique est définie comme la capacité à mobiliser des forces de frottement dans la zone de contact lors des manœuvres des conducteurs. Afin de reproduire ces sollicitations en laboratoire, il est nécessaire de comprendre les conditions dans lesquelles on engendre ces efforts à l'interface pneumatique revêtement.

■ Description du contact à l'échelle d'un pneumatique

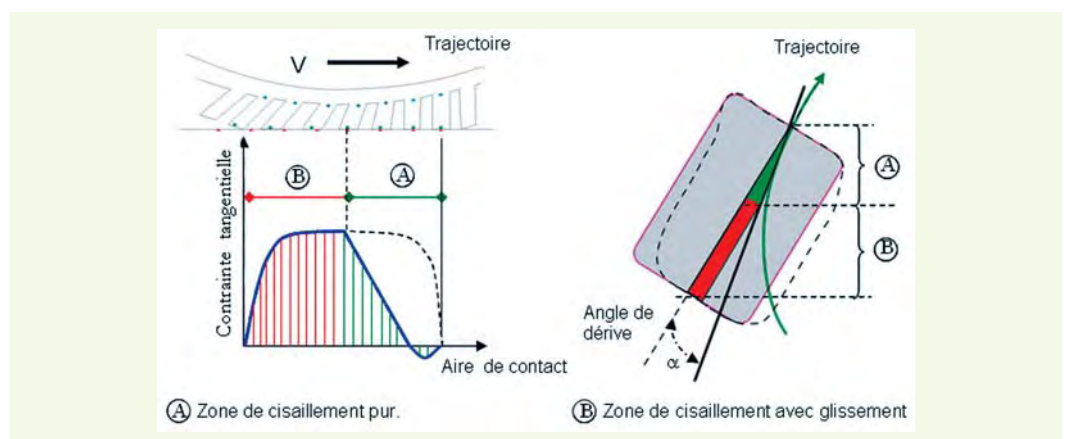
Lors des manœuvres de virage, de freinage ou d'accélération, on crée une force horizontale au niveau de la bande de roulement du pneumatique. Cet effort s'accompagne d'un glissement à l'interface avec le revêtement.

La contrainte tangentielle dans l'aire de contact croît de l'avant vers l'arrière. Lorsqu'elle atteint la valeur critique égale au produit du coefficient de frottement par la contrainte normale, un glissement se produit à l'interface bande de roulement-chaussée (figures 2a et 2b).

L'aire de contact est alors divisée en deux régions, une région de contact intime entre la gomme du pneumatique et la chaussée, située à l'avant, et une région de glissement située à l'arrière [10]. L'existence de ces deux zones est décrite par Delanne [11]. La frontière entre la zone de cisaillement et la zone de glissement dépend du taux de glissement ou de l'angle de dérive, des caractéristiques du pneumatique, du type d'essieu (simple, tandem, tridem) et de la position des essieux (avant, arrière) [12, 13].

figure 2

Description du contact à l'échelle d'un pneumatique :
a) en condition de freinage ;
b) en condition d'envirage.



■ Description du contact à l'échelle d'un élément de gomme

À l'échelle d'un pain de gomme, la force de frottement résulte de deux mécanismes superposés :

- l'adhésion, qui provient du phénomène de liaison moléculaire. Ce phénomène intervient à une échelle de l'ordre du centième de micron et se trouve amplifié par le glissement (mobilisation d'énergie suite aux vibrations des chaînes moléculaires) ;
- l'indentation, qui est la déformation de la gomme par glissement sur les aspérités du sol dont la taille varie du centimètre au micron.

D'après les travaux de Persson [14], on peut considérer que la part de frottement par adhésion reste négligeable devant celle de frottement par indentation.

Un pain de gomme soumis à un chargement tangentiel croissant produit un cisaillement pur à l'interface avec le support. Lorsque cet effort atteint un certain seuil, le pain de gomme se met à glisser. La première phase est caractérisée par un frottement statique et la deuxième par un frottement cinématique qui reflète l'état du contact.

L'essai proposé prendra en compte ces aspects liés au contact d'un élément de gomme avec un revêtement routier.

■ Principe retenu pour le nouvel essai

L'étude du contact entre le pneumatique et le revêtement permet de mieux préciser le système de chargement nécessaire pour la mise au point d'un essai tribologique en laboratoire. Cet essai doit être capable de reproduire en laboratoire le phénomène de dégradation de surface par arrachement (figure 3).

Contrairement aux tribomètres usuels, qui imposent un déplacement relatif, le nouvel essai proposé par Stéfani [15] permet de maintenir un niveau de chargement contrôlé quel que soit l'état de dégradation de la surface. Plus précisément, l'utilisation d'un applicateur de charge dont la forme suit une loi logarithmique permet de maintenir le couple de force (F_v , F_h) avec un rapport quasi-constant [16] quelle que soit la position du patin logarithmique (figure 4).

Dans la pratique, on impose une force de contact cyclique sans changement de signe, d'inclinaison déterminée, pour provoquer une dégradation de surface par déchaussement ou bris de granulats. Le patin ne glisse que par à-coups à la survenue de tels événements et la zone de contact se trouve alors automatiquement décalée vers l'arrière et les débris éjectés dans la direction opposée. Le patin attaque ainsi successivement diverses bandes étroites d'un long rectangle sans interposition de débris. Lorsque le vérin atteint sa butée basse, la phase cyclique est arrêtée. Cette phase correspond à un passage de l'applicateur de charge.

figure 3
Reproduction d'une sollicitation tangentielle au laboratoire :
a) action d'une roue sur le revêtement ;
b) reproduire en laboratoire l'action d'une charge avec cisaillement à la surface de l'éprouvette.

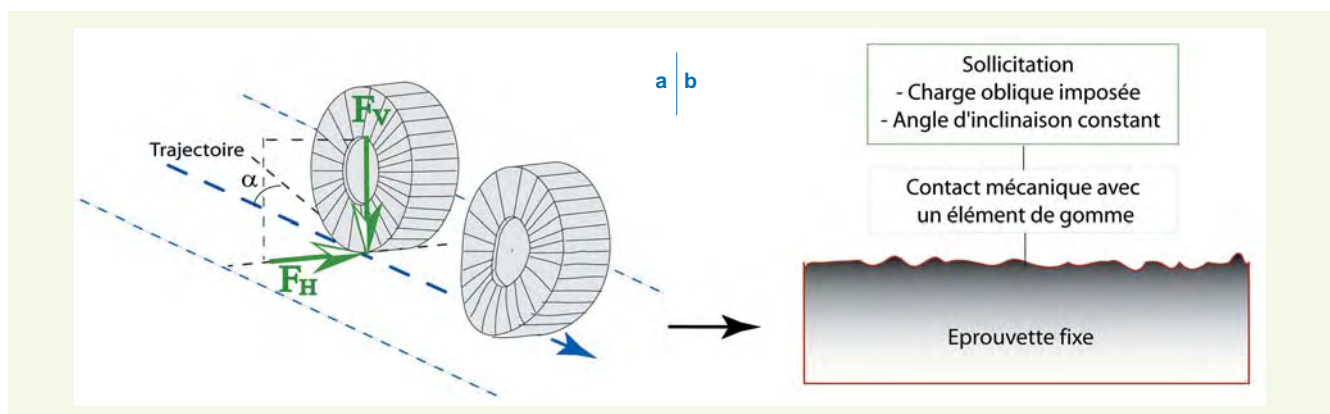
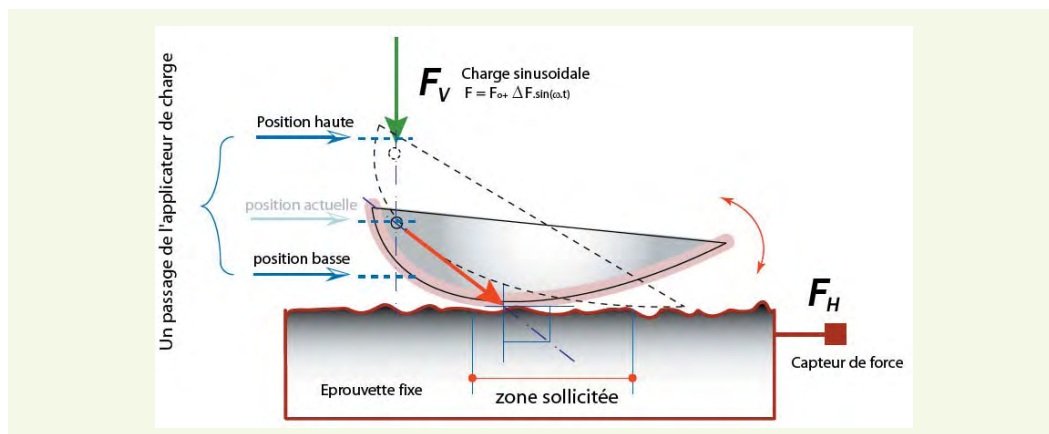


figure 4
Principe de l'essai.



■ Présentation du banc d'essai

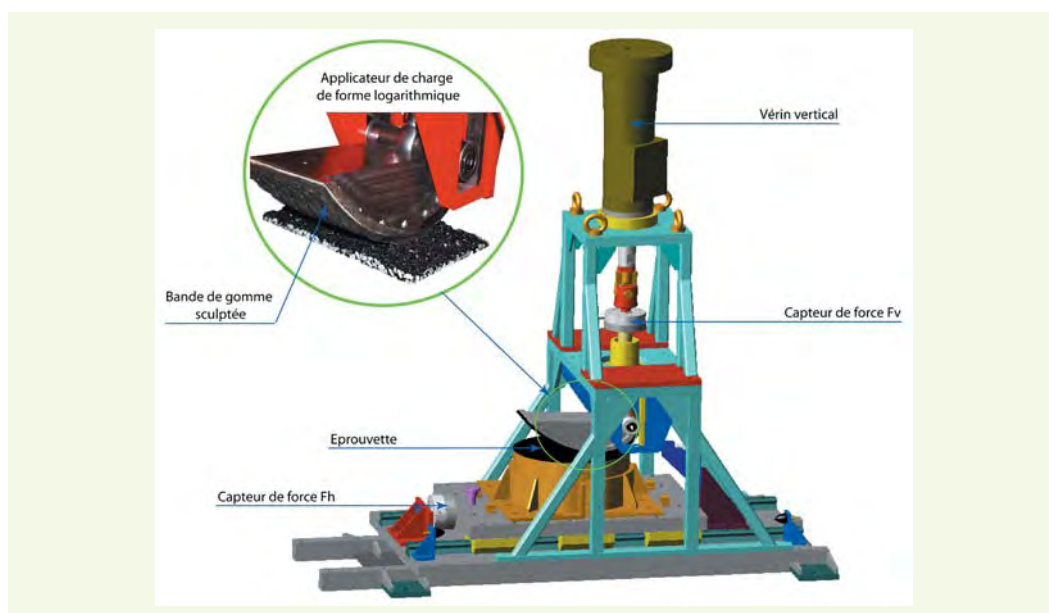
Le dispositif dénommé tribomètre pour revêtement routier (T2R) est un banc d'essai à deux axes perpendiculaires, posé sur un socle en béton. Il se compose d'une colonne verticale contreventée supportant l'applicateur de charge ainsi que le vérin hydraulique et d'une table horizontale sur roulement pouvant se déplacer sur deux rails horizontaux. Cette table peut accueillir une éprouvette parallélépipédique (185 mm x 247 mm) qui est fabriquée en laboratoire à l'aide d'un compacteur de plaque LPC. La table peut aussi recevoir une carotte de chantier de diamètre égal à 300 mm. La hauteur des éprouvettes n'excède pas 150 mm.

L'applicateur de charge, de largeur égale à 140 mm, est revêtu d'une gomme de 8 mm d'épaisseur de caractéristiques rhéologiques proches de celles de la bande de roulement des pneumatiques (figure 5). Cette gomme présente des sculptures en forme de losanges et sa dureté à température ambiante est de 68 degrés Shore environ.

Le système de pilotage du banc d'essai prévoit les deux types d'asservissement, soit un contrôle en force, soit un contrôle en déplacement du patin selon le type d'essai.

L'essai de résistance aux efforts tangentiels consiste à appliquer une charge moyenne représentant la sollicitation d'un pneumatique de poids lourd sur le revêtement. Le glissement de la gomme est obtenu à partir d'une modulation de la charge verticale autour d'une valeur moyenne.

figure 5
Vue d'ensemble du dispositif d'essai pour évaluer la résistance aux efforts tangentiels.



Le banc d'essai est muni des capteurs de force, de déplacement et de température. Le déplacement du vérin vertical traduit le glissement sporadique ou répété du patin. La force horizontale subie par l'échantillon est enregistrée tout au long de l'essai, traduisant ainsi l'état du contact mécanique entre le patin de gomme et le revêtement à éprouver.

DESCRIPTION D'UN ESSAI D'ARRACHEMENT

■ Protocole d'essai

Le protocole comporte trois phases dont une pour l'évacuation des débris produits éventuellement au cours des sollicitations.

A - Phase de préchargement

Le patin est mis en contact avec la surface du revêtement par application d'un déplacement imposé puis on passe à un asservissement en force pour poursuivre le chargement sur l'échantillon jusqu'à atteindre la force verticale moyenne imposée. Le temps d'accrochage nécessaire reste en moyenne égal à 40 secondes. Les conditions d'accrochage sont liées à l'état de surface du revêtement, à la rigidité des matériaux en contact et à la température de l'essai.

B - Phase de chargement cyclique

Une fois la consigne atteinte, on impose une sollicitation sinusoïdale dont l'amplitude a été fixée à 1/3 de la force moyenne pour assurer un bon accrochage du patin, à savoir une vitesse de glissement stable et un frottement le plus élevé possible. La charge verticale moyenne est fixée à 2 500 N de manière à reproduire une pression de contact apparente équivalente à celle produite par un poids lourd. La fréquence de sollicitation est égale à 1 Hz.

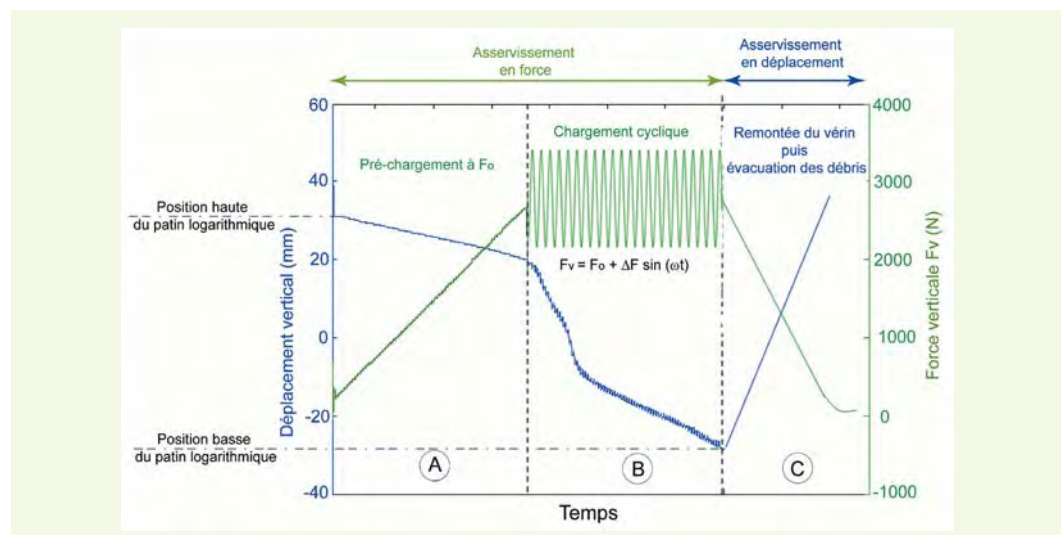
C - Phase de relèvement du patin

Le patin est replacé en position haute. Cette position permet de dégager un espace de l'ordre de 15 mm sous le patin pour évacuer éventuellement les granulats arrachés à l'aide d'un système d'éjection par air comprimé. Cette phase dure environ 10 secondes puis on relance l'essai avec la même force de contact cyclique.

Cette procédure décrite avec les trois phases est répétée le nombre de fois nécessaire à l'obtention d'un certain degré de dégradation (figure 6).

Remarque : on impose une force de compression moyenne de 2 500 N et une amplitude de 833 N. Sachant que l'aire de l'empreinte du patin est égale à 43 cm², la pression apparente maximale est égale à 0,78 MPa.

figure 6
Protocole de l'essai de résistance aux efforts tangentiels.



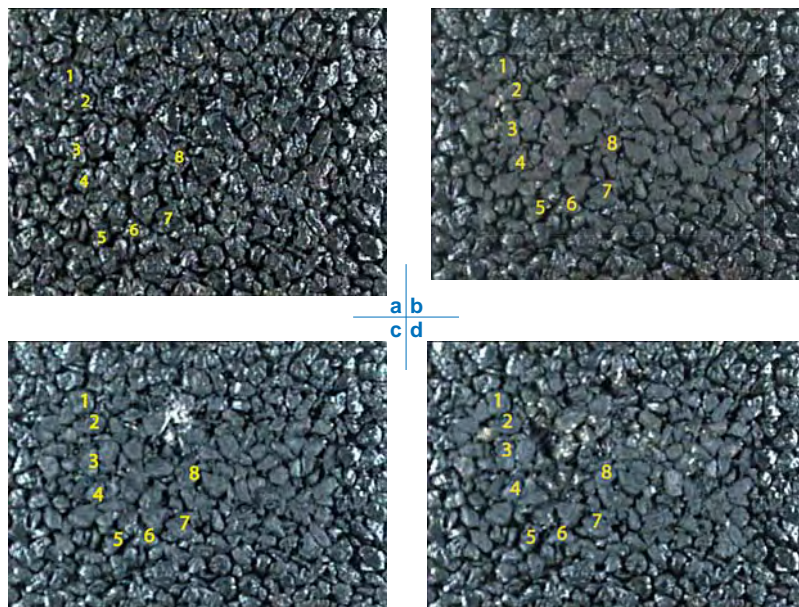
■ Présentation d'un essai d'arrachement

Au cours d'un essai d'arrachement et avant l'apparition des dégradations, il se produit des mouvements de granulats à la surface. Ces mouvements sont facilement observables sur des images prises à différents instants de l'essai (figure 7).

On observe aussi des modifications à la surface, avec des comblements de cavités par le bitume présent à la surface des granulats. Cette phase est observée systématiquement avant les premiers départs de granulats et sa durée, plus ou moins longue, dépend des caractéristiques mécaniques du revêtement.

À la suite du déchaussement d'un granulat par rupture dans le mastic, le phénomène de dégradation se poursuit à proximité et les efforts de cisaillement se reportent sur les granulats voisins, comme indiqué sur les granulats numérotés de 1 à 8, entourant la zone de dégradation (figure 7). L'importance des dégradations, évaluée à partir de la perte de masse, dépendra des caractéristiques intrinsèques du revêtement routier.

figure 7
Suivi photographique de la surface d'un échantillon au cours des cycles de chargement.
a) ETAT INITIAL,
b) après 1 000 cycles,
c) après 3 000 cycles,
d) après 10 000 cycles.



■ Répétabilité de l'essai

L'étude de la répétabilité des essais d'arrachement a été effectuée sur un ensemble de trois éprouvettes BBTM 0/10 issues des différentes fabrications au laboratoire. L'évolution de la perte de masse par unité de surface sollicitée en fonction du nombre de cycles cumulé montre que la répétabilité est acceptable si l'on tient compte des variations de la température ambiante qui ont probablement perturbé les mesures. Parallèlement, l'essai de répétabilité sur une formule BBTM 0/6 a pu être mené dans des conditions de température plus conformes à ce type de vérification. Les mesures de perte de masse après 15 000 cycles montrent que l'erreur relative ne dépasse pas 10 %. On rappelle que les propriétés rhéologiques des matériaux bitumineux sont sensibles aux variations de température. Ces essais de répétabilité démontrent une fois de plus la nécessité de contrôler rigoureusement la température durant les essais d'arrachement.

■ Exploitation de l'essai

Durant les premiers cycles et avant l'apparition des premières dégradations, le dispositif d'essai permet de mesurer différents paramètres dont certains décrivent l'état de contact :

- un indicateur sur le frottement apparent obtenu à partir du rapport des forces horizontale et verticale [9, 17] ;

- la vitesse de glissement moyenne durant la phase cyclique ;
- la rigidité du contact durant la phase cyclique ;
- l'énergie dissipée par frottement sur un cycle.

Les autres mesures réalisées tout au long de l'essai d'arrachement permettent de cerner le phénomène de dégradation pour des conditions d'essai bien déterminées :

- la perte de masse rapportée à la surface sollicitée ;
- la prise d'images calibrées de la surface sollicitée à différents instants de l'essai. Cette observation permet aussi de suivre les départs de granulats.

Des différentes observations et études faites au niveau du réseau technique du ministère de l'Équipement sur le problème des arrachements, il ressort que la nature du liant joue un rôle primordial sur la résistance aux efforts tangentiels. Pour cette raison, des essais d'arrachement ont été effectués sur un ensemble de liants de caractéristiques très différentes.

EFFET DE LA NATURE DU LIANT SUR LA RÉSISTANCE AUX EFFORTS TANGENTIELS

■ Matériaux utilisés

Pour examiner l'effet de la nature du liant sur la résistance aux efforts tangentiels, les essais sont effectués sur un enrobé bitumineux très mince (BBTM 0/10) très utilisé sur le réseau routier. Ce matériau a été fabriqué en laboratoire avec les granulats de la Noubleau (microdiorite) selon la norme NF P 98-137. Les liants essayés, de caractéristiques très différentes, sont ceux utilisés dans le domaine routier pour les couches de roulement (**tableau 1**).

tableau 1
Caractéristiques des liants bitumineux testés.

Liants	Pénétrabilité à 25 °C (NF EN 1426) (1/10 mm)	Température de ramollissement (NF EN 1427) (°C)	Cohésion au mouton pendule à 40 °C (NF EN 13588) (J/cm ²)	Traction sur éprouvette H2 (5 °C et 100 mm/min) (EN 13587)	
				Contrainte au seuil (MPa)	Allongement au seuil (%)
A (spécial)	61	96,2	1,15	0,5	19,0
B (BmP SBS)	37	64,8	0,65	1,5	16,0
C (Pur 35/50)	28	57,0	0,47	2,6	16,5
D (spécial)	14	78,0	0,22	3,5	16,0
E (bitume-époxy)	0,5	Essai non réalisé	Essai réalisé Pas de valeur	37,5	7,7

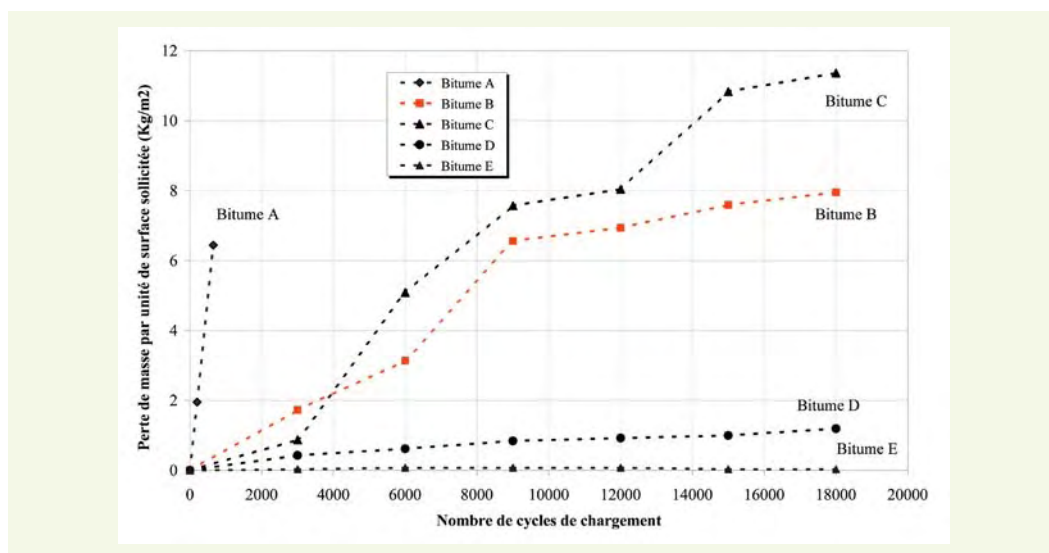
Afin d'obtenir un état de surface globalement plan et homogène des éprouvettes fabriquées avec les différents bitumes, les matériaux ont été compactés avec un cylindre lisse en adoptant une procédure de compactage par énergie contrôlée (NF P 98-250-3). La compacité mesurée au gammadensimètre varie peu d'une éprouvette à une autre avec une moyenne comprise entre 78 % et 80 %. L'éprouvette fabriquée avec le bitume-époxy a une compacité moyenne égale à 86 %.

Les différents liants présentent des rigidités croissantes du plus mou (bitume A) au plus dur (bitume E). Le liant E qui est un bitume-époxy a une rigidité plus importante qu'un bitume standard. Associé à de la bauxite calcinée, ce type de liant est utilisé sur le réseau routier comme enduit superficiel afin d'offrir aux usagers un niveau d'adhérence très élevé.

■ Résultats des essais

Les essais ont été réalisés selon le protocole décrit précédemment à température ambiante (18 °C à 20 °C). Au premier passage du patin, on n'observe pas de départ de granulats. Les premiers arrachements de granulats se produisent après un certain nombre de cycles, plus ou moins important selon la nature du liant. Après quelques milliers de cycles de chargement, on constate que l'évolution de la perte de masse par unité d'aire circulée diffère d'un échantillon à un autre (figure 8). À force imposée, on enregistre le déplacement vertical du patin et la force horizontale appliquée à la surface de l'échantillon. La force horizontale varie peu d'un échantillon à un autre. Par contre, la vitesse de glissement du patin en dépend et semble liée aux caractéristiques rhéologiques des échantillons. Les travaux de thèse [9] montrent que cette vitesse de glissement est bien corrélée avec l'angle de phase de l'enrobé. À l'issue d'un essai d'arrachement, l'observation des granulats évacués montre que la rupture se produit dans le mastic. Cette observation sur un essai de laboratoire est comparable à celle des granulats arrachés sur une couche de roulement au niveau d'un point singulier du réseau routier.

figure 8
Évolution de la perte de masse en fonction du nombre de cycles à température ambiante.

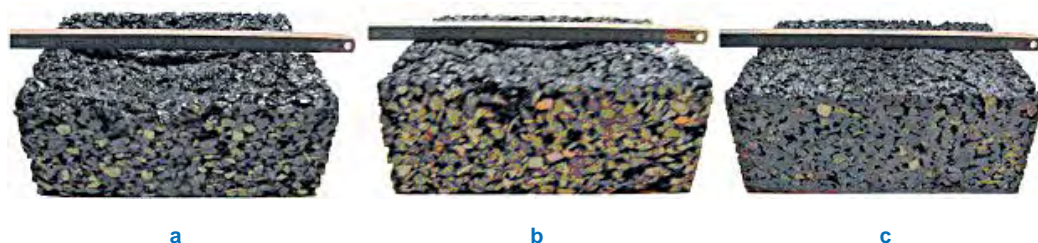


Le bitume E à base de bitume-époxy ne présente aucune perte de masse. On ne relève aucune modification de l'état de surface de l'échantillon (figure 9c). Avec le bitume D, la perte de masse est assez faible avec un phénomène d'arrachement assez lent. On observe quelques changements à la surface avec des déplacements très faibles de granulats. En revanche, on constate une dégradation très rapide de la surface de l'éprouvette avec le bitume A (environ $10 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Les bitumes B et C de rigidités voisines présentent une évolution intermédiaire avec un taux de perte de $0,5 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ pour le bitume B et $0,7 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ avec le bitume C (figure 9a et 9b).

La comparaison des résultats des essais d'arrachement avec les propriétés intrinsèques des liants (module, cohésion, contrainte au seuil et allongement au seuil, etc.) permet d'analyser ce type de

figure 9
État des éprouvettes BBTM 0/10 après un essai d'arrachement (18 000 cycles) :

- a) éprouvette avec liant C
Perte de masse = 179,8 g ;
- b) éprouvette avec liant B
Perte de masse = 125,8 g ;
- c) éprouvette avec liant E
Perte de masse = 0 g.

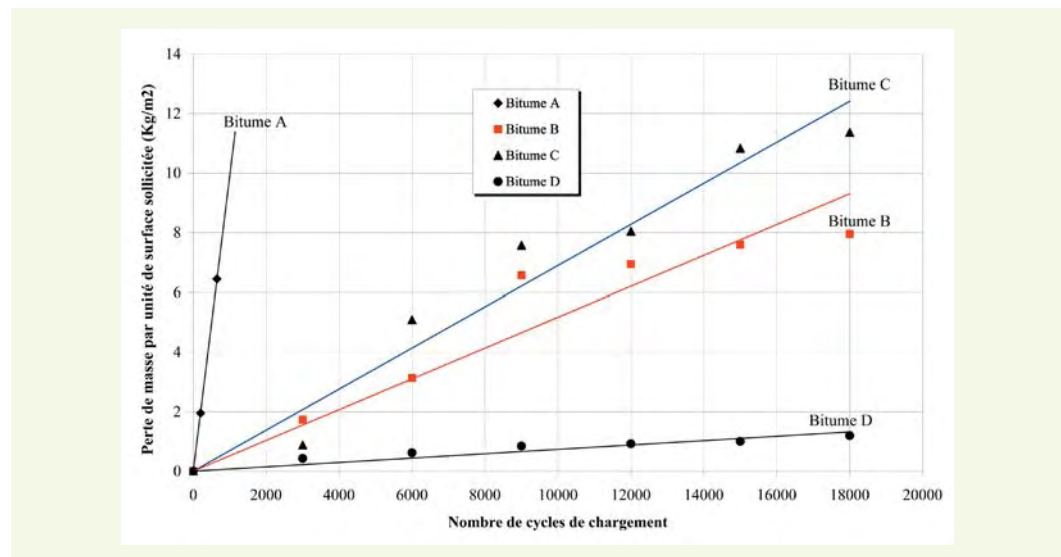


dégradation et de mettre en évidence les principales propriétés qui favorisent la résistance aux arrachements. On constate que le bitume D, avec une contrainte au seuil de 3,5 MPa et une cohésion de 0,22 J/cm², a une meilleure résistance à l'arrachement que le bitume A, qui possède une contrainte au seuil plus faible de 0,5 MPa et une cohésion plus importante de 1,15 J/cm². Le liant E à base de bitume-époxy possède une contrainte au seuil élevée (37,5 MPa). La mesure de la cohésion au mouton pendule de ce liant n'a pas été possible car la rupture se produit à l'interface entre l'échantillon de bitume et le cube. Néanmoins, les éprouvettes fabriquées avec ce liant n'ont pas subi de dégradation par arrachement.

■ Comparaison des résultats des essais d'arrachement avec les caractéristiques des liants

En première approximation, les résultats des mesures obtenues avec les essais d'arrachement montrent que la perte de masse croît linéairement avec le nombre de cycles. Sur la **figure 10**, on distingue nettement l'influence de la nature du liant sur la perte de masse. Par conséquent, la pente de la droite semble traduire une caractéristique intrinsèque du liant vis-à-vis de la résistance aux arrachements.

figure 10
Prédiction de l'évolution de la perte de masse à l'aide d'une fonction linéaire.



Les caractéristiques mécaniques des liants mentionnées dans le **tableau 1** donnent des indications plus ou moins pertinentes sur la résistance aux efforts tangentiels. Il semble que la contrainte au seuil permet d'expliquer les essais d'arrachement. Dans le **tableau 1**, l'essai de traction directe semble être l'essai le plus pertinent, à une inversion près entre les liants B et C. Par contre, le classement des liants à partir des valeurs de cohésion à 40 °C est totalement à l'inverse des performances enregistrées avec l'essai d'arrachement T2R.

Ces résultats constituent les premiers éléments de comparaison entre un essai de performance sur enrobé bitumineux et un essai sur liant. Néanmoins, on ne peut que s'interroger sur la pertinence de certains essais sur les liants bitumineux.

On constate que l'essai d'arrachement sur les enrobés bitumineux permet de donner des indications intéressantes sur les performances des liants vis-à-vis de la dégradation de surface. Il apparaît aussi que la comparaison des différents types d'essais est une approche intéressante dans la mesure où elle permet d'évaluer la pertinence de certains essais. Cependant, le travail de recherche doit être poursuivi sur d'autres types de liants et à d'autres températures afin de mieux cerner la relation entre les propriétés de ces derniers avec la résistance aux efforts tangentiels.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'essai de résistance aux efforts tangentiels constitue une méthode réaliste et pertinente pour étudier en laboratoire la tenue sous circulation des enrobés de surface dans des conditions contrôlées. Le moyen d'essai proposé possède de nombreux avantages car il permet de maintenir un niveau de chargement stable quel que soit l'état de dégradation de la surface. L'asservissement de l'applicateur de charge ne nécessite qu'un seul vérin et le phénomène d'arrachement ne se produit que dans un seul sens par déchaussement de granulats. Les possibilités d'étude sont nombreuses et l'exploitation des résultats des essais d'arrachement permettra de répondre aux interrogations sur le choix des matériaux et l'optimisation des mélanges (effet de la granulométrie, de la nature du liant, du rôle de l'adhésion liant/granulat, de l'effet de la compacité, etc.).

L'essai d'arrachement peut être utilisé comme un essai mécanique spécifique aux enrobés de surface pour évaluer les effets du vieillissement du liant, du rôle de l'eau et de l'action des produits chimiques sur la durabilité des revêtements routiers. Les essais de comparaison présentés permettent d'apprécier l'apport de ce moyen d'essai à l'évaluation des liants bitumineux quant à la résistance aux efforts tangentiels des revêtements routiers. En réalité, le liant mélangé avec des fines forme une matrice complexe appelée communément mastic et il serait plus intéressant de relier la résistance aux arrachements aux caractéristiques mécaniques du mastic.

Néanmoins, le contrôle de la température est primordial pour assurer la répétabilité de l'essai d'arrachement et rendre l'essai plus fiable.

À la lumière des résultats obtenus, le nouveau moyen d'essai proposé constitue un outil intéressant pour étudier les caractéristiques mécanique et tribologique des revêtements utilisés dans les couches de roulement des infrastructures de transport.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre du développement d'un dispositif d'essai de résistance aux efforts tangentiels.

Les auteurs remercient Christian Stéfani pour la relecture minutieuse de l'article ainsi que pour les nombreuses discussions qui ont permis d'avancer dans l'opération de développement. Ils remercient également Louis-Marie Cottineau, Jean-Pierre Desroches et Jean-Philippe Gourdon pour la mise en état de marche du matériel d'essai ainsi que la société MD Electronic pour la réalisation du poste de pilotage.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **AIPCR** - Guide technique - *Emploi des liants bitumineux modifiés, des bitumes spéciaux, et des bitumes avec additifs en techniques routières*, Association mondiale de la route, comité technique des routes souples (C8), **1999**, p. 203.
- 2 **SOCIÉTÉ MICHELIN**, *Le pneu-l'adhérence*, société de Technologie Michelin, **2000**, 92 pages.
- 3 **Do M.-T., HAMMOUM F.**, A mechanical model for the prediction of the tire/road friction, *6th Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Lisbonne, Portugal, **2002**.
- 4 **CUISINIER D., BERTAUD Y., FRANÇOIS M., HAMMOUM F., HAMLAT S., HILD F.**, Recherche des paramètres élastiques d'un enrobé bitumineux à partir d'un essai structurel, *Colloque Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie*, Marseille, **2005**.
- 5 **JOLIVET Y., MALOT M.**, Le manège Total : contribution à l'étude des performances des enrobés très minces et drainants, *Congrès Eurasphalt & Eurobitume*, Strasbourg, E&E 4-055, **1996**.
- 6 **NICHOLLS J.-C.**, *Laboratory tests on high-friction surfaces for highways*, TRL report 176, **1997**, 36 pages.
- 7 **TORBJÖRN J.**, Wear resistance of bituminous mixes to studded tyres - A novel approach to field measurements and correlation with VTI's traffic simulator, *5th Eurobitume Congress*, Stockholm, 4.33, **1993**, pp. 857-861.
- 8 **JIMENEZ PEREZ F., MIRO R.**, Characterization procedure of asphalt binders with the cantabro test – UCL method, *5th Eurobitume Congress*, Stockholm, **1993**.
- 9 **HAMLAT S.**, *Étude de la résistance des revêtements routiers aux sollicitations tangentielles*, Thèse de doctorat ECN/LCPC, **2007**.
- 10 **SCHALLAMACH A.**, *Principal considerations on tire wear*, Rubber Chemical Technology, **29**, **1956**, pp. 781-788.

- 11 **DELANNE Y., GOTHÉ M.**, Influence de l'état de mouillage sur les performances d'adhérence des pneumatiques, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **255**, **2005**, pp. 23-34.
- 12 **DESMOND F. MOORE**, *The friction of pneumatic tyres*, Elsevier Scientific Publishing Company, **1975**, 218 pages.
- 13 **Do M.-T., DELANNE Y.**, *Prediction of tire/wet road friction and its variation with speed from road macro and microtexture and tire-related properties* – Società Italiana Infrastrutture Viarie, Piazza della Calza, **2004**.
- 14 **PERSSON B.N.J.**, Theory of rubber friction and contact mechanics, *Journal of chemical physics*, **115**, Issue 8, **2001**, pp. 3840-3861.
- 15 **STÉFANI C.**, *Proposition d'un essai d'arrachement*, note interne LCPC, **2000**, 4 pages.
- 16 **STÉFANI C., HAMMOUM F., MERLIOT E., COTTINEAU L.-M.**, *Dispositif et procédé permettant la mesure de phénomènes tribologiques*, Brevet N° **FR 06 50 054** déposé le 06 janvier **2006**, 15 pages.
- 17 **HAMMOUM F., HAMLAT S., HICHER P.-Y.**, Friction of different surface layer of pavements in contact with a rubber, *Proceedings of WTC III : World Tribology congress & Exhibition*, Washington DC, USA, **2005**.

