

Étude de l'orniérage des couches de roulement au manège d'essai du LCPC

Jean-François CORTE
Directeur technique
Chargé du pôle Chaussées

Yves BROSSEAUD
Ingénieur de recherche

Jean-Pierre KERZREHO
Ingénieur de recherche

Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

A. SPERNOL
Ingénieur
Scétauroute
(pour le compte de l'ASFA)

RÉSUMÉ

Durant ces dernières années, plusieurs expérimentations sur l'orniérage des enrobés de surface ont été réalisées sur le manège d'essai du Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) à Nantes. L'objectif de ces études est d'évaluer, comparativement à une formule d'enrobé au bitume pur 50/70 et au squelette minéral rendu instable par l'usage d'un sable broyé, l'effet des liants modifiés par des polymères, des liants spéciaux, des bitumes durs et d'additifs sur l'amélioration de la résistance à l'orniérage. Parallèlement, l'influence des conditions de sollicitation, telles que la vitesse et la configuration des charges (roue simple large ou jumelage), a été testée. Un dispositif de chauffage a également été évalué. L'article présente les résultats obtenus lors des trois premières expérimentations. Il compare et tente de mettre en relation les résultats d'identification des liants et des enrobés par différents tests de laboratoire et les déformations mesurées sur le manège.

MOTS CLÉS : 22-31 - Couche de roulement - Poids lourd - Charge d'essieu - Liant - Essai - Granulat - Enrobé - Composition du mélange - Ornière - Manège - Bitume - Résistance (matér.) - Laboratoire - Déformation - Mesure.

Préambule

Le trafic poids lourd reste en évolution croissante depuis plus de vingt ans. La configuration des poids lourds a changé avec une forte progression du nombre d'essieux tridems à roues simples, une augmentation de la charge totale roulante (celle-ci atteint maintenant 46 t) et de la pression de contact. La charge maximale pour un essieu isolé, en France, reste de 13 t. Cette agressivité plus forte se traduit par l'existence de phénomènes d'orniérage sur les zones à fort trafic et en site difficile. Des matériaux nouveaux, souvent à base de liants spéciaux ou modifiés par des polymères, se sont développés pour améliorer le comportement des chaussées face à l'accroissement des sollicitations.

Pour mieux comprendre les mécanismes de l'orniérage et pour évaluer l'apport de ces nouveaux liants, trois expérimentations sur l'orniérage des couches de roulement ont été réalisées, durant les étés 1992, 1993 et 1994, sur le manège de fatigue du Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) à Nantes. Une quatrième expérimentation s'est déroulée en 1996, où l'on a testé l'intérêt de l'incorporation de fibres. Ces études sont menées en partenariat avec les maîtres d'ouvrage autoroutiers (ASFA) et pour les deux premières avec la société des pétroles Shell.

Les résultats de ces expérimentations ont été publiés à l'occasion de la VIII^e Conférence internationale sur les enrobés qui s'est tenue en août 1997 à Seattle aux États-Unis [1]. Le présent article fait une synthèse d'ensemble de ces études.

Généralités

Objectifs des expérimentations

Ces expérimentations ont été conçues pour apporter des informations sur l'incidence de différents facteurs influant sur le développement de l'orniérage : le liant, les sollicitations dues au trafic. Le programme d'essais de laboratoire accompagnant ces expérimentations avec le manège a servi non seulement à la caractérisation des matériaux mis en œuvre, mais aussi à juger de la représentativité et de la sélectivité des résultats des essais de laboratoire. À signaler, enfin, que les mesures faites sur les chaussées du manège fournissent des données de référence pour la mise au point d'un modèle prédictif de calcul d'orniérage, en phase de développement au LCPC.

■ **L'étude sur les enrobés de surface avait pour but d'apprécier l'apport des liants spéciaux ou d'additifs** (polymères neufs ou recyclés, et fibres de verre et de récupération pour l'expérimentation de 1996) **sur la résistance à l'orniérage**. Par rapport à un bitume pur de base 50/70, pris en référence, la comparaison a porté sur deux bitumes à faible susceptibilité thermique (de type multigrade) de grades de 35/50 et 50/70, un bitume dur de grade 10/20 (testé lors des quatre expérimentations), deux bitumes modifiés par des polymères « neufs », l'un par des SBS, l'autre par des EVA ; un bitume avec ajout de 0,85 % de déchets de câbles (composés de polyéthylène basse densité) dans le malaxeur.

■ **L'étude de l'effet des sollicitations** s'est faite suivant trois axes :

① l'influence de la configuration des charges roulantes :

– en 1992 et 1994 (répétition pour partie de l'expérimentation de 1992), la comparaison s'est faite entre essieux à roue simple large et essieux à roues jumelées traditionnelles,

– en 1993, l'évaluation a porté sur l'effet « période de repos » entre les chargements de deux roues simples larges isolées (écart de temps de 4,6 s) et de deux roues simples en tandem (espacement des roues 1,40 mètre) ;

② l'influence du facteur vitesse a été appréciée par comparaison des déformations obtenues sur différents rayons dans une plage de vitesse tangentielle comprise entre 37,9 et 47,7 kilomètres par heure ;

③ l'influence de la température a été abordée en 1994 par une étude de faisabilité du chauffage d'un secteur par des lampes halogènes disposées en bord de piste.

En 1996, l'étude des sollicitations a été complétée par l'examen de l'effet d'un surgonflage des pneumatiques de l'ordre de 30 % par rapport

aux valeurs nominales recommandées par le fabricant, aussi bien pour la roue simple large que pour le jumelage. Les résultats seront publiés ultérieurement.

■ **Parallèlement, des essais de laboratoire ont été exécutés pour estimer leur caractère sélectif ou prédictif d'un comportement réel à l'orniérage, évalué par le manège**. Tous les essais traditionnels (prévus dans les études de formulation) ont été réalisés sur les constituants (granulats, fines, liant). Ceux-ci ont été complétés par la détermination de la courbe maîtresse des modules complexes des liants. Les essais sur les enrobés ont été :

➤ l'essai à la presse à cisaillement giratoire ;

➤ un essai de fluage dynamique par cycle de chargement de 0,1 MPa pendant 0,2 s suivis de période de repos en maintenant une très légère compression pendant 1,8 s, ceci à une température de 40 °C ;

➤ un essai de compression répétée selon une contrainte axiale sinusoïdale d'amplitude et de moyenne σ_v , comprise entre 0,17 et 0,35 MPa, associée à une contrainte de compression latérale σ_h , comprise entre 0 et 0,3 MPa, pour des températures de 40 et 50 °C ;

➤ l'essai de simulation à l'orniéreur LPC à la température de 60 °C, température retenue par les normes françaises sur les enrobés.

Ce programme d'essai a été complété par des essais à l'orniéreur LPC et de module complexe en flexion et en traction, aux températures et aux temps de charge les plus proches des conditions d'essai sur le manège.

Dans la suite de cet article, nous allons développer principalement les aspects portant sur la formulation et la caractérisation des enrobés en laboratoire au moyen de l'essai d'orniérage LPC. Nous indiquerons, en particulier, les correspondances entre ces résultats et les comportements observés sur le manège d'essai. Après avoir formulé un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, nous tenterons de dégager les tendances liées aux effets des paramètres de sollicitation.

Nous examinerons, pour terminer, **la faisabilité d'un dispositif de chauffage en périphérie de la piste**. Le but de ce système est de pouvoir atteindre, sous les conditions climatiques rencontrées fréquemment sur le site de Nantes (températures ambiantes d'été de 25 à 35 °C), des températures de 50 à 55 °C en surface des enrobés. Ces températures sont très souvent dépassées de 5 à 10 °C, dans le sud de la France, où l'on est confronté aux problèmes les plus importants d'orniérage.

Les matériaux testés

Critères de choix

La formulation des enrobés s'est faite au moyen de l'orniéreur LPC [2]. Cet essai normalisé (NF P 98-253-1) consiste à soumettre une plaque d'enrobé de 10 cm d'épaisseur au passage répété d'une charge roulante de 5 000 N, appliquée par un pneumatique gonflé à 0,6 MPa, à raison d'un aller et retour par seconde, à une température de 60 °C. Les déformations sont mesurées à intervalles réguliers.

Les niveaux de déformation retenus pour déterminer la composition des matériaux de ces expérimentations ont été les suivants.

- **Pour l'enrobé d'assise non orniérant**, une déformation inférieure à 5 % après 30 000 cycles (la norme pour les graves-bitume (GB) prévoit seulement moins de 10 % d'ornière à 10 000 cycles).
- **Pour l'enrobé de surface pris en référence**, un béton bitumineux semi-grenu (BBSG), une plage de 12 à 18 % d'ornière après seulement 3 000 cycles. Ce seuil correspond à une valeur couramment constatée sur des enrobés présentant un orniérage important sur chaussée. Ce choix était destiné à produire un matériau présentant une déformabilité suffisante pour observer dans les conditions des expériences avec le manège un orniérage significatif, tout

en restant limitée afin de pouvoir mettre en évidence l'apport des modifications du liant sur la résistance à l'orniérage de l'enrobé. On rappellera que la norme sur les BBSG fixe une valeur limite de 10 % d'ornière à 30 000 cycles.

Compositions d'enrobés retenues pour les expérimentations

Pour satisfaire les spécifications énoncées ci-avant, les formulations utilisées ont été les suivantes.

- **Pour l'assise** : une GB 0/14, composée de granulats durs de diorite (carrière de La Noubleau), entièrement concassés et donc particulièrement frottants, avec 4,6 % de bitume pur de grade 35/50.
- **Pour la couche de surface du secteur de référence** : un BBSG 0/14, composé d'un sable 0/2 d'un tuf ryolithique (carrière de Cusset), concassé dans un broyeur à barres, au dosage moyen de 33 %, de granulats 2/14 (en plusieurs fractions) des carrières de Cusset ou La Noubleau, avec un bitume pur de grade 50/70 à raison de 5,5 %.

Les compositions sont données par les tableaux I et II.

Les dosages ont dû être ajustés lors de l'expérimentation de 1994, à 36 % de sable et à 5,8 % de bitume, pour respecter l'intervalle des déformations, préfixé à l'essai d'orniéreur.

TABLEAU I
Recomposition granulométrique des enrobés

Fraction	10/14	6/10	2/6	0/2	Filler	Bitume
GB 0/14 en assise	Noubleau 28	Noubleau 17	Noubleau 21,5	Noubleau 31	2,5	35/40 4,6
Enrobé de référence 1992	Cusset 27,5	Cusset 23	Cusset 16	Cusset 32	1,5	50/70 5,7
1993	Noubleau 23,5	Noubleau 21	Noubleau 21	Cusset 33	1,5	5,5
1994	23	22	18	36	1	5,8

Remarque : Les recompositions granulaires, de même que les teneurs en liant, de l'enrobé de référence tiennent compte des variations de masse volumique des différents granulats utilisés, pour parvenir à une même courbe granulométrique du mélange, et un même module de richesse pour le liant.

TABLEAU II
Granularité des enrobés

Tamis (mm)	Passant (%)				
	14	10	6	2	0,08
GB 0/14	96	74	56	33	7,5
BB de référence					
1992, 1993	99	80	54	35	7,6
1994	97	78	58	38	7,9

En effet, le sable bien qu'issu de la même carrière et du même broyeur à barres présentait une sensibilité moins grande aux déformations à l'essai d'orniérage (ornière limitée à 5 % et 7,2 % après respectivement 3 000 et 10 000 cycles). Les observations du sable à la loupe binoculaire montraient, comparativement au sable des années 1992 et 1993, des grains aux formes moins arrondies, donc *a priori* plus stable. Les essais traditionnels de caractérisation du sable, tant par granulométrie que par l'essai d'écoulement, n'avaient rien mis en évidence. Seul un essai global du comportement à l'orniérage sur l'enrobé a permis de révéler le caractère nettement plus frottant du sable et une meilleure résistance aux déformations permanentes de l'enrobé. Des vérifications du bon fonctionnement de l'orniéreur ont bien sûr été faites. L'essai avec des constituants approvisionnés en 1993 a montré une excellente répétabilité de l'essai, et mis en évidence que les différences provenaient bien de la nature du sable.

Le pourcentage en sable de cette formule de référence (33 %) est nettement plus élevé que dans les formulations traditionnelles, où celui-ci est généralement inférieur ou égal à 30 %. Mais, c'est surtout la nature même du sable broyé qui est à l'origine du phénomène d'orniérage. Si l'on remplace ce sable broyé par un sable concassé, on obtient un enrobé de bonne résistance à l'orniérage, conforme aux spécifications de la norme sur les BBSG. De même, si l'on change l'origine de la fraction granulaire 2/14 (en 1992 carrière Cusset, et en 1993 carrière La Noubleau), on ne modifie pas le comportement à l'orniéreur.

Ainsi, cet enrobé de référence est bien orniérant, par la nature et la composition de son squelette granulaire et non par la nature du liant (bitume trop mou) ou de son dosage (excessif). Ceci permettra donc d'évaluer, de façon réaliste, les conséquences d'une modification des liants utilisés selon les mêmes dosages, ou pour les dosages couramment retenus pour certains enrobés.

* **Pour les enrobés, en couche de surface, des autres secteurs** : les compositions sont les mêmes que celles de l'enrobé de référence, seule change la nature du liant d'enrobage, ou l'incorporation d'additif dans le malaxeur. Le dosage en liant est modifié respectivement de + 0,3 % et de - 0,15 % pour les enrobés à module élevé (EME) et les enrobés avec ajout de déchets de câbles. Les EME sont des enrobés dont le liant est dur (pénétrabilité inférieure à 20 1/10 mm) et le dosage en liant important, pour réduire la susceptibilité à la fissuration en fatigue. L'EME est recouvert par un béton bitumineux très mince (épaisseur de 2,5 cm), pour obtenir une bonne texture superficielle et assurer une protection thermique.

• **Pour les BBTM**: la composition est conforme à la norme sur les BBTM (NF P 98-137). Ils présentent une granularité 0/10 ou 0/6 discontinue 2/6 ou 2/4, un pourcentage en sable compris entre 20 et 30 %. Ils sont enrobés par un liant modifié par des polymères, respectivement SBS, EVA et Styrelf 13 pour les expérimentations de 1992 à 1994. Le dosage en liant est de 5 à 5,5 %.

Étude de l'influence des paramètres de composition sur les propriétés déterminées en laboratoire

Cette étude a été faite sur l'enrobé de référence de 1992.

Facteur granulométrique Pourcentage de sable [3]

Les résultats de la figure 1 représentent l'influence du pourcentage de sable broyé (dans une plage de 28 à 36 %) sur l'orniérage de l'enrobé de référence (1992).

On note qu'en dessous de 30 % de sable, l'enrobé présente une assez bonne résistance à l'orniérage, puisque l'essai est conduit jusqu'à 30 000 cycles avec une déformation de moins de 10 % (critère d'acceptation des BBSG en couche de roulement). Au-delà de ce seuil, la sensibilité à l'orniérage croît de façon importante avec une faible augmentation de la proportion de sable. Compte tenu des incertitudes de dosage en centrale de fabrication, le pourcentage de 35 % de sable broyé a été retenu pour s'assurer *a priori* d'un comportement orniérant.

Facteurs pourcentage de vide et dosage en liant

L'étude de la variation de vide dans une plage de 4 à 8 % et de la teneur en liant, dans l'intervalle de $\pm 0,25$ % autour de la valeur moyenne, montre une insensibilité de la formule de référence à ces facteurs. Celle-ci présente le même niveau d'orniérage. On confirme donc bien que le paramètre prépondérant de la mauvaise tenue à l'orniérage de l'enrobé de référence est le fort dosage d'un sable broyé peu frottant.

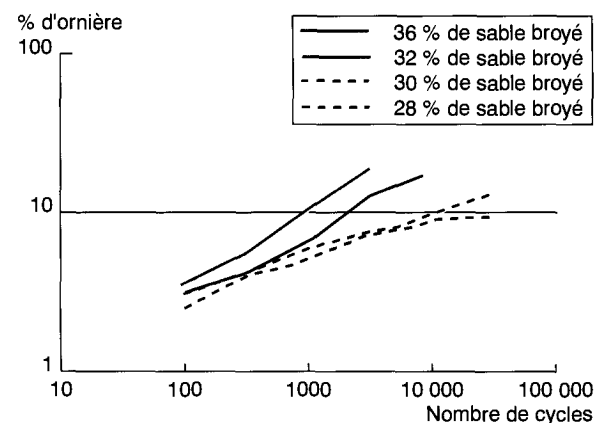


Fig. 1 - Résultats à l'orniéreur LPC, influence du dosage en sable.

Les enrobés de référence de chacune des trois expérimentations présentaient les mêmes courbes d'ornièrage et des niveaux de déformation à 3 000 cycles compris entre 12 et 15 %.

Facteur nature du liant

L'un des objectifs des expérimentations était de comparer l'efficacité de l'emploi de liants spéciaux, de liants modifiés ou d'additifs couramment employés depuis cinq à dix ans sur les chantiers pour améliorer la résistance à l'ornièrage des enrobés [3].

Le choix des liants a été fait, conformément aux pratiques actuelles sur chaussées à fort trafic.

Les différents liants utilisés et leurs caractéristiques de pénétrabilité et température « bille-anneau » sont récapitulés dans le tableau III.

Cette identification sommaire des liants de base a été complétée par des essais de vieillissement artificiels (RTFOT) et des récupérations de liant sur les enrobés, en fin d'expérimentation. Les résultats montrent une faible évolution en liant tant à l'enrobage qu'après six mois de sollicitation. Les résultats à l'essai RTFOT sont comparables aux caractéristiques relevées à six mois sur les liants récupérés, sauf pour les liants spéciaux multigrades de grade 35/50 et 50/70 pour lesquels les résultats RTFOT sont nettement plus sévères (près du double en Δ TBA) que ce qui est observé.

Des essais de module complexe sur les liants ont été réalisés. Lorsque la modification des enrobés intervenait par ajout d'additif lors de l'enrobage, des essais de module complexe sur les enrobés modifiés ont été pratiqués.

Pour la première expérimentation, les figures 2 et 3 représentent l'isotherme à 60 °C et les courbes de Black à 7,8 Hz des liants. La figure 4 présente les courbes maîtresses des enrobés au liant dur (EME) et de l'enrobé modifié par des déchets de câbles, testés en 1994.

Ces résultats traduisent :

- un liant multigrade plus structuré que les bitumes purs (aussi bien 50/70 que le liant dur 10/20),
- un liant modifié SBS présentant pour les hautes températures une moindre susceptibilité thermique et cinétique,
- un bitume dur ayant dans tous les cas les modules les plus forts.

Selon les valeurs de module et d'angle de phase mesurées sur les liants, aux températures de service élevées (40 à 60 °C), le classement par ordre décroissant de sensibilité à l'ornièrage est le suivant :

bitume pur << bitume modifié SBS =
multigrade < bitume dur

TABLEAU III
Caractéristiques des liants testés

Secteur	Nature	Caractéristiques	Pénétrabilité (1/10 mm)	TBA (°C)
Expérimentation 1992				
I	Référence 50/70	Bitume pur classique pour l'enrobage des BBSG	63	50,5
II	Multigrade 50/70	Liant spécial à faible susceptibilité thermique	52	60,5
III	Dur 10/20	Bitume spécial dur non normalisé utilisé pour l'enrobage des EME	15,5	70,5
IV	Modifié SBS	Liant prêt à l'emploi traditionnel au dosage de 3,4 % d'élastomère (SBS)	55	58,5
Expérimentation 1993				
II	Multigrade 35/50	Liant spécial à faible susceptibilité thermique (grade plus dur qu'en 1992)	39	65,5
IV	Modifié EVA	Liant prêt à l'emploi traditionnel modifié par un copolymère EVA au dosage important (> 5 %)	47	67,5
Expérimentation 1994				
IV	Déchets de câbles	Obtenu par décorticage de câble téléphone, composé essentiellement de polyéthylène de basse densité	Introduit dans le malaxeur (pas de caractérisation du liant 50/70 + PE)	
Pour les trois expérimentations				
Remarques : La provenance et le grade (50/70) du bitume de référence sont toujours restés les mêmes. Le bitume dur provient de deux raffineries (Shell Petit Couronne pour les deux premières expérimentations et Elf Feyzin pour la suivante), mais les caractéristiques pénétrabilité et TBA restent semblables.				

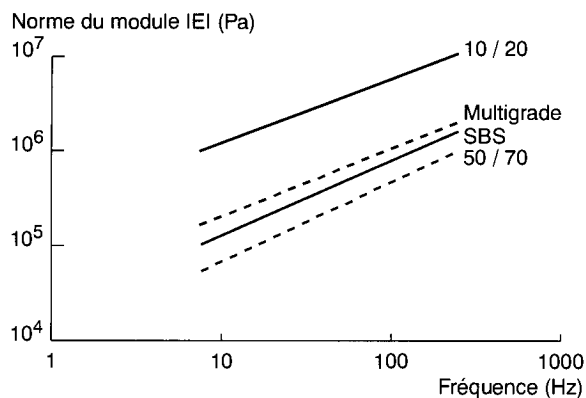


Fig. 2 - Isotherme à 60 °C, liants 1992.

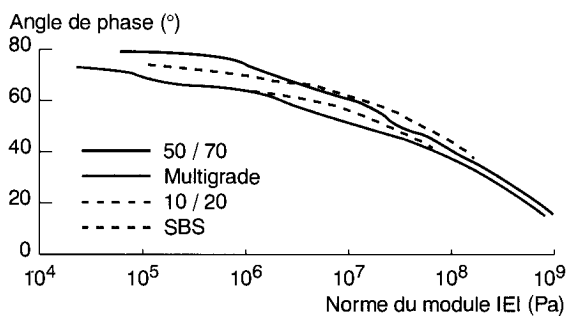


Fig. 3 - Représentation dans l'espace de Black, liants 1992.

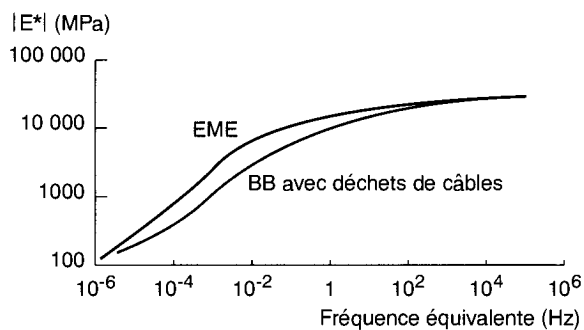


Fig. 4 - Courbe maîtresse du module des enrobés EME et déchets de câbles, expérimentation de 1994.

Ce classement est identique à celui que l'on établirait à partir des valeurs de modules des enrobés à 40 °C ou 50 °C et des déformations mesurées à l'orniéreur LPC.

Ces essais de module complexe sur les bitumes durs ont mis en évidence une susceptibilité thermique et cinétique un peu plus forte pour les liants des expérimentations de 1994. Cette caractéristique se retrouve dans les valeurs de déformations à l'essai d'orniéreur qui sont également plus élevées. À 30 000 cycles, on passe de 4 % (expérimentations 1992 et 1993) à 7 % (en 1994). De même, la comparaison de l'évolution des modules des enrobés, dans la gamme des températures et fréquences du manège ou à l'essai d'orniéreur (températures de 40 à 60 °C et des fréquences de 1 à 7 Hz), de l'EME d'une part et des enrobés aux déchets de câbles d'autre part, traduit bien une résistance à l'orniéreur plus élevée pour

ce dernier. La susceptibilité thermique de l'enrobé aux déchets de câble est plus faible que celle de l'EME : les pentes des isothermes à 50 et 60 °C sont de 20 % plus faibles et les valeurs de module à 60 °C sont comparables. Ces essais de module sont des éléments explicatifs des comportements en déformation des enrobés.

L'essai d'orniéreur sur les formulations fabriquées en laboratoire suivant les procédures normalisées et sur les compositions théoriques révèle d'importantes différences dans la résistance à l'orniéreur liée à la nature des liants par rapport à l'enrobé de référence.

Les résultats des essais d'orniéreur sur les fabrications en laboratoire et en centrale d'enrobage sont détaillés dans le tableau IV.

Les figures 5a, 5b et 5c présentent les résultats à l'orniéreur LPC des différents enrobés pour les trois premières expérimentations.

Tous les procédés testés pour modifier les propriétés de l'enrobé se révèlent efficaces pour réduire l'orniéreur, même si l'on note quelques écarts dans les comportements (tableau V). À 3 000 cycles, les résultats de déformation sur les différents enrobés « modifiés » sont équivalents (l'écart maximal n'est que de 2,6 %) et conduisent à une réduction de l'orniéreur de près de 70 % par rapport à l'enrobé de référence. En revanche, à 30 000 cycles, on relève des différences significatives dans les comportements à l'orniéreur.

On constate que l'emploi de liants spéciaux multigrades et de bitumes durs, ainsi que l'incorporation de déchets plastiques, permettent de passer d'un enrobé de référence très orniéreur à un enrobé à faible déformation. Ces enrobés sont conformes à la spécification imposée dans la norme EME (moins de 8 % d'orniéreur à 30 000 cycles), matériau couramment utilisé pour ses excellentes performances de résistance à l'orniéreur.

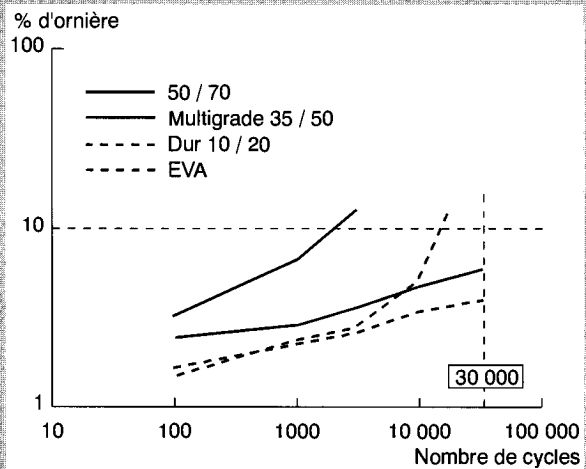
Les enrobés à base de liants polymères (SBS et EVA) présentent une courbe d'orniéreur assez atypique, puisque l'on remarque un accroissement brutal de la déformation entre 3 000 et 10 000 cycles. Dans le même temps, on note une élévation assez importante de la température dans l'échantillon (+ 3 à 5 °C) à relier à un échauffement de surface, dû au passage de la roue. Les résultats sur quatre répétitions sont également assez dispersés (écart absolu des déformations : 5 à 6 %). Une certaine prudence est donc à observer quant à l'appréciation de la pertinence des résultats obtenus sur ces matériaux au-delà de 3 000 cycles avec l'orniéreur.

Des essais à l'orniéreur LPC ont également été réalisés sur les enrobés fabriqués en centrale et prélevés avant l'application sur les pistes du manège.

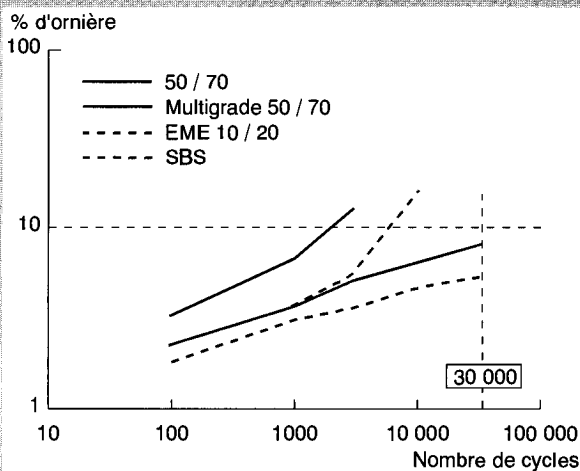
TABLEAU IV
Résultats des essais à l'ornièreur sur matériaux fabriqués en laboratoire (étude préliminaire)
et en centrale d'enrobage (vérification du comportement)

Déformation (%)										
Nombre de cycles	100		1 000		3 000		10 000		30 000	
	Labo	Chantier	Labo	Chantier	Labo	Chantier	Labo	Chantier	Labo	Chantier
Expérimentation 1992										
50/70	3,2	2,2	6,5	3,7	12	4,7	-	5,8	-	6,7
Multigrade 50/70	2,2	1,4	3,5	2,5	4,8	2,9	6	3,7	7,5	4,1
10/20	1,8	1,3	3	2,3	3,5	3,1	4,5	3,6	5	4
SBS	2,2	2,8	3,5	4,1	5,2	5,5	15	7,8	-	9,2
Expérimentation 1993										
50/70			6,7	2,8	13,5	3,5	-	4,7	-	6,4
Multigrade 35/50			2,9	1,7	3,6	1,9	4,6	2,2	5,8	2,5
10/20			2,4	1,8	2,6	2,2	3,4	2,6	3,9	3,1
EVA (* 20 000 cycles)			2,3	2,5	2,8	3,1	5,1	4,6	16 (*)	6,6
Expérimentation 1994										
50/70			6,9	8,5	14	18	-	-	-	-
10/20			-	3,9	-	4,8		6		7
Déchets câbles			2,2	2,3	2,9	2,7	4	3,4	5,4	4,3

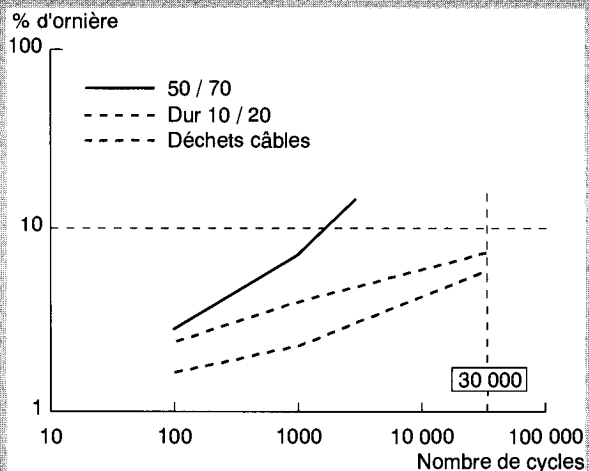
Figure 5 - Résultats à l'ornièreur LPC des différents enrobés pour les trois premières expérimentations



b. Enrobés 1993.



a. Enrobés 1992.

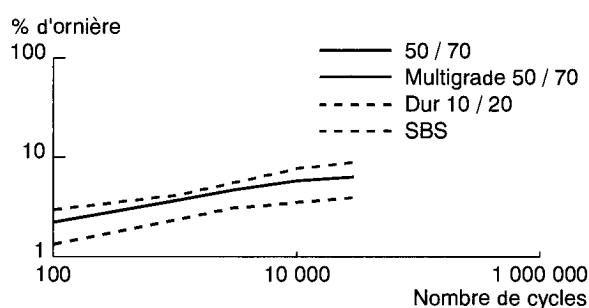


c. Enrobés 1994.

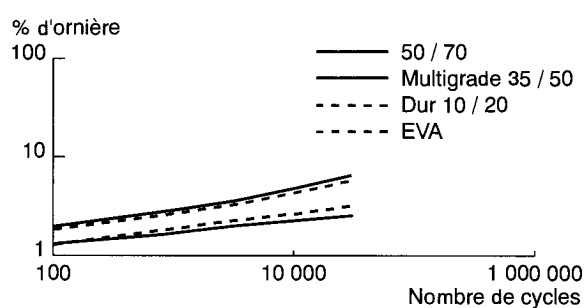
TABLEAU V
Classement des enrobés fabriqués en laboratoire par leur déformation à 3 000 et 30 000 cycles

Nombre de cycles			
3 000		30 000	
Enrobé	Déformation (%)	Enrobé	Déformation (%)
50/70 « 1992/1993/1994 »	12 à 14	50/70 « 1992/1993/1994 »	Non mesurable
SBS	5,2	SBS	15 (à 10 000 cycles)
Multigrade 50/70	4,8	EVA	16 (à 20 000 cycles)
10/20 « 1994 »	4,8	Multigrade 50/70	7,5
Multigrade 35/50	3,6	10/20 « 1994 »	7
10/20 « 1992 »	3,5	Multigrade 35/50	5,6
EVA et déchets câbles	2,8	Déchets câbles	5,4
10/20 « 1993 »	2,6	10/20 « 1993 »	4,8

« 1992 » : expérimentation correspondant à l'année 1992.



a. Expérimentation de 1992.



b. Expérimentation de 1993.

Fig. 6 - Résultats à l'ornièrerie LPC des enrobés fabriqués en centrale.

Les figures 6a et 6b présentent les résultats obtenus à l'ornièrerie en 1992 et 1993. D'une manière assez générale, sauf pour l'expérimentation n° 3 où la teneur en bitume de l'enrobé était plus forte (+ 0,3 %), on note une baisse importante de la sensibilité à l'ornièrage des enrobés fabriqués en centrale par rapport au laboratoire (cf. tableau IV). Ce phénomène est à relier aux différences de vieillissement des liants constatées entre les conditions d'enrobage et probablement de mode de séchage des granulats en centrale et en laboratoire. La diminution des profondeurs d'ornièrerie correspond à un facteur de translation de l'ordre de 10, à savoir que l'ornièrerie mesurée à 1 000 cycles sur la fabrication en laboratoire est comparable à celle mesurée à 10 000 cycles pour le matériau « chantier ».

Le classement de sensibilité à l'ornièrage des différents enrobés fabriqués en centrale reste le même qu'en laboratoire (hormis pour les enrobés au liant modifié par des SBS et EVA), mais les écarts, en déformations à 3 000 cycles, sont réduits à seulement 30 à 50 % par rapport à l'enrobé de référence (au lieu de 70 % pour l'étude en laboratoire). La fabrication en centrale réduit le degré de sensibilité à l'ornièrage de l'enrobé et rend plus difficile la discrimination par l'essai à l'ornièrerie.

Les enrobés à base de liant modifié par des SBS et EVA fabriqués en centrale présentent une courbe d'ornièrage bien linéaire. On n'observe pas d'échauffements parasites. Les déformations restent faibles, mais du même niveau que celles relevées sur l'enrobé de référence.

Comportement des matériaux sur le manège d'essai

Le manège de fatigue

Le manège de fatigue du LCPC (fig. 7) est installé sur le site de Nantes-Bouguenais [4] et [5]. Il est destiné à étudier le comportement mécanique de structures routières soumises à un trafic lourd accéléré, ce qui permet de suivre l'évolution d'une chaussée en exerçant en quelques mois le même nombre de charges qu'elle subirait normalement pendant les quinze ou vingt ans de sa durée de service.

L'ensemble comprend quatre bras entraînés en rotation par une motorisation électro-hydraulique centrale. Les charges sont appliquées en bout de bras par l'intermédiaire d'essieux à configura-

tion variable. Le rayon de rotation des charges est réglable entre 15,50 et 19,50 m par pas de 0,50 m. De plus, en fonctionnement, les charges effectuent des balayages dans le profil en travers reproduisant ainsi les dispersions observées sous trafic réel. La largeur de la bande de roulement est réglable jusqu'à 1,60 m de largeur.

En configuration de jumelage simple, le manège simule des passages d'essieux de poids réglable de 90 et 150 kN. La vitesse maximale des charges dans cette configuration est de 100 km/h. Un dispositif original de suspension permet de maintenir la valeur de la charge appliquée aux vitesses élevées et sur des chaussées présentant des dénivellations ou des dégradations.

Description des structures [3]

Les expérimentations avec le manège d'essai se sont déroulées sur des chaussées composées à chaque fois de quatre secteurs, avec les structures et les dispositions indiquées sur la figure 8.

L'assise de la chaussée a une épaisseur de 0,60 m. Le niveau de déflexion est compris entre 10 et $15 \cdot 10^{-2}$ mm sous un essieu de 130 kN. Elle est constituée de 2 x 10 cm de grave-bitume 0/14, spécialement étudiée pour une très bonne résistance à l'ornièrage, reposant sur 20 cm de grave hydraulique et 20 cm de grave non traitée. Le traitement de la grave par 3,9 % de ciment avait pour but d'améliorer la portance du sol support de qualité médiocre.

La couche de roulement en enrobés présente une épaisseur de 8 cm, exception faite du secteur III où les couches de surface sont composées d'une couche de liaison en EME et d'une couche de roulement en BBTM. Ce complexe est très souvent utilisé sur autoroute, pour l'entretien des voies spéciales poids lourds et en construction neuve pour réduire l'épaisseur.

La réalisation des pistes s'est effectuée au moyen de matériel traditionnel de construction routière. Les contrôles de fabrication ont montré un très bon respect des compositions : les variations sur les pourcentages de sable et de bitume ont été respectivement de $\pm 2 \%$ et $\pm 0,2 \%$. Il en est de même pour la mise en œuvre, où l'on a obtenu les épaisseurs de 8 cm ± 1 cm et des teneurs en vides comprises entre 3 et 5 %.

Les expérimentations successives se sont déroulées sur les mêmes assises, les couches de roulement étant fraisées et refaites.

Les types de matériaux des secteurs I (référence) et III (complexe EME + BBTM) sont restés les mêmes pour les quatre expérimentations, à l'exception de l'origine des bitumes durs pour l'EME et de la composition du BBTM.

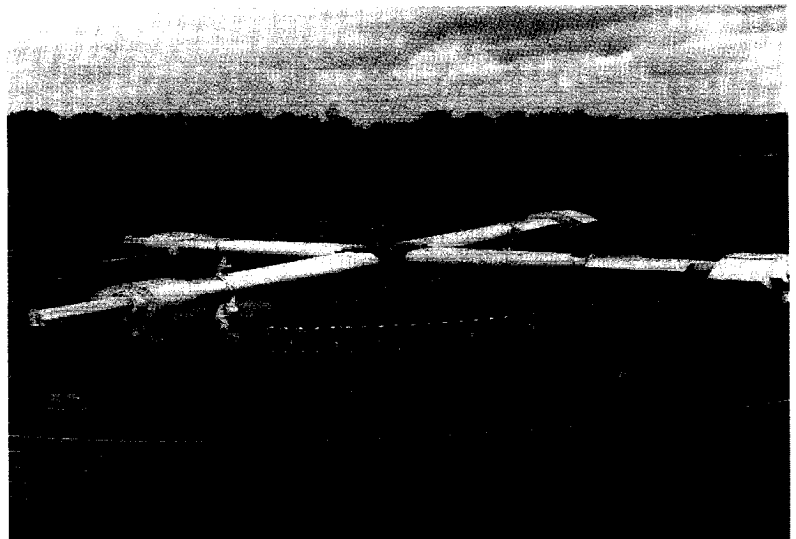


Fig. 7 - Vue d'ensemble du manège et du dispositif de chauffage.

Ces deux secteurs permettent d'établir certaines comparaisons entre les différentes expérimentations, en tenant compte, de manière globale, des inévitables variations climatiques.

Les sollicitations mécaniques

Les conditions de chargement sur le manège sont présentées sur la figure 6a.

Les charges retenues représentent des charges roulantes, réelles, légales, autorisées, d'un demi-essieu de poids lourds.

Elles correspondent à :

- > 42,5 kN pour la roue simple large,
- > 65 kN pour le jumelage type,
- > 85 kN pour l'essieu tandem.

Dans le cas de l'essieu tandem, les deux roues simples larges sont espacées de 1,40 m et leurs caractéristiques mécaniques sont équivalentes à celle de la roue simple large précisée ci-avant.

La pression de gonflage des pneumatiques est identique pour les deux types de roues (simple ou jumelage), soit 0,85 MPa. Cela conduit à des aires de contact de 636 et 567 cm et des pressions de contact de 0,67 à 0,57 MPa pour la roue simple et le jumelage. L'étude d'une suppression de gonflage en 1996 s'est faite avec une majoration de 30 %, soit 1,10 MPa de pression de gonflage, valeur maximale pour éviter une destruction prématurée par éclatement du pneumatique.

La vitesse choisie a été de 6,5 tr/min. C'est la vitesse minimale de rotation autorisant une translation latérale des charges, pour simuler la réalité. La largeur de la trace était de 0,75 m pour la roue simple large et de 1 m pour le jumelage.

Selon les différents rayons de circulation (entre 15,50 et 19,50 m), la vitesse tangentielle varie de 38 à 48 kilomètres par heure.

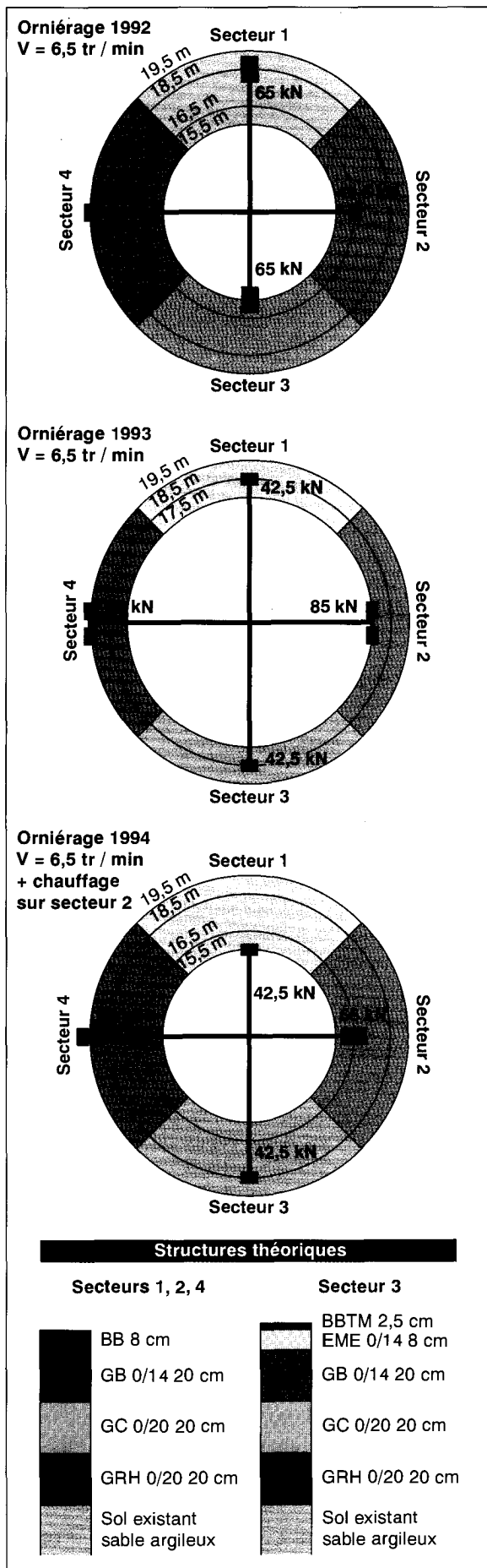


Fig. 8 - Description des structures sur le manège d'essai.

Un essai avec canalisation des charges et réduction de la vitesse à 3 tr/min, soit une vitesse tangentielle de 20 km/h au rayon de 17,50 m, a été entrepris après 200 000 passages en 1992. L'objectif était d'augmenter l'agressivité de la charge pour pouvoir compenser des températures ambiantes un peu faibles. 50 000 chargements ont été effectués dans ces conditions, mais aucune déformation complémentaire n'a été enregistrée. La température moyenne dans l'enrobé à - 1 cm de la surface était de 24 °C, valeur insuffisante pour déclencher de l'orniérage.

Le tableau VI rappelle dans le détail les nombres de chargements effectués.

La comparaison des trois expérimentations se fera sur les 100 000 premiers chargements. Lors des expérimentations de 1992 et 1993, on avait obtenu 80 à 90 % de l'ornière finale à ce stade.

Températures pendant les expérimentations

Des sondes disposées à différentes profondeurs dans les couches bitumineuses permettaient de suivre l'évolution de la température ainsi que les gradients thermiques.

Les rotations ont été effectuées en été durant les mois de juillet à septembre, lorsque la température de surface dans les enrobés (valeur correspondant à la sonde du secteur I à - 1 cm de la surface) était en général supérieure à 30 °C. Cela correspondait à des périodes de rotation comprises entre 10h et 22h.

TABLEAU VI
Nombre de chargements effectués à 6,5 tr/min

Année	Chargements	Période de rotation
1992	200 000	du 29 juin au 10 septembre
1993	200 000	du 15 juin au 20 août
1994	100 000	du 1er août au 7 octobre

Température de l'enrobé de référence (-1 cm)

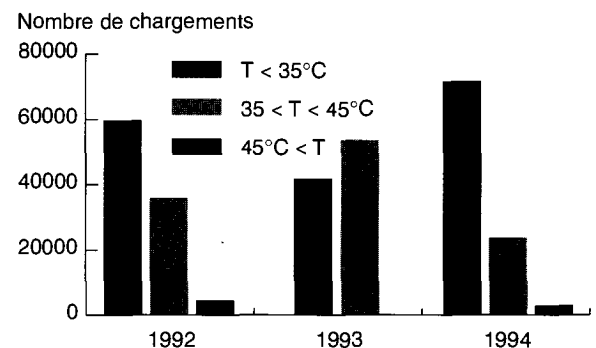


Fig. 9 - Nombre de chargements par tranche de températures des expérimentations de 1992, 1993 et 1994.

Les figures 9 et 10a, 10b et 10c indiquent les températures de surface dans l'enrobé de référence aussi bien dans la chronologie, qu'en intensité et dans la durée. On remarquera que les étés ne sont pas comparables. L'été 1993 est le moins chaud, avec une température maximale dans l'enrobé n'atteignant pas 45 °C. La température est par contre assez régulière durant toute la durée de l'essai. Les étés 1992 et 1994 sont plus chauds, avec des pointes de chaleur assez comparables. La valeur maximale atteint, à deux ou trois reprises, les 53 à 55 °C. Une différence importante est à signaler, dans l'apparition des pointes de températures :

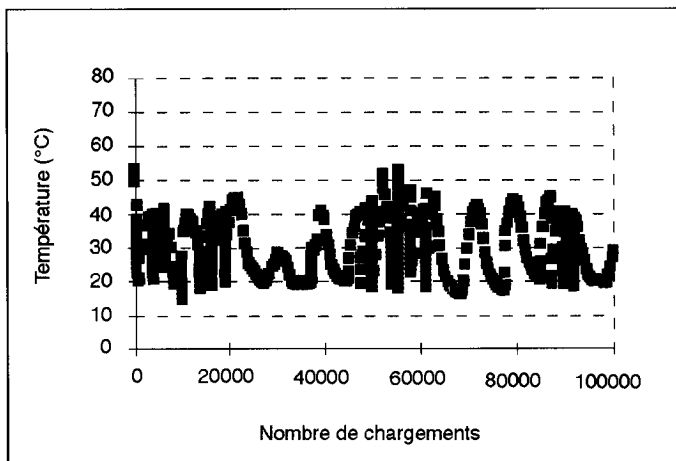
- pour l'été 1992, les maxima sont enregistrés vers 20 000 chargements, puis entre 45 000 et 65 000 chargements,
- pour l'été de 1994, les périodes les plus chaudes se concentrent au tout début de l'expérimentation, avant les 10 000 premiers chargements.

Ces différences sont, bien entendu, à l'origine des variations d'évolution des ornières constatées durant les expérimentations, mais il est difficile d'évaluer précisément l'effet de l'histoire thermique sur les matériaux sans modèle thermo-mécanique.

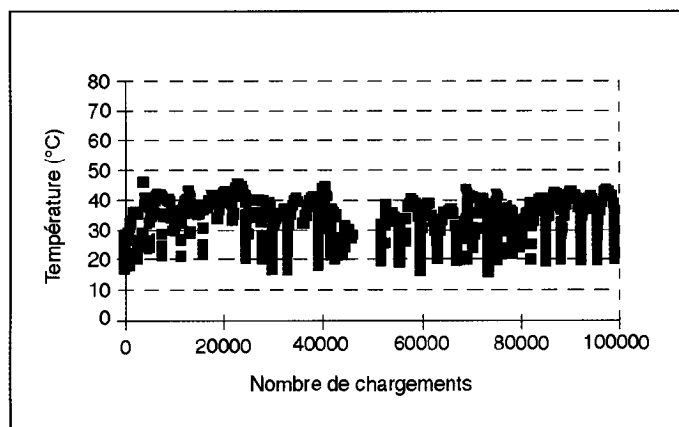
La figure 11 présente pour le secteur de l'enrobé de référence les variations d'ornièrre correspondant aux trois expérimentations.

Comparaison du comportement des matériaux sur le manège

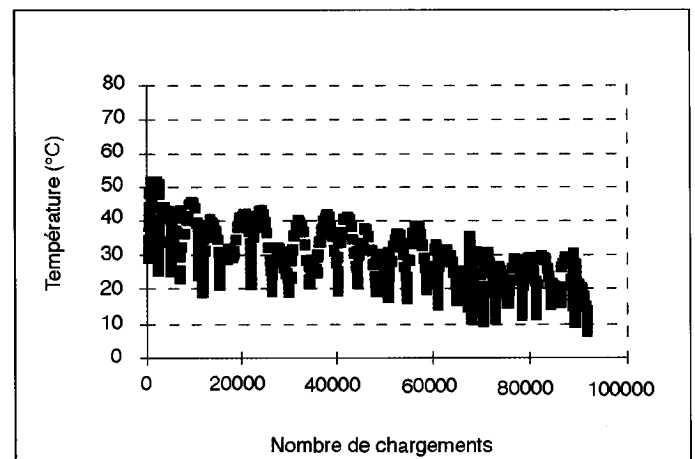
L'ornièrre mesurée sur le rayon d'un secteur correspond à la valeur moyenne des maxima de déformations relevés, sur cinq profils en travers, au moyen d'un transversoprofilographe mécanique. La précision de cette mesure est de l'ordre du millimètre.



a. Été 1992.



b. Été 1993.



c. Été 1994.

Figure 10 - Répartition des températures dans les enrobés (- 1 cm de la surface), durant les trois expérimentations

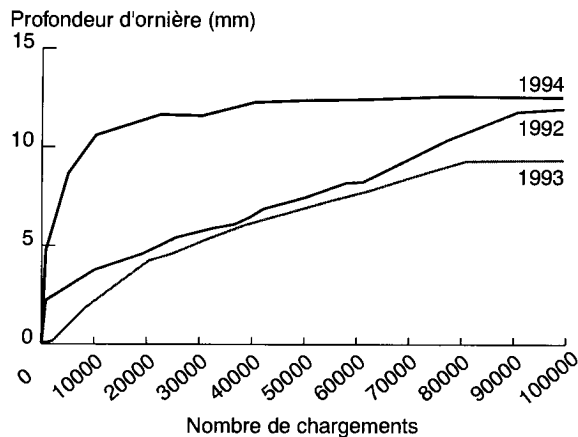


Fig. 11 - Évolution des ornières sous une roue simple large ($V = 40,4 \text{ km/h}$) sur le secteur I, enrobé de référence, durant les trois expérimentations.

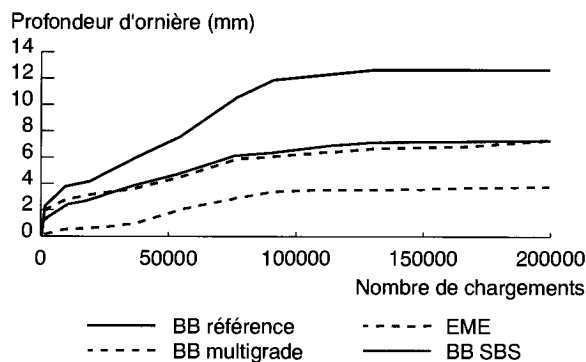


Fig. 12 - Évolution des ornières sous une roue simple large ($F = 42,5 \text{ kN}$, $V = 40 \text{ km/h}$), expérimentation de 1992.



Fig. 13 - Évolution d'ornièrre sous une roue simple large.

La figure 12 donne, à titre d'exemple, une illustration de l'évolution de la profondeur d'ornièrre mesurée au rayon de 16,50 m pour les quatre secteurs de l'expérimentation de 1992. On notera des différences assez significatives dans le comportement des matériaux, tant en vitesse d'évolution qu'en intensité. La figure 13 montre l'ornièrre

obtenue sur l'enrobé de référence sous la roue simple large. D'une manière assez générale, pour les trois expérimentations, les courbes d'évolution des ornières montrent une stabilisation. On peut expliquer en partie cela par l'action conjuguée d'un gain en stabilité de l'enrobé et surtout des températures plus faibles en fin d'expérimentation. Cependant, on constatera que, pour 1994, l'effet du chauffage d'un des secteurs n'a pas contribué à accroître les déformations en fin d'essai, alors que les températures étaient encore bien supérieures à celles ayant déclenché l'ornièrage sur le secteur non chauffé. Ceci confirmerait, tout au moins dans les conditions de sollicitations du manège, qu'après un certain nombre de chargement les enrobés tendent vers une certaine stabilité par réarrangement granulaire.

Pour comparer le comportement des différents enrobés par rapport à l'enrobé de référence, il faut que :

- les profondeurs d'ornièrre soient suffisamment importantes pour avoir des écarts significatifs. Le classement sera donc établi après 100 000 chargements ;
- les vitesses de rotation soient les mêmes, pour se ramener à un même rayon moyen de trajectoire. Le calcul des déformations sera donc fait par interpolation ;
- l'enrobé de référence ait le même comportement en ornièrage pour toutes les expérimentations (hypothèse basée sur le critère de déformabilité à l'ornièreur LPC). Ainsi, pour les mêmes modalités d'essai, les écarts de comportement entre expérimentations sont dues essentiellement aux variations climatiques.

Les résultats des profondeurs d'ornièrre sont rassemblés dans les tableaux VII et VIII. Les rapports de la profondeur d'ornièrre à la déformation de l'enrobé de référence sont donnés dans les tableaux IX et X. Il est difficile d'établir une même classification selon le degré de sensibilité à l'ornièrage des enrobés testés au cours des trois expérimentations, dans la mesure où les conditions climatiques ont été trop différentes. En effet, la température « critique » déclenchant le phénomène d'ornièrage n'a pas été atteinte pour tous les matériaux, notamment en 1993 où la température a rarement dépassé $45 \text{ }^\circ\text{C}$ dans les enrobés. De plus, il existe aussi des différences dans les modes de sollicitation.

Une évaluation quantitative du degré d'amélioration de la résistance à l'ornièrage peut être cependant faite au travers du rapport de la déformation de l'enrobé testé à la déformation de l'enrobé de référence. Compte tenu des nombreuses hypothèses présentées ci-avant, ce rapport n'est qu'un simple indicateur.

TABLEAU VII
Profondeurs d'ornièrre (mm), obtenues après
100 000 chargements, sous une roue simple large
(F = 42,5 kN, V = 45 km/h)

Enrobé	1992	1993	1994
Référence 50/70	10	4,9	9,5
Multigrade	5	2,8	
SBS	6,3		
EVA		1,4	
Câbles			2,3
EME 10/20	3,6	2,1	4,4

TABLEAU VIII
Profondeurs d'ornièrre (mm), obtenues
après 100 000 chargements, sous un jumelage
(F = 65 kN, V = 40 km/h)

Enrobé	1992	1993	1994
Référence 50/70	8,7		9,6
Multigrade	4,8		
SBS	5,7		
EVA			
Câbles			2,5
EME 10/20	3,8		3,5

TABLEAU IX
Rapport entre la profondeur d'ornièrre relevée
sur chaque matériau et la profondeur d'ornièrre
relevée sur l'enrobé de référence, après
100 000 chargements, sous une roue simple large
(F = 42,5 kN, V = 45 km/h)

Enrobé	1992	1993	1994
Référence 50/70	1	1	1
Multigrade	0,5	0,57	
SBS	0,63		
EVA		0,28	
Câbles			0,24
EME 10/20	0,36	0,42	0,46

TABLEAU X
Rapport entre la profondeur d'ornièrre relevée
sur chaque matériau et la profondeur d'ornièrre
relevée sur l'enrobé de référence, après
100 000 chargements, sous un jumelage type
(F = 65 kN, V = 40 km/h)

Enrobé	1992	1994
Référence 50/70	1	1
Multigrade	0,55	
SBS	0,65	
EVA		
Câbles		0,26
EME 10/20	0,43	0,36

Bilan de comportement

Par rapport à l'enrobé de référence, tous les procédés testés améliorent très nettement la résistance à l'ornièrage. Leur efficacité est cependant différenciée. Les meilleurs résultats sont obtenus avec le complexe EME et BBTM, et ce quelles que soient l'origine du liant dur et la formulation du BBTM choisie par l'entreprise. De plus, ce complexe permet de maintenir, comme l'indique le tableau XI, une bonne macrotecture de la couche de roulement.

TABLEAU XI
Évolution de la macrorugosité mesurée
au minitexture-mètre,
sur les chaussées du manège, en 1992

Rugosité valeur SMTD				
Secteur	Enrobé	Nombre de chargements		
		0	50 000	20 000
I	Référence	0,45	0,38	0,32
II	Multigrade	0,40	0,35	0,39
III	EME + BBTM	0,70	0,60	0,55
IV	Modifié SBS	0,58	0,36	0,35

Comparaison entre les résultats des essais de laboratoire et l'expérience manège

D'une manière générale, pour tous les liants purs ou spéciaux (multigrade), il existe une très bonne correspondance entre le classement obtenu en laboratoire par l'essai à l'ornièreur LPC (après 30 000 cycles - nombre retenu dans les normes sur les enrobés de couche de roulement) et le classement déduit des déformations en place sur le manège. Pour les enrobés à base de liant modifié par des polymères SBS et surtout EVA, on note quelque divergence dans le classement des matériaux en laboratoire (à 30 000 cycles) et le manège. Ceci s'explique par l'évolution très irrégulière de l'ornièrre produite en laboratoire avec ces matériaux (cf. « Les matériaux testés »). En revanche, si l'on se réfère au classement des déformations de tous les matériaux testés, après les 3 000 premiers cycles à l'ornièreur LPC, on constate que celui-ci est conforme au classement du manège après 100 000 chargements.

Sollicitations mécaniques

Facteurs d'influence sur l'ornièrage

Influence de la vitesse de chargement

Pour l'essentiel des mesures, si l'on considère les essieux de même configuration, la profondeur d'ornièrre est toujours plus grande sur la trajectoire du plus petit rayon. Le tableau XII indique les écarts de déformations pour des vitesses de chargement sous l'effet de la roue simple large et du jumelage, pour le béton bitumineux de référence.

TABLEAU XII
Profondeurs d'ornièrre (mm), obtenues
après 100 000 chargements, sur le béton
bitumineux de référence pour des vitesses
et des trains de roulement différents

Train de roulement	Roue simple large			Jumelage	
Vitesse (km/h)	47,7	42,9	40,4	47,7	40,4
1992	9,1		12	5,8	8,7
1993	4,5	7			
1994	8		12,5	7,1	9,6

Ces écarts constatés pourraient résulter d'une combinaison des effets de la vitesse et d'un possible envirage des roues.

Cette tendance est aussi constatée sur les autres matériaux, sans qu'il soit possible de quantifier de façon significative la réduction d'ornièrre. En effet, la précision de la mesure devient insuffisante par rapport aux faibles écarts observés, sur des déformations de faible intensité (2 à 4 millimètres).

Influence du train de roulement

Une comparaison des déformations relevées sous l'effet de la roue simple large isolée, du jumelage type et d'un tandem à roue simple large est présentée dans le tableau XIII. L'ornièrre est ramenée au rayon de 18,50 m (45 kilomètres par heure).

TABLEAU XIII
Profondeurs d'ornièrre (mm), obtenues après
100 000 chargements, sur l'enrobé de référence
pour différents trains de roulement à 45 km/h

Expérimentation	Roue simple large	Jumelage type	Tandem à roues simples larges
1992	10	6,8	
1993	4,9		5,8
1994	9,5	8	



Fig. 14 - Ornièrre sous un jumelage type.

Comparaison : roue simple large/jumelage

La roue simple large est toujours plus agressive que le jumelage pour des pressions moyennes de contact différentes (respectivement, 0,67 et 0,57 MPa). On note des différences assez importantes dans l'augmentation des déformations entre les expérimentations de 1992 et 1994 : de 20 à 40 % d'accroissement des déformations sur l'enrobé de référence pour une vitesse de 45 km/h. La position des charges roue simple/jumelage a été inversée, la roue simple se positionne sur le plus petit rayon en 1994. Cette agressivité plus forte est également confirmée pour les autres enrobés testés. Il semblerait que cette agressivité relative soit d'autant plus faible que le matériau résiste bien à l'ornièrage. Ceci est toujours à moduler par le fait que les déformations permanentes restent faibles.

La figure 14 montre un exemple d'ornièrre sous l'action du jumelage type, sur l'enrobé de référence.

Comparaison : tandem/roue isolée

La comparaison porte sur le même nombre de chargements en un même point, la différence provenant du temps écoulé entre deux chargements. Pour le tandem où les roues sont espacées de 1,40 m, le temps entre deux charges est de 0,1s pour une vitesse de 45 km/h, alors qu'il est de 4,6 s pour deux roues isolées, diamétralement opposées.

Il est difficile de conclure à une différence significative entre ces deux types de chargement. La différence mesurée sur l'enrobé témoin est inférieure au millimètre (précision de la mesure de déformation). Pour les autres matériaux, les tendances sont encore nettement moins marquées puisque les écarts ne sont que de 0,2 à 0,6 mm. La différence de temps de repos entre deux répétitions ne serait pas suffisante pour induire des comportements différents, tout au moins dans les conditions de l'essai. On rappellera que les températures n'étaient pas très favorables au phénomène d'ornièrage : les déformations maximales sont restées inférieures à 7 mm (rayon : 17,50 m enrobé de référence).

Effet de la température **Étude d'un dispositif** **de chauffage d'un secteur**

Influence de la température sur l'ornièrage

La température est bien connue pour être un des facteurs prépondérants dans le mécanisme d'ornièrage des enrobés.

Lors de la deuxième phase (en septembre) de l'expérimentation de 1992, il a été vérifié que si

la température dans les enrobés n'atteint pas un niveau suffisant, aucune déformation ne peut être produite.

De même, on a observé, au cours de chaque expérimentation, que les périodes les plus chaudes, où la température en surface de l'enrobé dépassait 50 °C, correspondaient aux vitesses de déformation les plus fortes. Il a été mis en évidence un phénomène de seuil de température, se situant aux alentours de 40 à 45 °C, au-dessus duquel l'enrobé de référence présente une certaine susceptibilité à l'orniérage. En dessous de ce seuil, les déformations sont très faibles, voire nulles. On constate un phénomène analogue pour l'évolution des déformations avec les autres enrobés testés. Ce seuil de température est à rapprocher de la valeur de la TBA du liant de l'enrobé de référence.

L'histoire thermique joue un rôle important dans les courbes d'évolution d'ornière. Si l'on compare les courbes d'orniérage sur le manège de 1994 et 1992, on constate que 50 et 90 % de la déformation finale à 100 000 chargements est atteinte après seulement 1 000 et 10 000 chargements en 1994, au lieu de 35 000 et 80 000 chargements en 1992. Ceci s'explique par une période chaude survenue en début d'essai en 1994. On notera également que les déformations finales de 1994 et 1992 sont assez comparables (14 à 15 mm au rayon intérieur).

Durant l'expérimentation de 1993, les conditions climatiques se sont révélées peu favorables pour une étude d'orniérage sur le manège. Les températures dans les enrobés ont plafonné au seuil de température déclenchant l'orniérage, précisé ci-avant. Les déformations sont, par conséquent, restées assez faibles (autour de 7 millimètres).

Pour agir indirectement sur les conditions climatiques et accroître les déformations permanentes des enrobés sous le climat de Nantes, l'idée a été de chauffer la bande intérieure d'un secteur sur une largeur de l'ordre d'un mètre. Une étude théorique, menée par le Laboratoire de thermique du bâtiment de l'INSA de Lyon, a débouché sur la définition d'un dispositif de chauffage en 1994.

Dispositif de chauffage Caractéristiques

Le système de chauffage devrait permettre une élévation de l'ordre de 10 °C de la température par rapport au matériau non chauffé.

L'étude préalable avait montré que, pour satisfaire cette exigence, un flux de chaleur de 500 W/m était nécessaire.

L'installation de chauffage se compose de trente-six projecteurs tungstène-halogène de 1 000 W de puissance unitaire, distants chacun de 0,65 m. Ceux-ci sont installés en bordure intérieure de l'anneau à une distance de 0,50 m de la surface de balayage. La hauteur des panneaux radiants est de 1,05 m par rapport au sol.

La puissance installée correspond à un peu plus de 2 kW/m, ceci pour des vitesses limitées à 40 kilomètres par heure.

Le dispositif de réchauffage est présenté sur la figure 7.

Le système est implanté sur le secteur II, d'une longueur de 25 m. La couche de roulement de ce secteur est constituée de l'enrobé de référence.

Résultats : efficacité et limite d'emploi du système de chauffage

L'exploitation des sondes de température dans les enrobés chauffés et non chauffés montre que :

- l'objectif fixé d'augmenter de 10 °C environ la température naturelle d'une bande de 0,70 m de large, parcourue par une roue à la vitesse de 38 km/h, est atteint dans certaines conditions de température ;
- la zone d'action du chauffage reste limitée en profondeur à quelques centimètres (5 à 6 cm), et en largeur à une bande d'environ un mètre ;
- la température obtenue avec chauffage dépend des conditions ambiantes. Dans la gamme des températures de rotation (supérieure à 30 °C dans les enrobés) pour étudier l'orniérage, le dispositif est très efficace (10 à 14 °C d'augmentation de la température). En revanche, il ne peut pas compenser de mauvaises conditions climatiques ambiantes. En effet, si la température des enrobés n'est que de 20 °C, l'augmentation de température reste limitée à quelques degrés, ce qui est bien entendu insuffisant pour déclencher de l'orniérage ;
- le système de chauffage ne permet pas de réguler une température constante dans l'enrobé du secteur chauffé.

La figure 15 montre l'efficacité du système de chauffage par rapport au secteur non chauffé. On observe bien un décalage moyen des courbes de températures de 10 °C.

L'effet de la température sur l'orniérage est très bien mis en évidence par la comparaison des ornières des secteurs I et II.

Une augmentation d'une dizaine de degrés en surface de l'enrobé fait pratiquement doubler l'orniérage moyen par rapport au secteur non chauffé (25 mm après 100 000 chargements). La forme de l'ornière est comparable à celle observée sur chaussée réelle avec formation d'un bourrelet latéral.

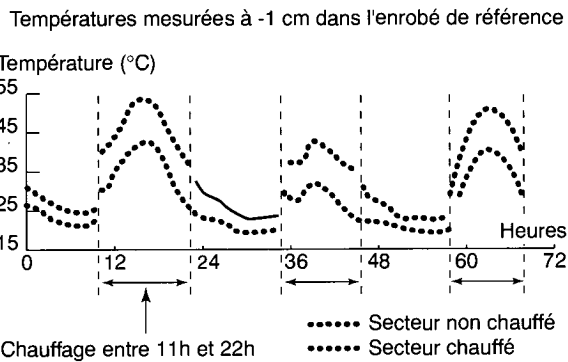


Fig. 15 - Comparaison entre structure chauffée et structure non chauffée, expérimentation de 1994.

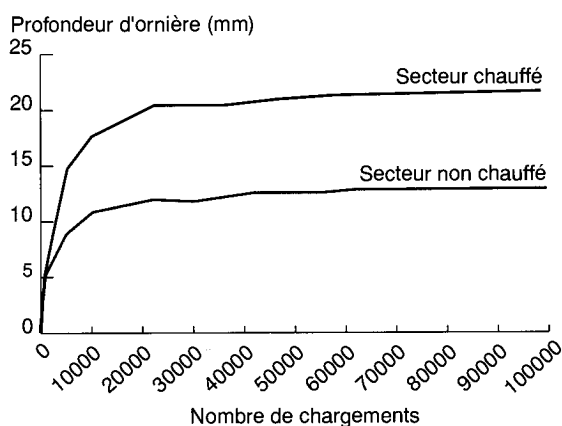


Fig. 16 - Évolution des ornières sous une roue simple large ($V = 40,4 \text{ km/h}$), sur l'enrobé de référence en 1994, secteur chauffé et secteur non chauffé.

Les courbes d'évolution d'ornièrre sur le manège, ramenées au rayon de 16,50 m pour la roue simple large isolée de l'enrobé de référence, permettent une comparaison des conditions climatiques rencontrées lors des différentes expérimentations et sur le secteur chauffé (fig. 16).

On constate que les courbes d'ornièrre suivent bien les pics de températures (fig. 17), mais que celles-ci plafonnent au-delà d'un nombre de chargements et/ou d'un niveau de déformation donnée et ce même sur le secteur chauffé, où en fin d'essai, les températures sont encore supérieures à 55 °C.

Conclusion

Ces expérimentations associent des essais en vraie grandeur sur le manège d'essai du LCPC et des essais de caractérisation en laboratoire sur les constituants et les enrobés. Elles permettent de tirer des enseignements sur :

- la sélectivité et la pertinence des essais à l'ornièrreur LPC pour prévoir le comportement des matériaux sur site,
- l'importance de la formulation des matériaux sur la résistance à l'ornièrage,
- les facteurs d'influence des conditions de sollicitations mécaniques et thermiques agissant sur les mécanismes d'ornièrage.

Les principaux résultats sont les suivants.

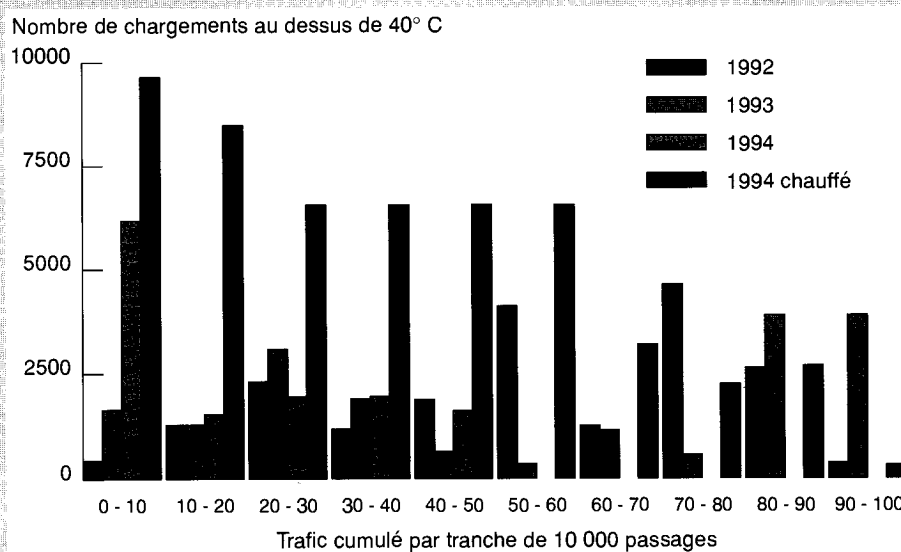


Fig. 17 - Nombre de chargements effectués à une température supérieure à 40 °C dans l'enrobé de référence, en surface (-1 cm), par tranche de 10 000 passages

Résultats issus des expérimentations sur le manège

Comportement des matériaux

Les profils d'orniérage obtenus sur le manège apparaissent tout à fait réalistes.

L'emploi de bitume dur (10/20), de liant spécial (multigrade), de bitume modifié par polymères SBS ou EVA et de déchets de câbles introduit dans le malaxeur améliore la résistance à l'orniérage d'un enrobé au squelette minéral instable. Une différenciation du comportement à l'orniérage selon la nature du liant peut être établie pour chacune des expérimentations.

Le complexe EME + BBTM constitue une solution efficace pour maintenir de très bonnes caractéristiques de surface (profil transversal et forte texture).

Conditions de chargement

L'agressivité des essieux à roues simples larges est plus importante que celle due au jumelage, pour les conditions de charge étudiées. Cet effet dépend également de la nature de l'enrobé, et plus cet enrobé est sensible à l'orniérage, plus l'effet semble prononcé. À titre indicatif, l'ordre de grandeur de l'augmentation de l'ornière est de 20 à 40 % sur l'enrobé de référence lorsque l'on passe du jumelage type à la roue simple large.

L'effet relatif d'un essieu tandem à roue simple large n'apparaît pas significatif par rapport à deux roues simples larges isolées. Mais cette observation s'est faite par des températures d'essai assez faibles, et donc peu favorables pour révéler des comportements différents à l'orniérage.

Conditions de température

Si besoin en était, le système de chauffage, dont l'efficacité a été démontrée, et l'expérimentation de 1993, où les conditions de températures sont restées peu propices aux phénomènes d'orniérage, ont confirmé la très grande influence de la température sur l'orniérage. Avec les bitumes purs de grade 50/70, un effet de seuil critique de

la température, aux environs de 40 à 45 °C, a été mis en évidence pour le déclenchement des mécanismes d'orniérage, phénomène amplifié lorsque les températures sont voisines de 60 à 65 °C (la déformation est alors multipliée par deux).

Résultats issus des essais de laboratoire

Essais de laboratoire

L'orniéreur LPC a permis de formuler une grave-bitume non orniérante et un enrobé de référence présentant une sensibilité importante à l'orniérage. Un critère de déformabilité à cet essai a été fixé constant pour toutes les expérimentations. L'appréciation du comportement des enrobés modifiés ou spéciaux par l'orniéreur correspond très bien à celui observé sur le manège, lorsqu'on établit un classement des matériaux après les 3 000 premiers cycles.

Les essais de module complexe sur les liants et sur les enrobés s'avèrent très utiles pour expliquer les différences de comportement à l'orniérage.

Formulation des enrobés

L'importance du mode d'élaboration du sable et de son dosage sont considérables sur la résistance à l'orniérage. L'usage d'un sable obtenu par broyage, au dosage élevé, de plus de 30 %, confère à l'enrobé une mauvaise tenue à l'orniérage.

Il a été mis en évidence, tant sur le manège qu'en laboratoire, l'effet très important de la nature du liant sur l'amélioration de la résistance à l'orniérage d'une composition granulaire volontairement instable.

L'exploitation des résultats de ces expérimentations se poursuit dans le cadre d'un thème de recherche sur l'orniérage des enrobés, dont les objectifs sont de mieux comprendre les phénomènes d'orniérage et de trouver des modèles de calcul prédictif prenant en compte les principaux facteurs d'influence (matériaux, température, charge) dans la perspective de définir des spécifications performancielles adaptées aux conditions de chaque site.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CORTÉ J.-C., BROUSSEAUD Y., KERZREHO J.-P., SPERNOL A. (1997), *Study of rutting of wearing course on the LCPC test track*, 8th International Conference on Asphalt Pavement, Seattle, USA, août 1997, article 191.
- [2] BROUSSEAUD Y., DELORME J.-L., HIERNAUX R. (1993), *Study of deformations in asphalt with the help of the LCPC wheel tracking rutting tester. Evaluation and future prospects*, TRB 1993.
- [3] CORTÉ J.-C., BROUSSEAUD Y., SIMONCELLI J.-P., CAROFF G. (1994), *Investigation of rutting of asphalt surface layers : Influence of binder and of configuration of axle loading*, TRB 1994.
- [4] GRAMMSAMMER J.-C. (1991), Le manège du LCPC et la recherche, *Revue générale des routes et aérodromes*, juin.
- [5] AUTRET P., BAUCHERON DE BOISSOUY A., GRAMMSAMMER A. (1988), Le manège de fatigue. Premiers résultats, Ann Arbor 1987-1988, *Bulletin de Liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 155, mai-juin, pp. 33-56.

ABSTRACT

A study of rutting in wearing courses on the LCPC circular fatigue test track

J.-F. CORTE, Y. BROSSEAUD, J.-P. KERZREHO, A. SPERNOL

In recent years several trials to investigate the rutting of bituminous mixtures used in surfaces have been carried out at the LCPC circular fatigue test track in Nantes. The aim of these studies is to assess, with reference to a straight bitumen 50/70 the granular skeleton of which has been made unstable by the use of crushed sand, how polymer-modified binders, special binders, hard bitumens and additives improve rutting resistance. At the same time the influence of loading conditions, such as speed and load configuration (single wide wheel or twin wheel assemblies) was examined. A heating device was also evaluated. The paper presents the results from the first three trials. It compares the results of characterization tests on the binders and bituminous mixtures using various laboratory tests with the deformations measured on the fatigue test track and attempts to relate the two.