

Adhérence et granulats

Vincent LÉDÉE

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Gérard DELALANDE

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers

Pierre DUPONT

Service d'études techniques des routes et autoroutes

RÉSUMÉ

L'influence de la granularité des formules de revêtements routiers sur la profondeur moyenne de la macrotexture et l'adhérence des chaussées est décrite.

On montre ensuite comment la nature du granulat peut influencer l'évolution de son état de surface sous l'effet d'un polissage lié au trafic.

Après une présentation des méthodes de caractérisation de la résistance au polissage des granulats, le lien entre cette résistance et l'évolution de l'adhérence des chaussées est précisé grâce aux résultats de planches expérimentales récentes.

Enfin, une réflexion est menée sur les critères de choix des granulats pour couches de roulement.

DOMAINE : Route.

ABSTRACT

SKID RESISTANCE AND AGGREGATES

The influence of the particle size distribution used in road surfacing mixes on both average macrotexture depth and skid resistance of pavements is described herein.

It will then be shown how the nature of aggregates is able to influence the evolution in the pavement surface state when submitted to the effect of traffic-related polishing.

Following a presentation of methods used for characterizing the level of aggregate polishing resistance, the correlation between this resistance and the trend in pavement skid resistance will be highlighted by results from recent experimental testing.

Moreover, discussion will be provided on the aggregate selection criteria used for wearing courses.

FIELD: Roads.

INTRODUCTION

Tous les matériaux utilisés en génie civil sont constitués de granulats, pour une proportion de leur masse qui peut être très importante. Les propriétés de ces granulats ont donc toujours une influence considérable sur les caractéristiques des mélanges dans lesquels ils entrent.

Dans le cas des matériaux pour couches de roulement, Lucas et Bégou [1] résument les aspects essentiels du rôle des granulats dans le phénomène d'adhérence pneumatique/chaussée par temps humide. Ils rappellent notamment que la macrotexture de la chaussée permet d'évacuer la lame d'eau sous le pneu. Elle se définit comme les irrégularités de la surface dont la longueur d'onde horizontale est comprise entre 0,5 et 50 mm, pour des dénivellations de 0,2 à 10 mm. À cette échelle, la granularité et l'angularité des granulats employés [2] jouent un rôle primordial. Ils rappellent ensuite que la microtexture permet de rompre le film d'eau et d'assurer le contact sec. Elle se définit comme les irrégularités de la surface dont les dimensions horizontales sont inférieures à 0,5 mm pour des dénivellations verticales inférieures à 0,2 mm. C'est donc de l'état de surface des granulats que va dépendre ce paramètre fondamental de l'adhérence pneumatique/chaussée [3]. On abordera successivement l'influence de la granularité et la liaison granulat/polissage.

INFLUENCE DE LA GRANULARITÉ DES FORMULES DE REVÊTEMENTS ROUTIERS SUR L'ADHÉRENCE DES CHAUSSEES

La circulaire 2002-39 « adhérence des couches de roulement neuves » [4] place la macrotexture du revêtement de chaussée parmi les éléments qui influent le plus sur la sécurité routière. Elle précise que, pour assurer le contact sec entre le pneu et une chaussée mouillée ou humide, le rôle de cette macrotexture dans l'évacuation de la lame d'eau est fondamental et complémentaire de celui de la sculpture du pneumatique. Elle renvoie vers la méthode d'essai LPC n° 50 [5] pour le contrôle de

l'adhérence des chaussées, laquelle définit les différentes méthodes de mesures et les différents coefficients (PMT*, CFL, CFT, etc.) évoqués par la suite. Le rôle des granulats sur la macrotexture d'un revêtement vient principalement de leur granularité.

Formules d'enrobés pour couches de roulement

Quelques types d'enrobés utilisés en couches de roulement sont mentionnés ici, mais de plus amples informations sur le sujet pourront être trouvées dans [6] et [7].

Si, pour des raisons économiques, les enduits superficiels restent la technique dominante pour l'entretien des chaussées en France [8], les techniques de bétons bitumineux minces (BBM), puis très minces (BBTM), apparues successivement dans les années 70-80 sont actuellement privilégiées pour les chaussées à fort trafic [9]. Une part non négligeable du réseau routier est aussi recouverte de bétons bitumineux drainants (BBD_r). Enfin, lorsque l'entretien de la chaussée nécessite aussi un apport structurel, des formules de bétons bitumineux semi-grenus (BBSG) sont choisies.

La recherche d'une forte macrotexture pour les BBM a eu pour conséquence l'introduction d'une discontinuité granulométrique dans les formules utilisées [10]. Par exemple, dans une formule BBM 0/10, l'absence de la fraction 2/6 permet d'obtenir une profondeur moyenne de texture (HS_v** ou PMT) de 0,7 mm au lieu de 0,5 mm pour une formule continue.

Pour les BBTM, qui recouvrent près du quart des routes nationales, et un tiers du réseau autoroutier, cette discontinuité granulométrique a été transposée. De ce fait, les BBTM mis en œuvre aujourd'hui, qu'ils soient de classe 1 (avec 30 % de sable 0/2) ou de classe 2 (avec 20 % de sable 0/2), sont généralement formulés avec une discontinuité.

Par ailleurs, pour ces mêmes BBTM, on considère que le calibre des granulats utilisés a une influence directe sur le niveau d'adhérence du revêtement [9]. Ainsi, pour la gamme des 0/6, 0/10 et 0/14, qui offrent tous des profondeurs moyennes de texture importantes (HS > 0,7 à 3 ans), les mesures de CFL effectuées montrent généralement une hiérarchie entre les formules 0/6 0/10, et 0/14, avec un avantage pour les formules les plus fines. La multiplication des points de contact pneu-granulats sur les revêtements plus fins pourrait expliquer de cette tendance.

Planches expérimentales : RN148, A75, RN7

Plusieurs planches expérimentales sur chaussées circulées ont été menées pour le compte de la Direction des routes. Leurs objectifs étaient d'évaluer l'influence des différentes caractéristiques des granulats et de différentes formules d'enrobés sur l'adhérence des couches de roulement. Formées de sections de grande longueur permettant des mesures d'adhérence en vraie grandeur (> 400 m), elles ont fait l'objet d'un point zéro détaillé, puis d'un suivi annuel [11]. Certaines sont toujours suivies.

Trois d'entre elles avaient pour objectif l'étude de l'influence de divers paramètres de formulation de certains enrobés sur l'adhérence des chaussées. Des éléments relatifs à ces chantiers (A75 Coudes-Issoire, RN7 La Palisse et RN148 Fontenay-le-Comte) sont regroupés dans le tableau I. Les paramètres étudiés étaient principalement l'influence du calibre D*** des granulats constitutifs des formules, ainsi que celle des variations de la discontinuité granulométrique.

Il est à noter que l'un des chantiers (A75) avait aussi pour but d'étudier l'influence des variations de nature des granulats au sein d'une même formule. Cependant, les caractéristiques intrinsèques des granulats choisis (granite et basalte) étant très proches, il n'a pas été possible de dégager d'enseignements sur ce point. Les graphiques présentés ici ne les distinguent donc pas.

Les résultats de ces chantiers sont présentés sur les figures 1 à 4. Le constat le plus évident qui peut être fait est l'hétérogénéité des résultats d'un site à l'autre. En effet, il s'avère que les caractéristiques d'adhérence évoluent de façon totalement différente sous l'effet du trafic sur chacun des trois chantiers. À la diminution continue de ces caractéristiques sur la RN7 peut être comparée la relative stabilité observée sur la RN148 (Fontenay), et la diminution suivie d'une remontée sur l'A75. Les conditions de site (sinuosité, conditions climatiques, traitements pour la viabilité hivernale, etc.) sont peut-être à l'origine de ces différences.

* Mesure volumétrique à la tache mesurée avec des microbilles de verre (cf. article de M. Gothié dans ce numéro).

** Hauteur au sable « vraie » mesurée à la tache.

*** Dimension des plus gros granulats (calibre).

TABLEAU I
Caractéristiques des planches expérimentales de l'A75, de la RN7 et de la RN148 à Fontenay-le-Comte

Chantier	Indice graph. planche	Formule	Composition granulométrique					Année de réalisation
			0/2 + fines	2/4	4/6	6/10	10/14	
A75 Coudes-Issoire Tracé sinueux déclivités, viabilité hivernale Trafic T1 fort Bitume modifié Granulats : 53 < PSV < 56	A	BBTM 0/10 type 1	30			70		1992
	B	BBTM 0/10 type 1	35			65		
	C	BBTM 0/10 type 1	30			70		
	D	BBTM 0/10 type 1	30			70		
	E	BBTM 0/10 type 1	30			70		
	F	BBTM 0/6	30		70			1993
	G	BBTM 0/6	30		70			
	H	BBTM 0/6	30		70			
	I	BBTM 0/10 spéc.	20	25		55		
	J	BBTM 0/10 spéc.	20	40		40		
RN7 La Palisse Sinueux, viabilité hivernale Liant modifié SBS PSV granulat 53	K	BBTM 0/14	36			10	54	1995
	L	BBTM 0/14	36		15		49	
	M	BBTM 0/10 spéc.	28	40		32		
	N	BBTM 0/10 spéc.	40		40	20		
	O	BBTM 0/6	32		68			
RN148 Fontenay-le-Comte Site rectiligne, plan climat tempéré Bitume pur PSV granulat 52		BBDr 0/6	13		87			1994
		BBDr 0/10	13			87		
		BBDr 0/14	14			34	52	
		BBTM 0/10 type 1	30			70		
		BBTM 0/10 type 2	18			82		
		BBTM 0/10 continu	21	11	12	56		
		BBSG 0/10	37	10	11	42		

L'influence du D des formules apparaît très nettement (cf. Fig. 1, 2 et 4). Il faut tout d'abord noter que toutes les mesures réalisées montrent la conformité des revêtements aux spécifications en vigueur. Concernant l'adhérence, les mesures de CFL et, sauf exception, de CFT, montrent systématiquement que les performances des formules 0/6 sont meilleures que celles des 0/10, elles-mêmes meilleures que les 0/14, qu'il s'agisse de BBTM ou de BBDr. Cette hiérarchie est logiquement inverse de celle montrée par les mesures de macrotexture, puisque les formules plus grossières confèrent un plus fort relief à la surface de la chaussée. Cet élément montre que la recherche d'un compromis entre l'évacuation de la lame d'eau par la macrotexture et la multiplication des points de contact pneu-chaussée passe par le choix du D de la formule.

Pour un D donné, l'influence de la profondeur moyenne de la macrotexture sur les performances d'adhérence apparaît toutefois fondamentale. Les données acquises sur le chantier de l'A75 (cf. Fig. 1) mettent particulièrement ce point en évidence puisque la diminution, puis la remontée de la macrotexture des formules se traduit par des tendances similaires des performances d'adhérence.

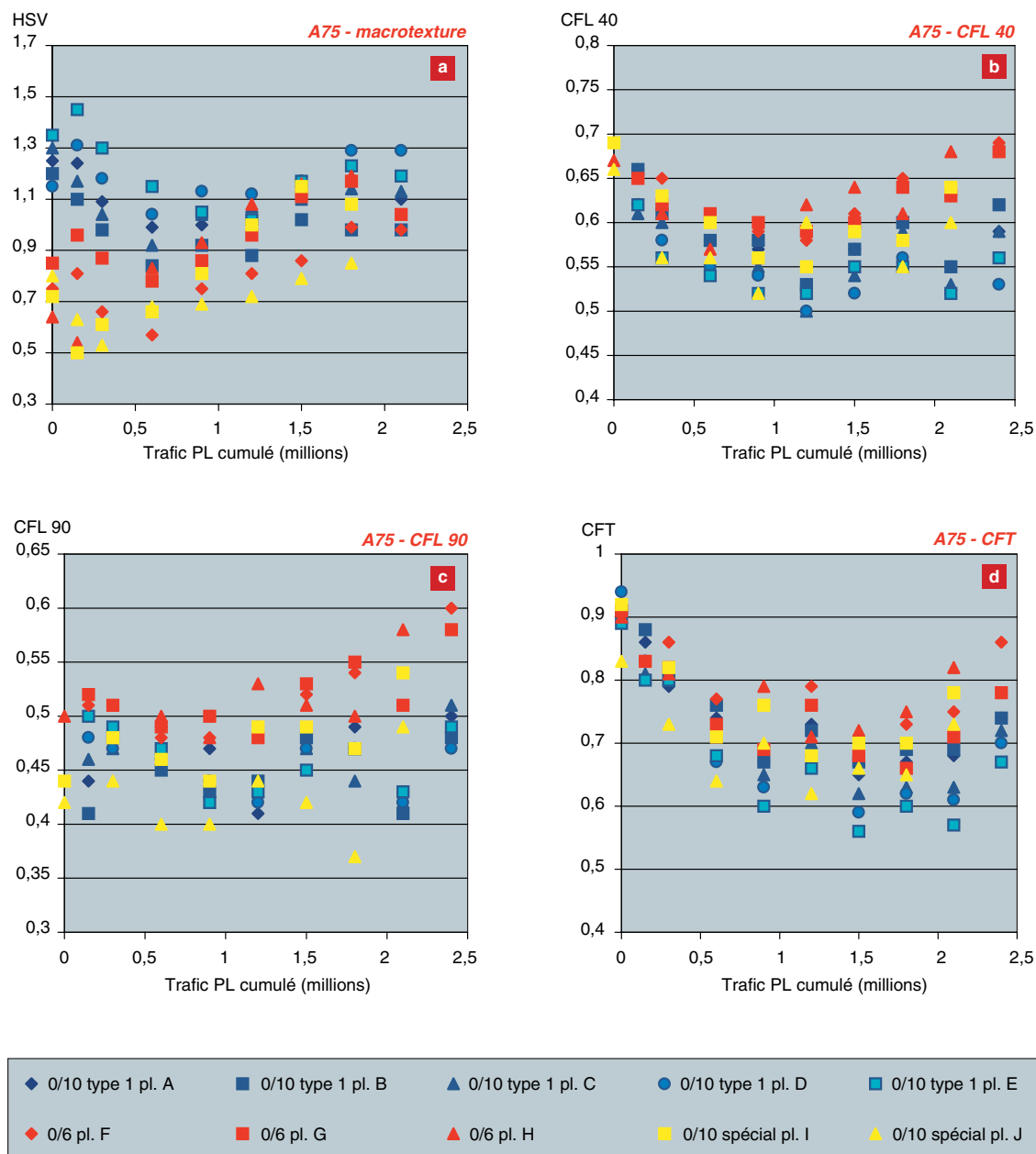


Figure 1

Résultats des planches expérimentales réalisées en BBTM sur l'A75.

Pour les planches où la macrotexture n'évolue pas significativement sous l'effet du trafic (RN7 : cf. Fig. 2 ; RN148 : cf. Fig. 3), les performances d'adhérence sont soit stables, soit en diminution, selon les formules concernées. Dans le cas d'une diminution, il est probable que cette tendance résulte de la perte progressive de microtexture par polissage des granulats.

L'influence des variations de la discontinuité granulométrique a été spécialement étudiée sur les BBTM 0/10 du chantier de la RN148 à Fontenay, ainsi que sur celui de l'A75. Sur les graphiques concernés (cf. Fig. 1 pour A75 et cf. Fig. 3 pour RN148), les mesures réalisées sur les BBTM de type 1 apparaissent en bleu, celles faites sur les autres formules (BBTM type 2, BBTM à discontinuité réduite, voire BBTM continu) sont représentées en jaune. L'évolution des performances d'adhérence

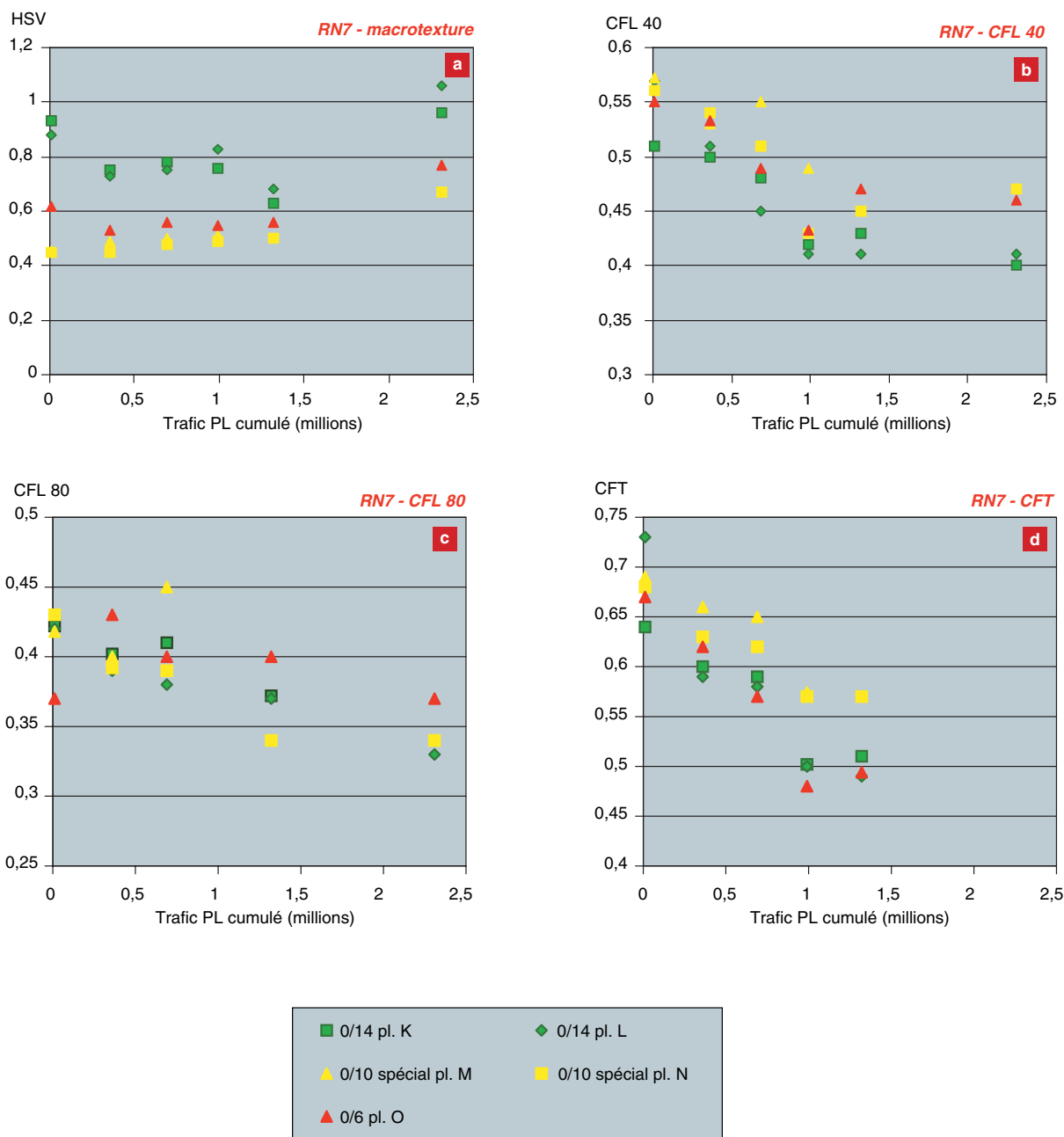


Figure 2

Résultats des planches expérimentales réalisées en BBTM sur la RN7.

(CFL 40, CFL 90 et CFT) montre de façon presque systématique un meilleur comportement du BBTM type 2 et des formules à discontinuité réduite ou continues (qui les positionnent en partie supérieure du fuseau repère) par rapport à celui des BBTM de type 1 (qui restent toutefois largement dans le fuseau). Seule la formule de BBSG testée montre une certaine faiblesse et se situe en limite basse du fuseau. Ces éléments nécessiteraient bien sûr confirmation, mais ils semblent montrer que, pour les BBTM, la traditionnelle discontinuité granulométrique peut être réduite, voire supprimée, sans que cela n'altère les propriétés d'adhérence de la chaussée.

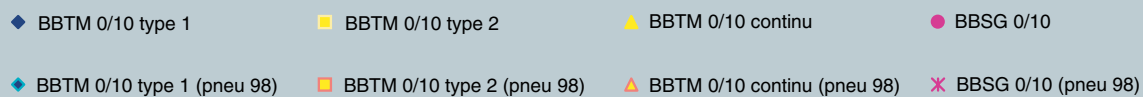
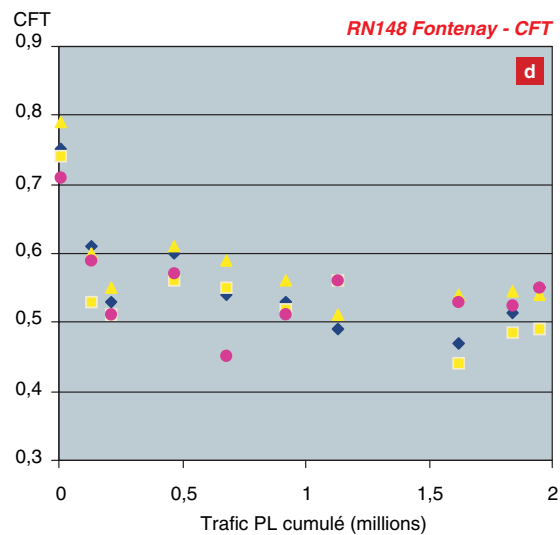
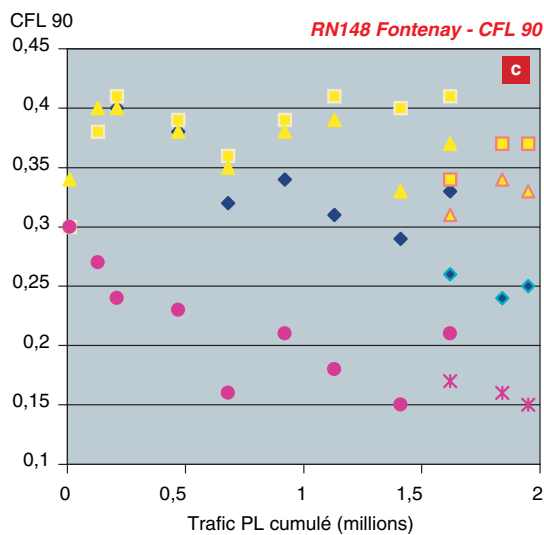
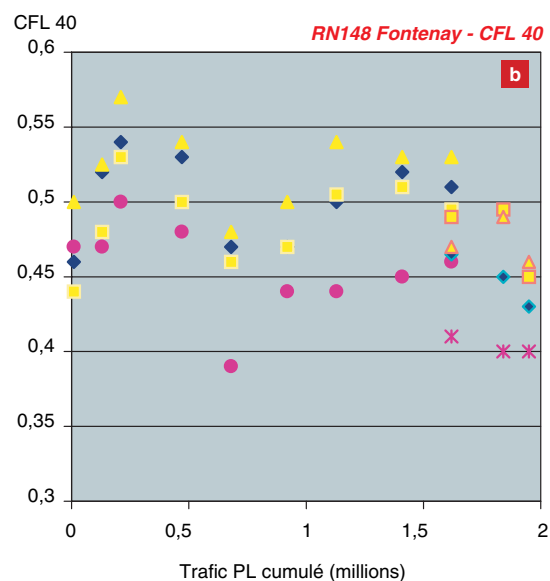
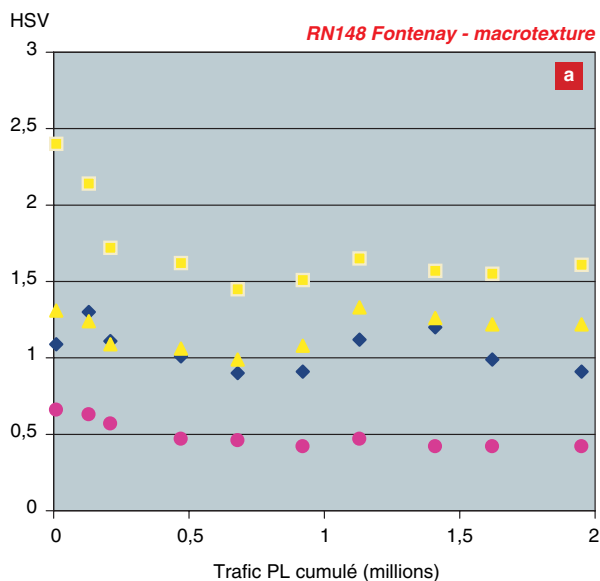


Figure 3
Résultats des planches BBTM (et BBSG) de la RN148.

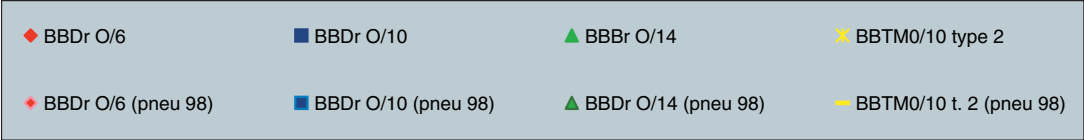
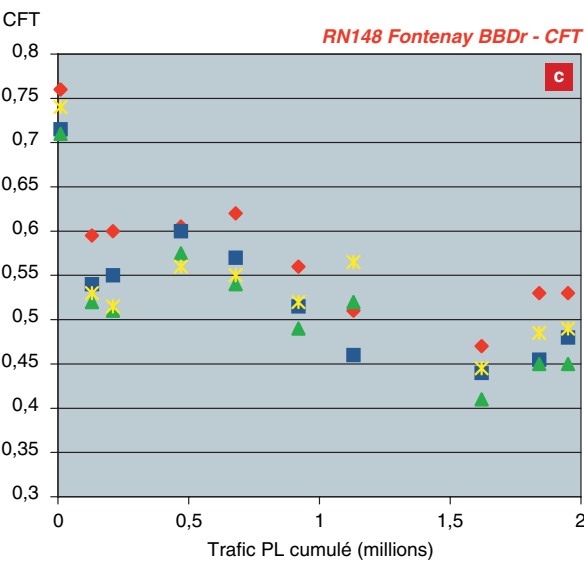
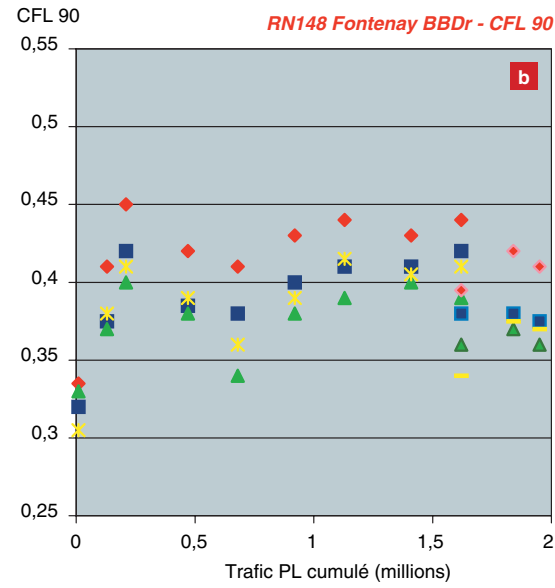
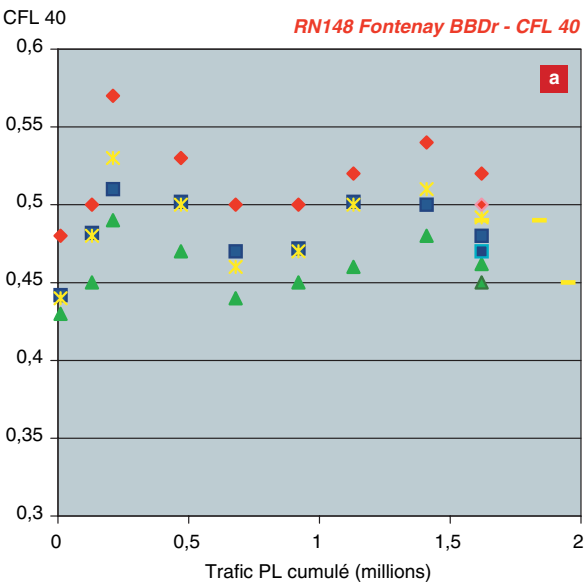


Figure 4
Résultat des planches BBDr de la RN148.

POLISSAGE DES GRANULATS

De nombreux auteurs [2, 12, 13] considèrent que le polissage sur site est lié aux forces de frottement et d'écrasement que les poussières présentes à la surface de la chaussée exercent sur les granulats sous le double effet de la contrainte et du mouvement des pneumatiques. Certains ont observé que l'adhérence pneu-chaussée varie selon les saisons, et ont attribué ce phénomène à des variations de finesse des poussières. L'été, les particules ne sont pas évacuées par les pluies et sont progressivement broyées jusqu'à des dimensions très fines. Elles contribuent alors à un polissage plus poussé qui conduirait à des surfaces plus glissantes en présence d'eau. Enfin, certains [13, 14] observent que l'intensité du polissage dépend aussi largement du tracé routier, et pourrait notamment être amplifiée dans les zones de freinage ou de virage.

Afin de retarder la dégradation de l'adhérence pneu-chaussée, il est logique de rechercher des granulats dont les propriétés permettent un maintien de la microrugosité dans le temps sous l'effet du trafic.

Relation entre la nature des granulats et leur microtexture

Le terme « granulat » désigne les matériaux en grains utilisés dans le génie civil. Sauf exception, ils sont d'origine minérale et issus de la fragmentation des roches. Celle-ci peut intervenir naturellement. C'est le cas par exemple des alluvions, où les grains issus de la fragmentation naturelle de roches sont ensuite emportés par les eaux de surface jusqu'au lieu de leur sédimentation. Au cours de leur transport, ils subissent une forte usure qui leur confère une forme émoussée ou arrondie ainsi qu'une texture de surface naturellement lisse. La fragmentation peut aussi être artificielle dans le cas d'une roche massive exploitée directement par abattage puis concassage, ainsi que dans le cas des matériaux alluvionnaires reconcassés en usine.

Le besoin d'une forte microtexture, ainsi que celui d'une forte angularité, font que les granulats destinés aux couches de roulement sont toujours des matériaux concassés. Cependant, même entièrement concassés, les granulats présentent des niveaux de microtexture extrêmement variables, qui sont liés à la nature de la roche.

Une roche peut se définir comme un assemblage de minéraux, en cristaux ou en grains [15]. Les types de roches qui se rencontrent dans la nature sont multiples. Dépendant de leur mode de formation, leurs compositions minéralogiques ainsi que les dimensions et l'orientation des cristaux ou grains varient largement.

Certaines roches sont mono-minérales : tous les cristaux qui la composent sont de même nature. C'est le cas de nombreux calcaires (Fig. 5a) ou des quartzites (Fig. 5b). À l'opposé, la plupart des roches sont composées de minéraux différents. Les granites en sont l'exemple le plus connu (Fig. 5c), mais c'est aussi le cas de nombreuses roches traditionnellement utilisées comme granulats telles que les diorites, amphibolites, gneiss, rhyolites, etc.

D'une roche à l'autre, ou au sein d'une même famille ou d'un même gisement, les dimensions des cristaux ou grains peuvent aussi varier, pouvant être grossiers (cf. Fig. 5c) ou fins (Fig. 5d), voire hétérométriques (Fig. 5e). Enfin, l'orientation des cristaux peut être quelconque, mais de nombreuses roches présentent une orientation préférentielle (Fig. 5f).

Les roches utilisées en couches de roulement de chaussées étant toujours très dures (en terme de résistance à la fragmentation), les fractures, normalement, ne contournent pas les minéraux, mais les traversent. Or, chaque minéral possède un mode de fracturation qui lui est propre et dépend de son réseau cristallin. Certains se fracturent naturellement selon des plans de clivage prédéfinis, qui peuvent par exemple leur conférer une surface en marches d'escalier (Fig. 6a), tandis qu'à l'opposé, d'autres ont une cassure de type conchoïdal, extrêmement lisse (Fig. 6b).

La microtexture résultant de la fracturation d'une roche est donc logiquement pilotée par la nature et la dimension des minéraux ou grains, ainsi que par la façon dont ils sont agencés. La surface ainsi formée est exposée au trafic routier et va évoluer dans le temps. Sa capacité à garder un fort relief sous l'effet du polissage est alors un paramètre fondamental de la durabilité de la couche de roulement.

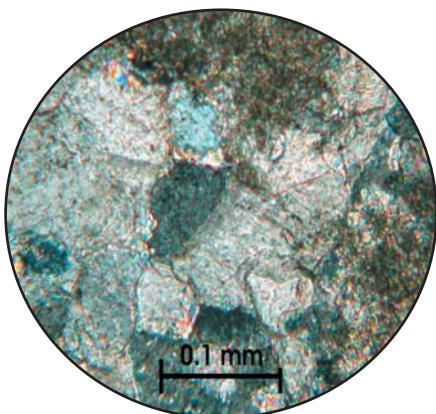


Fig. 5a - Calcaire composé à 100 % de cristaux de calcite.

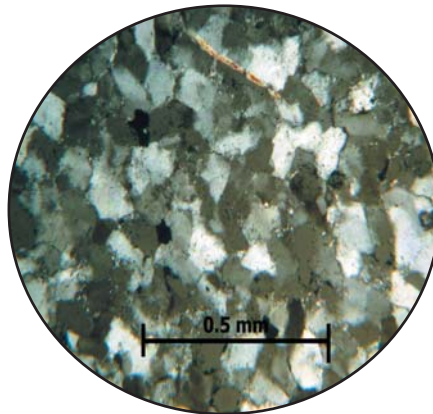


Fig. 5b - Quartzite, composé à 100 % de cristaux de quartz et de silice.

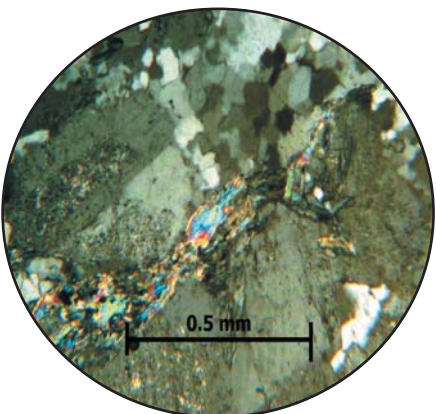


Fig. 5c - Granite composé de cristaux de quartz, feldspaths et mica.

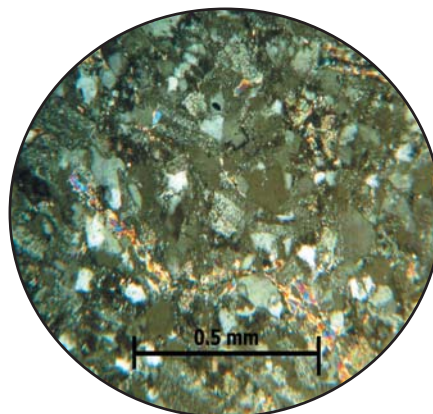


Fig. 5d - Aplite, composition du granite, à cristaux fins.

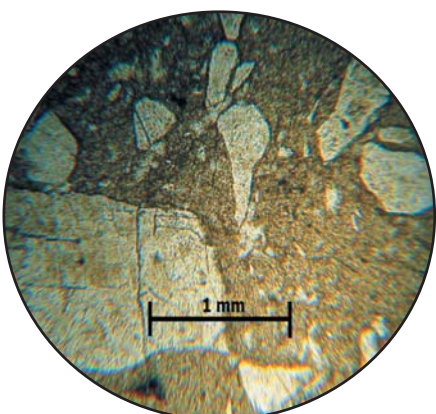


Fig. 5e - Rhyolite, gros cristaux dans une pâte fine.

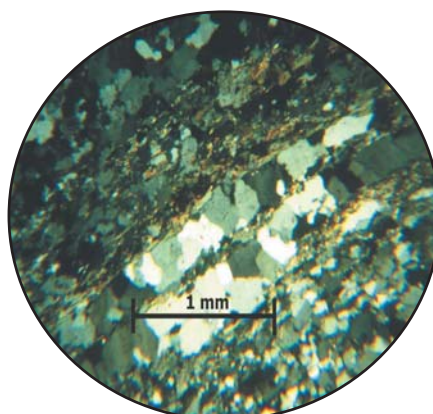
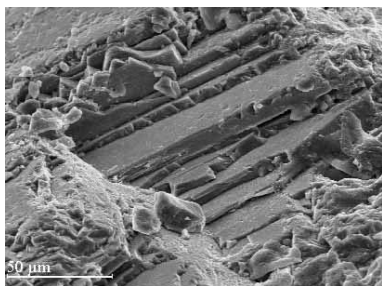


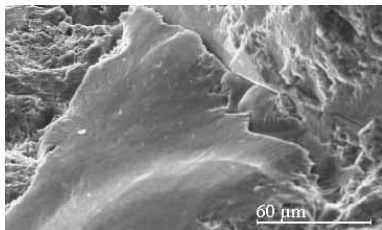
Fig. 5f - Gneiss, roche métamorphique orientée.

Figure 5

Photographies de lames minces de roches, observées au microscope (lumière polarisée ou lumière naturelle). Illustration de la variabilité des compositions minérales et de texture des roches.



a - Cassure par clivage d'un cristal de feldspath.



b - Cassure conchoïdale caractéristique des cristaux de quartz.

□ **Figure 6**

Surfaces résultant de la fracturation de minéraux, vues au MEB.

Polissage des roches

Sous l'effet d'une même action de polissage, les roches se comportent différemment les unes des autres. Une étude très poussée de ce phénomène a été réalisée par Tourenq et Fourmaintraux [16]. S'appuyant sur les valeurs intrinsèques de dureté de chacune des principales espèces minérales (tableau II), ils montrent l'influence de la composition minérale des roches sur la résistance au polissage des granulats. Ils définissent pour cela deux paramètres, intitulés « dureté moyenne pondérée » et « contraste de dureté ». Ces deux paramètres peuvent être calculés à partir des duretés intrinsèques des minéraux et de leurs proportions relatives dans la roche. Ils établissent alors, pour une large gamme de roches, une loi reliant ces deux paramètres à la résistance au polissage et, donc, permettent de prévoir cette caractéristique à partir d'un comptage des minéraux.

Cependant, l'exploitation d'une base de données de résultats d'essais en laboratoire [18] montre que cette seule composition minérale ne décrit pas complètement la résistance au polissage. D'une part, une certaine hétérogénéité dans les dimensions de cristaux apparaît comme un facteur complémentaire favorable (cf. aussi [19]) et, d'autre part, les roches les plus performantes s'avèrent pour la plupart inclassables selon ce critère.

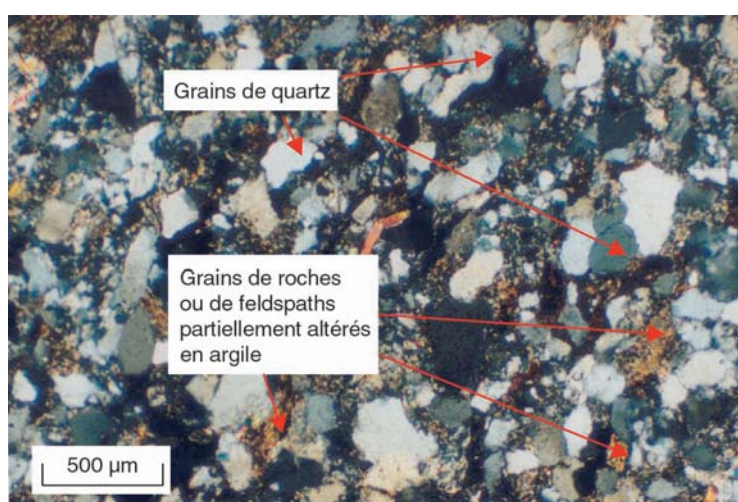
TABLEAU II
Duretés Vickers de quelques minéraux courants (d'après [17])

Minéraux	Dv (kg/mm ²)
Biotite (mica)	90
Calcite	110
Verre volcanique	608
Orthose (feldspath)	720
Hornblende (amphibole)	730
Quartz	1 280
Corindon (émeri)	2 000

En effet, les roches en question (cornéennes, grauwackes, brèches, cinérites, etc.) ont des compositions qui sortent de l'ordinaire puisqu'il ne s'agit plus d'un simple assemblage de minéraux, mais d'un assemblage de grains eux-mêmes issus de différentes roches.

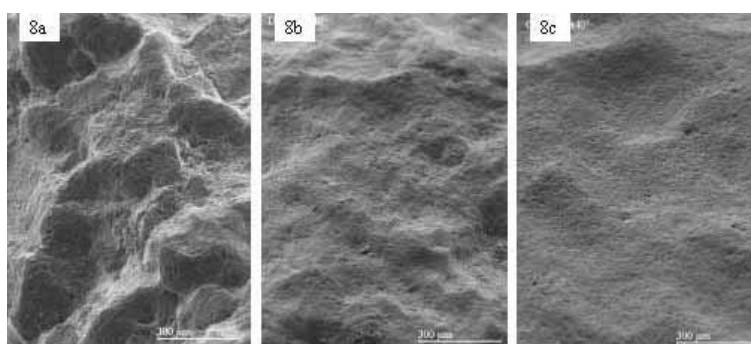
Le cas des grauwackes notamment est intéressant puisque cette roche représente la source de granulats pour couches de roulement la plus utilisée en Grande-Bretagne, avec des valeurs de PSV* souvent supérieures à 65 [20]. Ces roches (Fig. 7), qui font partie de la grande famille des grès, sont composées de grains élémentaires fortement cimentés entre eux, mais dont la dureté intrinsèque est très variable, allant de très durs (grains de quartz) à tendres (grains de roches diverses plus ou moins altérées).

D'une façon générale, il s'avère donc qu'une forte résistance au polissage des granulats nécessite des minéraux ou grains durs, ce qui permet d'éviter une usure générale trop rapide, mais aussi des espèces minérales ou grains de natures variées présentant des duretés contrastées, ce qui entraîne une usure différentielle favorable au maintien d'une rugosité importante (Fig. 8). Dans des cas très particuliers comme les laitiers sidérurgiques, le même effet peut être obtenu par la porosité des grains, les vides se substituant aux minéraux tendres.



□ **Figure 7**

Lame mince de grauwacke vue au microscope optique, en lumière polarisée.



□ **Figure 8**

État de surface de roches après polissage en laboratoire

a - Grauwacke de PSV = 65 : roche polyminérale avec forts contrastes de dureté entre les composants (grains de quartz et grains de roche altérée à tendance argileuse).

b. - Diorite de PSV = 50 : roche polyminérale avec minéraux de dureté moyenne (feldspaths, amphiboles) et contraste de dureté moyen.

c - Calcaire de PSV = 37 : roche monominérale composée d'un minéral tendre (calcite).

* Cf. définition dans le paragraphe suivant.

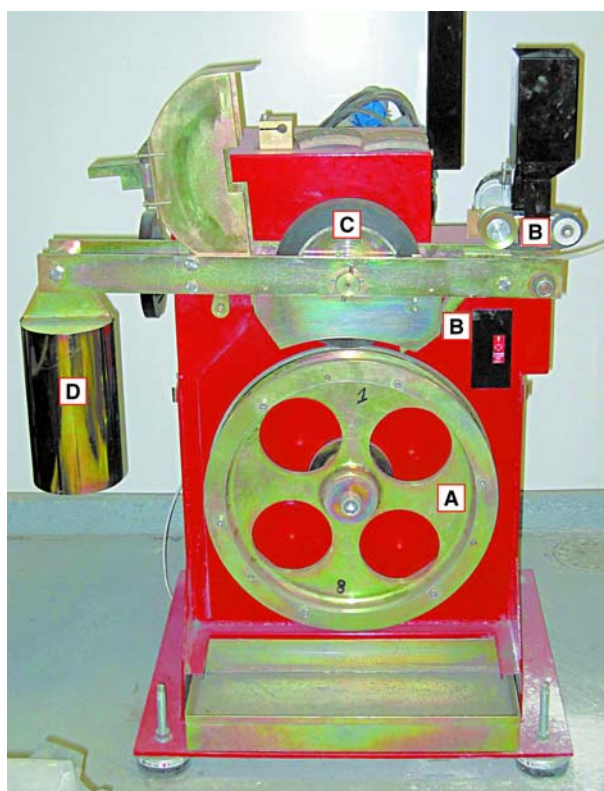
ESSAIS DE POLISSAGE

Si l'étude pétrographique permet une première approche du potentiel de résistance au polissage d'une roche, il ne s'agit évidemment pas d'une méthode de caractérisation permettant de fixer des spécifications dans les marchés. En effet, cet objectif nécessite des valeurs chiffrées fondées sur la performance et non sur la nature des matériaux. Par ailleurs, compte tenu de la variabilité des résistances au polissage au sein d'une même famille de roches, ainsi qu'à l'intérieur d'un même gisement (changements de faciès pétrographiques, filons, altération, etc.), il est nécessaire de pouvoir disposer de méthodes permettant de caractériser des lots de granulats destinés à un marché par rapport aux valeurs spécifiées.

Plusieurs essais de laboratoire sont disponibles pour réaliser cette caractérisation. Ils se déroulent tous en deux temps : la première phase consiste en un polissage accéléré des granulats, la deuxième en une mesure de la résistance au frottement de la surface polie.

L'essai PSV

Le plus connu et le plus utilisé de ces essais est le PSV (Polished Stone Value) d'origine anglaise. Il fait l'objet de la norme EN 1097-8 [21], et se trouve être le seul essai retenu à ce jour par le Comité Européen de Normalisation (CEN) pour caractériser la résistance au polissage des granulats. Son mode opératoire est très proche de celui de l'ancien CPA (pour Coefficient de Polissage Accéléré) français [22]. Le principe de la phase polissage en est rappelé sur la figure 9 et les éprouvettes soumises



□ **Figure 9**

Appareil de polissage pour essai PSV

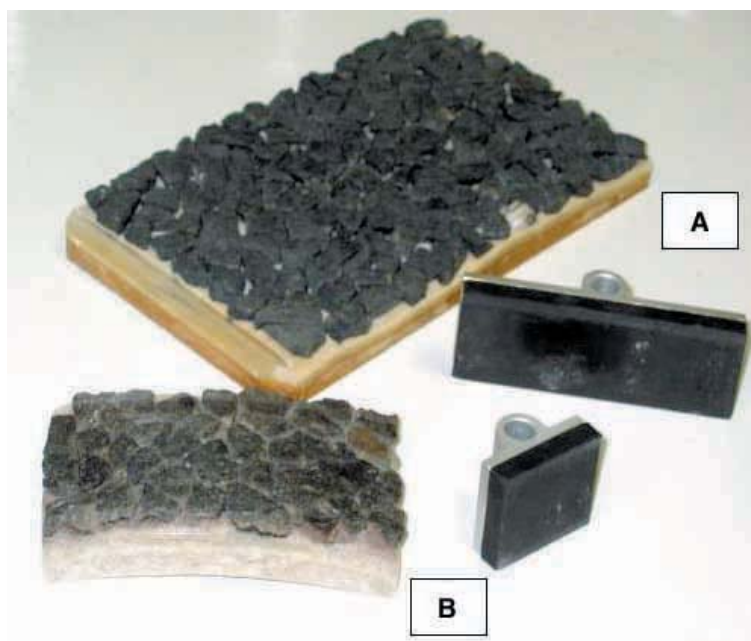
A Roue porte-échantillons entraînée en rotation par un moteur.

B Alimentation en émeri et eau, à débit contrôlé (3 h émeri grossier puis 3 h émeri fin).

C Roue caoutchoutée entraînée en rotation par contact avec les échantillons

D Masse permettant l'application d'une force d'appui constante de la roue caoutchoutée sur les échantillons.

à essai sont présentées sur la figure 10. Après polissage, la mesure est effectuée à l'aide du pendule de frottement SRT, mais la surface de frottement très réduite oblige à une réduction de la plage de lecture par rapport à l'utilisation habituelle du pendule sur surfaces routières (Fig. 11).

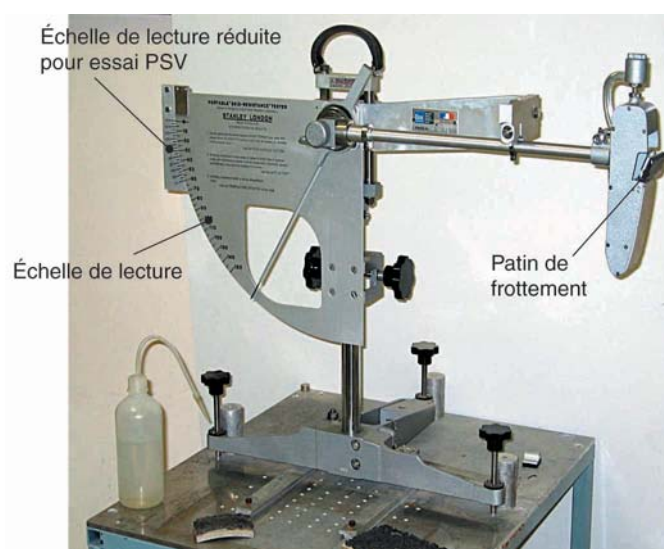


□ **Figure 10**

Plaquettes de granulats pour essais de polissage.

A Plaquette pour essai GRAP, avec patin du pendule.

B Plaquette pour essai PSV, avec patin réduit.



□ **Figure 11**

Pendule de frottement SRT.

Différents paramètres de son mode opératoire (faible surface testée, facteur opérateur important, etc.) confèrent à cet essai un caractère peu précis (tableau III). Afin de compenser une partie des écarts possibles entre les résultats, les valeurs brutes obtenues sur chaque échantillon testé sont ensuite corrigées à l'aide des valeurs obtenues sur des éprouvettes d'un granulat « de référence », dont la valeur de PSV est réputée constante. Malgré cette précaution, les valeurs de fidélité de l'essai sont de $r_1 = 3$ et $R_1 = 5$ [21], valeurs qu'il s'agit de comparer avec la progression des seuils des catégories de spécification de la norme « granulats pour enrobés » [23], qui est de 6 en 6 (tableau IV).

Par ailleurs, comme l'indique aussi le tableau III, le temps total d'exécution de cet essai est extrêmement élevé, ce qui n'est pas gênant lorsqu'il s'agit de qualifier une ressource, mais le rend inadéquat pour le contrôle d'une production ou le contrôle de chantier.

TABLEAU III

Comparaison des conditions de mesure de la microrugosité entre l'essai PSV et l'essai par projection

Paramètre	Essai PSV	Essai par projection
Éprouvette	Courbe	Plane
Largeur du patin (mm)	31,7	72,2
Longueur de frottement (mm)	76	125
Surfaces testées (cm ²)	24	95
Échelle de lecture SRT	Réduite	Normale
Mise en place granulats	Manuelle (pince à épiler)	Automatique (plaque vibrante)
Temps de préparation échantillon	1/2 journée	1 heure
Temps de préparation essai	3 jours	2 heures
Temps de réalisation essai	7 heures	1 heure
Temps total entre réception échantillon et résultat	De 3 jours à 6 semaines	1/2 journée

TABLEAU IV

Catégories de spécifications de résistance au polissage des gravillons destinés aux couches de roulement de chaussées en enrobés bitumineux (d'après [23])

Coefficient de polissage accéléré	Catégorie PSV
≥ 68	PSV ₆₈
≥ 62	PSV ₆₂
≥ 56	PSV ₅₆
≥ 50	PSV ₅₀
≥ 44	PSV ₄₄
Valeurs intermédiaires et valeurs < 44	PSV _{Déclarée}

Autres essais

Un autre essai, intitulé RPA (pour Résistance au Polissage Accéléré) est couramment pratiqué en France [24]. Il fait l'objet de la norme expérimentale française XP P 18-580 [25] et se réalise à l'aide de la machine GRAP et le pendule SRT. Son principe est indiqué sur la figure 12 et les éprouvettes soumises à essai sont présentées sur la figure 10. Les différents paramètres de son mode opératoire sont présentés dans le tableau III. Ils ont été conçus pour obtenir une meilleure précision qu'avec l'essai PSV, et aussi un temps de réponse compatible avec des cadences de contrôle de production et de chantier.



□ Figure 12

Appareil GRAP pour polissage par projection.

Le polissage est effectué par la projection sur les échantillons d'un mélange de farine de silice et d'eau, sous une pression de 10 MPa ; l'angle d'incidence de l'abrasif sur l'échantillon est de 40°. Le canon effectue pendant 45 min un balayage systématique des plaquettes à polir selon une trajectoire pilotée par un automate.

105

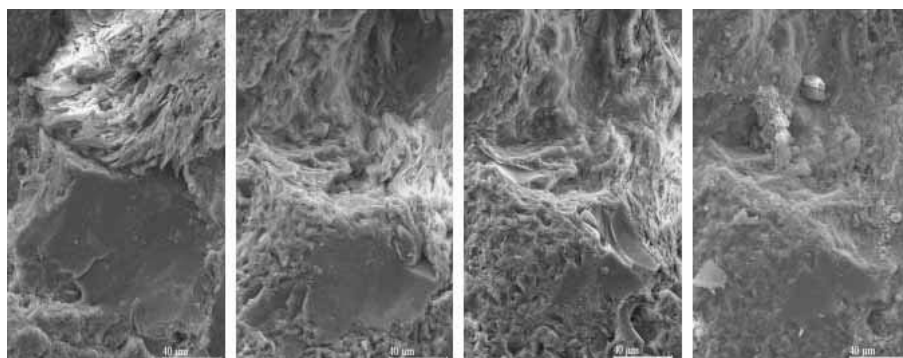
Malgré un principe physique de polissage totalement différent entre la méthode par projection de celle par contact granulat/abrasif/caoutchouc comme l'illustrent effectivement les photos de la figure 13 [26], une bonne corrélation existe entre les résultats de ces deux types d'essais (Fig. 14).

Il faut noter qu'une bonne partie de l'imprécision de ces essais est liée à la deuxième phase de leurs modes opératoires, à savoir la mesure au pendule SRT. Si elles sont actuellement du domaine de la recherche, des améliorations sensibles devraient pouvoir être apportées à l'avenir sur ce point par l'utilisation de méthodes optiques de caractérisation des surfaces après polissage [27, 28].

Une autre méthode, d'origine allemande, est aussi disponible [29]. L'appareil qui lui est dédié s'appelle la machine Wehner et Schulze (Fig. 15). Le polissage s'effectue par le roulement de cônes caoutchoutés sur des éprouvettes circulaires de 22,5 cm de diamètre, et accéléré par l'interposition d'abrasif. Un point fort de cette méthode est que la mesure du frottement après polissage s'affranchit du pendule SRT. Elle est réalisée à l'aide d'un dispositif spécifique constitué de patins de caoutchouc qui frottent sur l'éprouvette et sont reliés à un capteur de force. Ce système permet donc aussi d'obtenir une meilleure fidélité que celle de l'essai PSV. D'autre part, au-delà du polissage des seuls granulats, ce dispositif permet aussi d'effectuer des essais de résistance au polissage directement sur des matériaux de couches de roulement ou des carottes de chaussées.

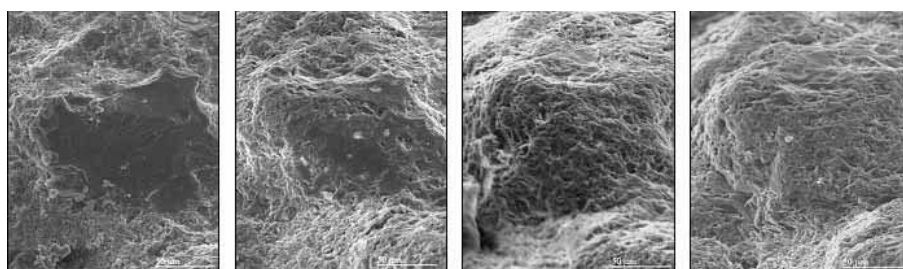
Il en va de même de l'appareil GRAP, dans lequel peuvent aussi être polies des éprouvettes d'enrobés. Des essais préliminaires ont été réalisés en ce sens et ont donné des résultats encourageants (Fig. 16 et 17). Un programme expérimental est en cours pour caler les mesures en laboratoire sur des données de chaussées circulées.

Disposer d'un appareil et d'une méthode pour mesurer en laboratoire, non seulement la résistance au polissage des granulats, mais aussi directement celle de matériaux de couches de roulement, afin de pouvoir prévoir, dès l'étude de formulation, le potentiel d'adhérence qu'elle permettra sur site, apparaît aujourd'hui comme fondamental.



État initial. 1 h 30 émeri grossier. 3 h émeri grossier. 3 h émeri grossier + 3 h émeri fin.

a - Polissage PSV : le polissage à l'émeri grossier permet d'émousser les angles des cristaux, puis l'émeri fin adoucit les petites irrégularités résiduelles.



État initial. 10 min de projection. 25 min de projection. 45 min de projection.

b - Le polissage par projection (GRAP) agit par piquetage des surfaces exposées. Sous l'effet de cette action, les arêtes des cristaux s'arrondissent tout au long du polissage et l'aspect piqueté subsiste à la fin du processus.

Figure 13

Effets comparés du polissage par la machine de l'essai PSV et par le GRAP sur l'état de surface de grains de quartz (d'après[26]). La différence de principe physique entre les deux modes de polissage se traduit à l'échelle des grains par un aspect de surface différent en fin d'essai. Cependant, la bonne corrélation entre les résultats des deux essais (cf. Fig. 14) laisse supposer que l'échelle des dimensions à laquelle se situent ces différences (quelques microns) n'a pas d'influence sur le comportement au frottement tel que perçu par le pendule SRT.

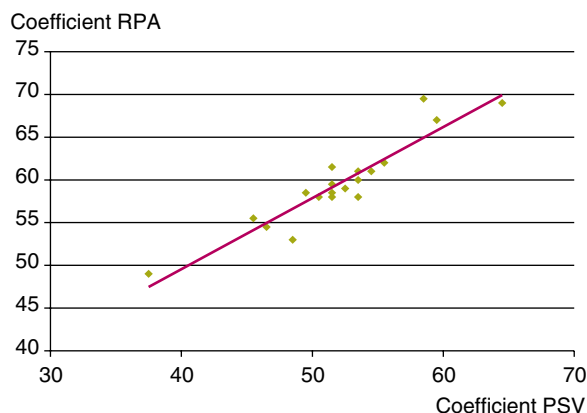


Figure 14

Corrélation entre les résultats d'essais par projection (RPA) et l'essai PSV (d'après [24], modifié).



Figure 15
 Machine Wehner et Schulze.

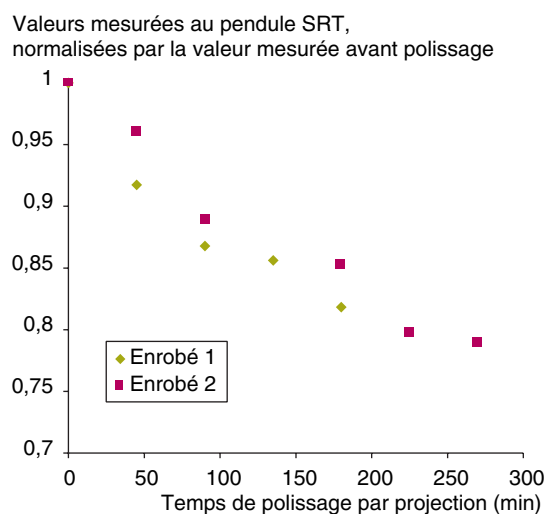
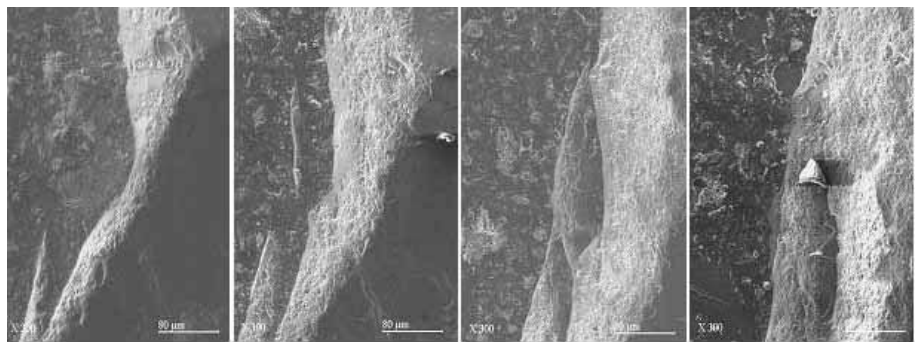


Figure 16
 Résultats d'essais préliminaires de polissage par projection (GRAP) sur des éprouvettes d'enrobés prélevées sur chantiers (BSBG 0/10 et BBTM 0/10).



5 min de projection. 10 min de projection. 25 min de projection. 45 min de projection.

■ **Figure 17**

Effet du polissage par projection (GRAP) sur un granulat enrobé de bitume (d'après [30]) : le décapage progressif du liant (en sombre à gauche) met à nu le granulat (à droite en clair), dont les arêtes et surfaces sont alors attaquées par l'abrasif.

INFLUENCE DE LA RÉSISTANCE AU POLISSAGE DES GRANULATS SUR L'ADHÉRENCE DES CHAUSSÉES

Parmi les planches expérimentales sur chaussées circulées, déjà évoquées plus haut, deux avaient pour objectif l'étude du rôle relatif des différentes caractéristiques intrinsèques des granulats sur l'adhérence. Les éléments relatifs à la construction de ces deux séries de planches (RN148 à Niort et RN137 à Saint Fulgent) sont réunis dans les tableaux V, VI et VII.

TABLEAU V

Caractéristiques des deux chantiers expérimentaux destinés à tester l'influence des caractéristiques mécaniques des granulats sur l'évolution de l'adhérence des chaussées

Site	Année	Typologie	Trafic	Caractéristiques des sections
RN148, Niort (79)	1992	Rectiligne, plan, climat tempéré	0,3.10 ⁶ TCPL / an /voie (T1 fort)	4 sections de BBTMa 0/10 et granulats respectifs A, B, C et D
				4 sections de BBDr 0/10 et granulats respectifs A, B, C et D
RN137 Saint- Fulgent (85)	1997	Rectiligne, plan, climat tempéré	0,2. 10 ⁶ TCPL / an /voie (T1)	5 sections de BBTM avec granulats E et F répartis dans différentes fractions granulométriques

TABLEAU VI

Caractéristiques des granulats des chantiers du tableau V (RN148 Niort et RN137 Saint-Fulgent)

	Nature	PSV	LA	MDE	LA + MDE
A	Amphibolite	52	20	14	34
B	Tuf rhyolitique	53	12	5	17
C	Granite à 2 micas	60	25	15	40
D	Séricitoschiste	61	20	25	45
E	Leptynite	49	13	4	
F	Grès et cornéenne	60	13	14	

TABLEAU VII
Formules des enrobés mis en œuvre sur les chantiers décrits dans le tableau V (RN148 Niort et RN137 Saint-Fulgent)

		RN148 BBTma 0/10	RN148 BBDr 0/10	RN137 BBTM		
Granularité	10	90 %	90 %	94 %		
	6,3	37 %	23 %	50 %		
	2	30 %	16 %	21 %		
	0,063	6,3 %	4,6 %	8 %		
Bitume		60/70 dopé, 5 à 5,6 %	60/70 dopé, 4,2 à 4,7 %	Bitume pur 50/70 : 5,3 %		
Nature des granulats (cf. tableau VI)		100 % A ou 100 % B ou 100 % C ou 100 % D ou	100 % A ou 100 % B ou 100 % C ou 100 % D ou	0/2	2/6	6/10
				E	E	E
				F	E	E
				E	F	E
				E	E	F
				F	F	F

Les granulats choisis pour ces expérimentations ont été sélectionnés en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques de façon à assurer de forts contrastes soit en coefficient PSV, soit en coefficient Los Angeles* (LA) [31], soit en coefficient Micro-Deval** en présence d’eau (MDE) [32]. Un soin particulier a été apporté à leur approvisionnement puisque les lots utilisés ont été spécialement préparés en carrières et ont fait l’objet de mesures spécifiques de leurs caractéristiques avant la réalisation des chantiers.

En terme de résistance au polissage, ils sont tous conformes aux spécifications courantes pour couches de roulement. En revanche, une certaine faiblesse a été acceptée sur les coefficients LA et MDE de certains d’entre eux, dans le but de vérifier la pertinence de forts niveaux d’exigence sur ces deux propriétés.

Les résultats obtenus sur ces deux séries de planches sont présentés sur les figures 18 et 19 ainsi que dans les tableaux VIII et IX.

Il faut d’abord noter que, sur ces deux chantiers, la macrotexture des sections de chaussées décroît de façon assez régulière ou reste stable sous l’effet du trafic (Fig. 18a et 19a). D’autre part, quel que soit le granulat utilisé, l’adhérence offerte par le revêtement après six ou sept années sous trafic reste bonne puisque les résultats de mesures CFL et CFT se situent à l’intérieur du fuseau CFL repère contenant 80 % des performances des surfaces de chaussées.

Le principal enseignement de ces planches est qu’après plusieurs années de trafic, les sections construites avec des granulats à fortes résistances au polissage offrent systématiquement une meilleure adhérence que les autres (Fig. 18b, 18c, 19b) : une différence de dix points sur le coefficient PSV se traduit par des différences de l’ordre de 0,1 sur les coefficients CFL et CFT. En revanche, les variations en termes de coefficients LA et MDE n’ont manifestement aucun effet dans la gamme testée.

Un autre enseignement est que le maintien d’un fort niveau d’adhérence dans le temps est principalement lié à la résistance au polissage de la fraction la plus grossière des gravillons, l’apport en la matière des sables et petits gravillons étant pratiquement négligeable (cf. tableau IX).

* Résistance à la fragmentation.

** Résistance à l’attrition.

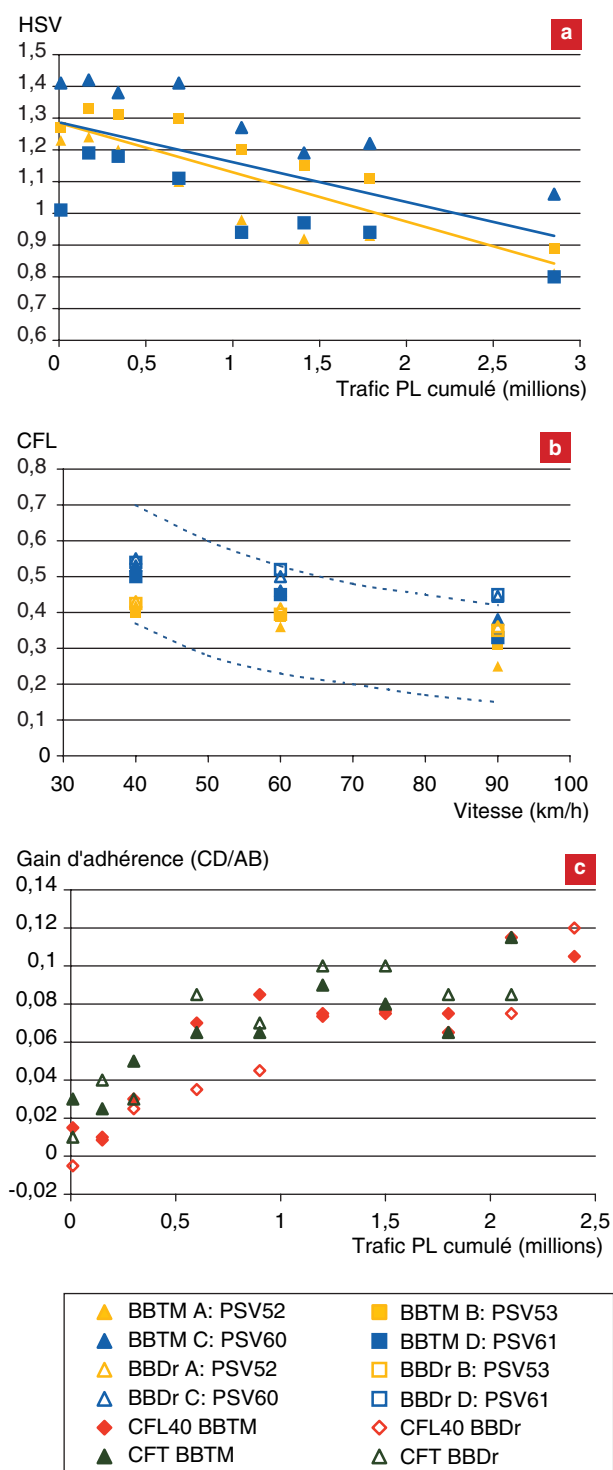


Figure 18

Résultats des planches expérimentales de la RN148 à Niort : comparaison des performances des différents revêtements.

a - Évolution de la macrotexture des BBTM du site expérimental de Niort : les valeurs moyennes de macrotexture entre les revêtements contenant des granulats à fort PSV et à PSV moyen sont comparables.

b - Performances en CFL à 8 ans des revêtements mis en œuvre sur le site expérimental de Niort (BBTM et BBDr) : tous les revêtements sont compris dans le fuseau repère.

c - Différence de performance d'adhérence entre les revêtements avec granulats à PSV fort et ceux avec granulats à PSV moyen.

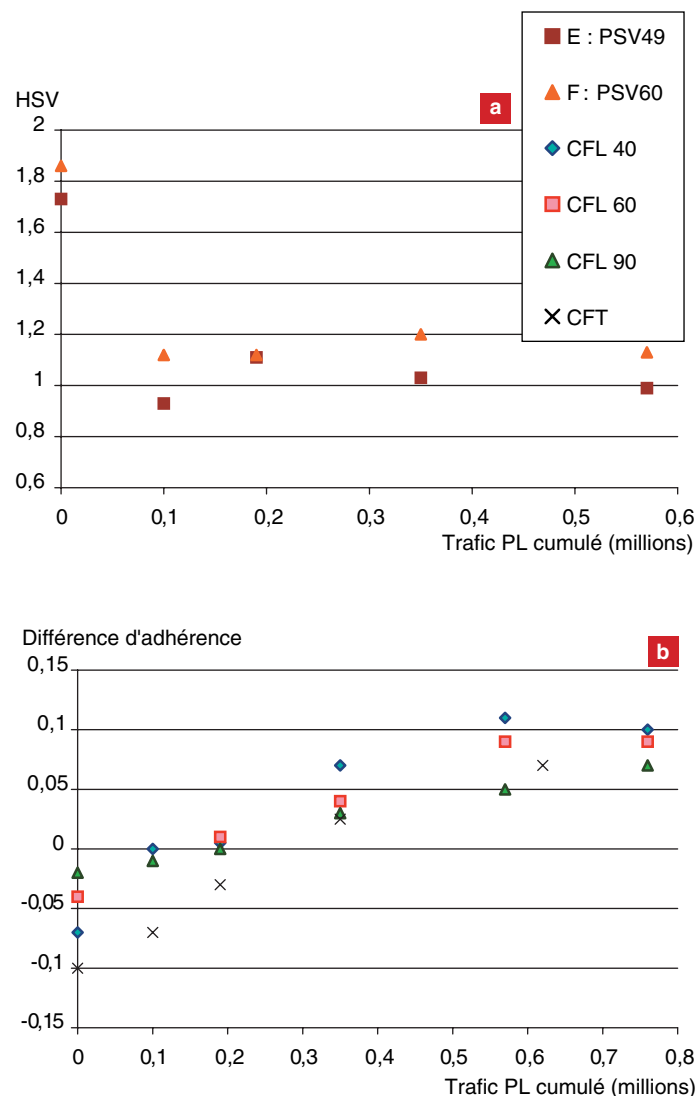


Figure 19

Planches expérimentales de la RN137 à Saint-Fulgent.

NB : le granulat à PSV fort se trouve avoir une meilleure affinité au liant et un film bitumineux plus épais à la mise service qui se traduit par une moins bonne adhérence. Après un trafic PL de $0,2 \cdot 10^6$, les performances d'adhérence des deux revêtements se rejoignent. L'action du trafic révèle un gain en adhérence significatif du revêtement avec granulat à fort PSV à partir de $0,4 \cdot 10^6$ PL.

a - Évolution de la macrotexture : les deux revêtements sont comparables.

b - Différence de performance d'adhérence entre le revêtement avec granulats à fort PSV et celui avec granulat à PSV moyen.

TABLEAU VIII
Résultats des essais CFT sur les planches RN148 Niort et RN137 Saint-Fulgent

RN148 Niort CFT à $2,55 \cdot 10^6$ PL (7 ans)			RN137 Saint-Fulgent CFT à $0,62 \cdot 10^6$ PL (6 ans)	
Granulats	BBTM 0/10	BBDr 0/10	Granulats	BBTM 0/10
A	0,49	0,50	100 % E	0,52
B	0,50	0,48		
C	0,62	0,59		
D	0,60	0,56	100 % F	0,62

TABLEAU IX
Effet sur l'adhérence de l'apport d'un granulat à fort PSV dans les différentes fractions granulométriques d'un BBTM 0/10 (planche RN137 Saint-Fulgent)

Section	CFL 40		CFT	
	Résultat à 1,15.10 ⁶ PL	Gain vis-à-vis du témoin 1 × 100	Résultat à 1,15.10 ⁶ PL	Gain vis-à-vis du témoin 1 × 100
Témoin 1 0/10 granulat E	0,45		0,52	
0/2 granulat F	0,46	1	0,53	1
2/6 granulat F	0,47	2	0,53	1
6/10 granulat F	0,53	8	0,60	8
Témoin 2 0/10 granulat F	0,56	11	0,62	10

RÉFLEXION SUR LE CHOIX DES GRANULATS POUR COUCHES DE ROULEMENT

Granulats et offre d'adhérence des chaussées

L'offre d'adhérence d'une chaussée résulte en grande partie des deux paramètres que sont la formule du matériau de revêtement et les granulats qui le constituent.

À titre d'illustration, l'approche anglaise par exemple a longtemps privilégié l'effet du granulat [14]. En effet, la tradition des enrobés cloutés y est très ancrée. Il s'agit de matériaux fins dans lesquels sont enchâssés de gros gravillons. Cette configuration conduit à un faible nombre de points de contacts pneu-chaussée et donc à une sollicitation très forte des gravillons. Elle nécessite de très fortes exigences sur la résistance au polissage des gravillons, qui est considérée comme le paramètre primordial, voire quasi exclusif pour l'obtention d'une adhérence bonne et durable [13]. De ce fait, toute une gamme de spécifications en fonction de la classe de trafic et des conditions de sites a été développée. Ces spécifications atteignent très rapidement des seuils de PSV = 60 et peuvent même monter à des valeurs de PSV = 70.

À l'opposé, les techniques de revêtements routiers développées en France ces trente dernières années offrent un intéressant compromis. Lorsque la macrotexture de la chaussée est bonne, ce qui est atteint par un choix convenable de la formule routière et une bonne mise en œuvre, l'évacuation de la lame d'eau est assurée. La multiplication des points de contact pneu-chaussée devient alors le paramètre prépondérant de l'adhérence et le niveau d'exigence sur les granulats peut être moindre.

Concernant ces exigences, il est toutefois utile de préciser que la politique française en matière de choix des granulats pour les couches de roulement a longtemps été d'accorder une place prépondérante à la résistance à la fragmentation et à l'attrition. Cette position s'appuyait sur l'idée que ces deux caractéristiques permettent le maintien, malgré l'effet du trafic, d'arêtes vives propices aux propriétés antidérapantes du revêtement [2]. Elle se justifiait d'autant plus sur des revêtements de type enduit superficiel, dans lesquels la position des granulats est relativement aléatoire. Elle se traduisait dans les spécifications par l'introduction d'une compensation entre les caractéristiques mécaniques [33], ouvrant ainsi pour la plupart des usages la possibilité de choisir des granulats de PSV assez faible, pourvu que cette faiblesse soit compensée par d'excellents coefficients LA et MDE.

Ces dernières années, quelques déboires sont survenus avec des granulats respectant cette spécification, notamment ceux issus de roches basaltiques ou apparentées. De plus, dans la plupart des techniques de bétons bitumineux qui dominent actuellement sur les chaussées à forts trafics, les granulats sont généralement disposés à plat et présentent leurs faces aux pneus, et beaucoup moins leurs arêtes. Enfin, les résultats des planches expérimentales ont permis d'établir que les résistances à la frag-

mentation et à l'usure n'ont pas d'action sur la pérennité des propriétés antidérapantes d'une couche de roulement. Ces éléments ont donc montré que la compensation ne se justifiait pas ; les nouvelles classifications [23] ne la reprennent donc pas.

Ressources en granulats pour couches de roulement

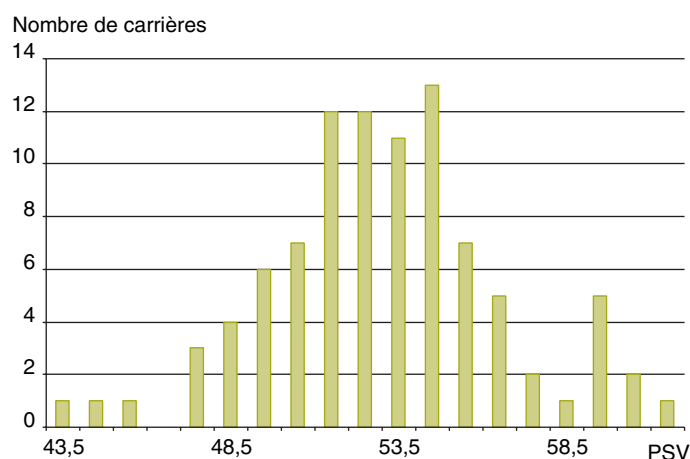
Une ressource en granulats peut se définir comme un gisement de matériaux dont les qualités géotechniques permettent de répondre aux spécifications des marchés, dont l'exploitation est économiquement viable et peut être autorisée par décision administrative.

Nature des granulats

Les spécifications des marchés français ayant jusqu'à présent privilégié les fortes valeurs de coefficients Los Angeles et Micro-Deval, en limitant les exigences sur la résistance au polissage, il n'est pas surprenant de constater que les coefficients PSV habituellement recensés parmi les carrières françaises actuelles (Fig. 20) soient peu élevées au regard de ceux disponibles auprès des carrières de pays voisins.

La géologie extrêmement diverse du sous-sol français offre sans doute la possibilité de trouver des roches avec des coefficients PSV plus élevés que ceux actuellement proposés sur le marché (tout en gardant des performances suffisantes sur les autres caractéristiques mécaniques). Si de telles roches venaient à être localisées, il s'agirait d'en préserver l'accès pour une éventuelle exploitation future en s'appuyant sur les schémas départementaux des carrières [35].

Cependant, la lourdeur des procédures pour l'ouverture de carrières et l'ampleur des investissements nécessaires confèrent beaucoup d'inertie au tissu industriel de la production des granulats. Ainsi, un développement important de l'exploitation de ce type de matériaux ne semble pas d'actualité. De toutes façons, avec une trentaine de carrières offrant des PSV > 56, les ressources actuellement exploitées permettent d'ores et déjà une diversification des approvisionnements.

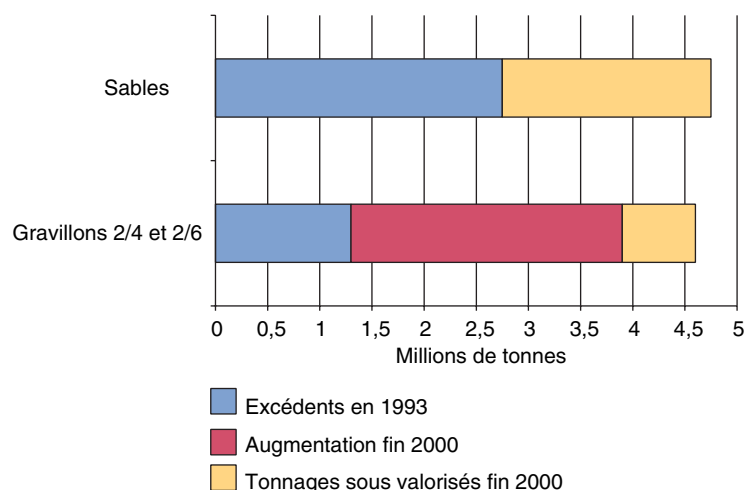


□ **Figure 20**

Distribution des valeurs moyennes provenant d'une centaine de carrières françaises fournissant des granulats pour couches de roulement (d'après [34]).

Équilibre des productions

Les granulats pour couches de roulement sont issus du concassage de roches. Un processus de réduction granulométrique, quel que soit le type de concasseur utilisé et les réglages adoptés, conduit à une courbe granulométrique étalée [36]. L'utilisation préférentielle de l'une ou l'autre des fractions ainsi produites conduit inévitablement à la constitution de stocks excédentaires dans les autres fractions. Une carrière positionnée dans un secteur géographique déficitaire en ressources trouvera tou-



□ **Figure 21**

Tonnages des fractions excédentaires dans les carrières de roches massives fournissant des granulats pour couches de roulement (d'après [34]).

jours le moyen de valoriser ces stocks. À l'inverse, cela n'est généralement pas possible pour un site de production situé en zone excédentaire, comme c'est souvent le cas des carrières susceptibles de fournir les granulats pour couches de roulement.

De plus, les exigences sur la qualité des granulats (notamment pour les paramètres de forme et de régularité) conduisent généralement les producteurs à faire subir aux matériaux plusieurs cycles de concassage. Chacun de ces cycles produit des fractions sableuses, qui représentent donc le plus souvent l'excédent le plus important.

La demande accrue en formules discontinues ces dernières années a conduit à la constitution d'importants stocks excédentaires de petits gravillons (Fig. 21). Si cette discontinuité reste indispensable pour certaines formules (BBDr notamment), les données d'adhérence acquises sur quelques chantiers de BBTM 0/10 continus ou à discontinuité réduite (cf. ci-dessus) conduisent à s'interroger sur sa véritable nécessité pour d'autres formules, au moins dans des conditions de site faciles. Si cette tendance venait à être confirmée, une modification des habitudes de formulation conduirait à un meilleur équilibre des productions, sans toutefois permettre de réduire les excédents sableux qui représentent les plus forts tonnages.

Améliorer l'offre d'adhérence de certaines chaussées

Pour faire atteindre à une chaussée un niveau d'adhérence voulu et le maintien de cette performance dans le temps, il est possible d'agir sur les formules routières et la nature des granulats. Il apparaît que les besoins courants sont satisfaits par les techniques et spécifications actuelles [37]. Des formules de revêtements largement utilisées comme les BBTM ou les BBDr présentent sur ce point de très bonnes performances. Pour les granulats, les spécifications se limitaient à des coefficients PSV de 46,5 (si nous avons d'excellents coefficients LA et MDE) ou plus souvent 51,5 (ancien CPA = 0,50). C'est le cas par exemple des gravillons pour couches de roulement en BBSG ou BBTM (sous des trafics supérieurs à 150 PLJ) du réseau routier national [38]. Cependant, le besoin de revêtements à plus forte adhérence se fait sentir dans un nombre croissant de sites particuliers et, dans ces cas là, les seules solutions disponibles sont bien souvent des produits d'entreprise, très coûteux, à base de granulats artificiels de bauxite calcinée liés à la résine époxy [39-41]. Des solutions intermédiaires sont tout à fait envisageables, mais ne sont aujourd'hui pas codifiées, ce qui freine leur emploi.

Pourtant, le besoin existe [37] pour traiter, par exemple, des zones moyennement accidentogènes. Mais pour y répondre d'une façon plus adaptée, un recensement et une étude de ces zones seraient aujourd'hui nécessaires. La large gamme des spécifications britanniques a été établie sur la base de l'observation et de l'étude statistique d'un grand nombre de tronçons de chaussées présentant des conditions de sites différentes [13, 14].

En France, il serait utile d'offrir aux maîtres d'ouvrages une palette élargie de solutions fondées sur des spécifications plus détaillées tenant compte des formules de revêtement, du calibre et des performances des granulats. Cela nécessiterait qu'un travail important d'identification des zones à risque et d'étude de leur fonctionnement, soit entrepris.

CONCLUSION

Le niveau d'adhérence des chaussées françaises est jugé dans l'ensemble satisfaisant [37] ; les combinaisons entre les types de revêtements et les spécifications de coefficient PSV des granulats peuvent être considérées comme bien adaptées pour l'essentiel du réseau routier. Par exemple, pour des tracés interurbains linéaires en BBSG ou BBTM, la catégorie PSV₅₀ semble un bon choix. De plus, elle permet un approvisionnement relativement aisé compte tenu du tissu industriel des carrières en place. L'optimisation du niveau d'adhérence sur de telles chaussées se fait alors au travers de la courbe granulométrique et des formules de matériaux.

Par contre, la sensibilité au thème de la sécurité routière étant devenue très importante, des besoins supérieurs en adhérence apparaissent progressivement sur des itinéraires ou sections particuliers. Or aujourd'hui, la plupart des cas particuliers traités le sont à l'aide des techniques à base de bauxite calcinée. Le coût très élevé de ces techniques oblige à en limiter l'usage aux cas extrêmes, les « points noirs », pour lesquels d'importants moyens financiers peuvent être engagés. Pour une partie des situations intermédiaires, des solutions techniques sont disponibles, mais restent méconnues.

Ces solutions peuvent s'appuyer, pour les sites concernés, sur une optimisation entre le choix des formules d'enrobés et un niveau de spécification sur la résistance au polissage des granulats plus exigeant que l'actuel. Les ressources exploitées en France permettraient de répondre, au moins partiellement, à un tel cas de figure.

La codification souhaitable de cette optimisation nécessite toutefois un important travail d'étude des itinéraires afin d'aider à l'identification des tronçons concernés et de cerner leur demande réelle en adhérence.

Au-delà de cette préoccupation, un autre axe de progrès concerne les méthodes d'étude et d'essais en laboratoire. Il apparaît ainsi indispensable d'améliorer la fidélité des essais de polissage des granulats. Le développement de méthodes optiques de caractérisation des surfaces polies pourrait contribuer à cet objectif. Par ailleurs, l'adaptation des appareils de polissage dans le but de tester, non plus seulement des granulats seuls mais directement des formules d'enrobés, représenterait un pas important vers la prévision des niveaux d'adhérence dès l'étude de formulation.

115

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LUCAS J., BEGOU P.A., Description de la macrotexture et de la microtexture, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **185**, mai-juin 1993, pp. 63-74.
- [2] DUPONT P., TOURENQ C., Granulats et microrugosité, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **185**, mai-juin 1993, pp. 145-151.
- [3] DO M.T., LUCAS J., Contact pneu-chaussée : apport de la microtexture du revêtement, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **196**, mars-avril 1995, pp. 5-17.
- [4] Ministère de l'Équipement, Direction des Routes, *Circulaire 2002-39 relative à l'adhérence des couches de roulement neuves et au contrôle de la macrotexture*, **2002**, 12 pages.
- [5] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Mesure de l'adhérence des chaussées routières et aéronautiques, Méthode d'essai, **50**, *Techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **2002**, 28 pages.
- [6] BELLANGER J., Adhérence et revêtements routiers, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **185**, mai-juin 1993, pp. 129-137.
- [7] DELORME J.-L., Formulation, mise en œuvre et adhérence des enrobés bitumineux, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **185**, mai-juin 1993, pp. 139-143.
- [8] BROSSEAUD Y., Les solutions d'entretien des couches de surface, *Revue générale des routes et autoroutes*, **742**, **1996**, pp. 17-22.
- [9] BROSSEAUD Y., BELLANGER J., Les nouvelles formulations d'enrobés pour couches de roulement : évaluation de leurs caractéristiques de surface, *Revue générale des routes et autoroutes*, **752**, **1997**, pp. 51-56.
- [10] USIRF, *Les enrobés bitumineux*, tome 2, Éditions Revue Générale des Routes et Aérodrômes, **2003**, 381 pages.

- [11] DUPONT P., GANGA Y., BELLANGER J., DELALANDE G., Planches expérimentales « adhérence-granulats » : conclusions, *Revue générale des routes et autoroutes*, **788**, 2000, pp. 41-44.
- [12] LUCAS J., Étude de synthèse de la glissance des chaussées, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, spécial F Glissance, **1966**, pp. 47-77.
- [13] ROE P.G., HARTSHORNE S.A., The polished stone value of aggregates and in-service skidding resistance, *TRL Report*, **322**, 1998, 28 pages.
- [14] ROE P.G., Research on road surface skidding resistance in the U.K. *Proceedings of the 2nd European Road Research Conference*, European Commission – DGVII, Brussels, 7-9 June 1999.
- [15] FOUCAULT A., RAOULT J.F., *Dictionnaire de Géologie*, Éditions Masson, Paris, **1980**, 334 pages.
- [16] TOURENQ C., FOURMAINTRAUX D., Propriétés des granulats et glissance routière, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **51**, 1971, pp. 61 à 69.
- [17] TOURENQ C., La dureté Vickers des minéraux et des roches, quelques applications, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **19**, 1966, pp. 1-1 à 1-12.
- [18] LEDUCQ M., *Péetrographie des granulats et coefficient de polissage accéléré*, Rapport interne du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers, **FAER 2.21.10.8**, 1999, 25 pages.
- [19] THOMSON M.C., Effect of quantity and size distribution of the plus #200 acid-insoluble residue on the skid resistance characteristics of the Loyalhanna limestone, *8th Annual Symposium Proceedings of International Center for Aggregates Research*, Denver, April 12-14, 2000.
- [20] HOSKING R., Road aggregates and skidding, *TRL*, H.M.S.O., London, **1992**, 235 pages.
- [21] AFNOR, Norme européenne NF EN 1097-8, *Essais sur les propriétés mécaniques et physiques des granulats. Partie 8 : Détermination du coefficient de polissage accéléré*, 2000.
- [22] AFNOR, Ancienne norme française NF P 18-575, *Granulats : Mesure du coefficient de polissage accéléré des gravillons*, 1990.
- [23] AFNOR, Norme EN 13043, *Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés pour la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zone de circulation*, 2003.
- [24] DELALANDE G., Résistance des granulats au polissage, méthode d'essai par projection, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **177**, janvier-février 1992, pp. 73 - 80.
- [25] AFNOR, Norme française XP P 18-580, *Granulats : Mesure de la résistance au polissage accéléré des gravillons – Méthode par projection*, 1997.
- [26] CHAPELLE J., *Caractérisation de l'évolution de la microtexture des granulats sous l'effet d'un polissage*, Rapport de stage de DESS, LCPC et université de Clermont-Ferrand, 2000, 123 pages.
- [27] ZAHOUANI H., VARGIOLU R., DO M.T., Characterization of microtexture related to wet road/tire friction. *4th International Symposium on Pavement Surface Characteristics SURF 2000*, May 22-24, 2000, Nantes, France, World Road Association PIARC, 2000.
- [28] DO M.T., LÉDÉE V., HARDY D., Tire/road friction : assessment of the polishing of road aggregates, *Proceedings of the 2nd World Tribology Congress*, September 03-07, Vienna, Austria, 2001.
- [29] HUSCHEK S., Experience with skid resistance prediction based on traffic simulation. *Proceedings of 5th symposium on pavement surface characteristics SURF 2004*, June 6-10th, Toronto, Canada, World Road Association PIARC, 2004.
- [30] PRECIGOUT J., Étude de l'évolution de l'aspect de surface des enrobés sous l'effet d'un polissage, *Rapport de stage de Licence*, LCPC et université de Besançon, 72 pages, 2003.
- [31] AFNOR, Norme EN 1097-2, *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation*, 1998.
- [32] AFNOR, Norme EN 1097-1, *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, partie 1 : Détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval)*, 1996.
- [33] AFNOR, Ancienne norme française XP P 18-540, *Granulats : définitions, conformité, spécifications*, 1997.
- [34] La demande et l'offre en granulats pour couches de roulement, *Matériaux de Construction et Produits de Carrières*, **715**, 2001, pp. 15-18.
- [35] LÉDÉE V., PASQUET J.-F., Proposition de méthode pour la révision du chapitre « ressources » des schémas départementaux des carrières, *Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, à paraître.
- [36] DUTHOIT V., *Concassage et broyage*, In « Granulats », Presses de l'ENPC, 1990, 717 p.
- [37] FERRANDEZ F., Analyse des accidents : infrastructure et sécurité, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **185**, mai-juin 1993, pp. 19-26.
- [38] *Guide d'application des normes pour le réseau routier national : enrobés hydrocarbonés à chaud*, LCPC, SETRA, 1994.
- [39] MONTAGNON M., Enrobés et enduits à base de bauxite en Ile-de-France, *Route Actualité*, **99**, 2000.
- [40] MARMIER F., Colgrip, antidérapage garanti, *Revue générale des routes et autoroutes*, **814**, 2003, pp. 84-85.
- [41] MARQUET T., SPILLEMAEKER P.M., Enduits à hautes performances dans le département de l'Allier, *Revue générale des routes et autoroutes*, **830**, 2004, pp. 83-86.