

La moquette en BHP

Vers un nouveau concept de couche de roulement

François de LARRARD
Docteur ENPC

Chef de la division Méthodes et matériels de construction
et d'entretien des routes
Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Note
technique

Introduction

En technique routière, trois grandes familles de matériaux sont utilisées, toutes à base de granulats : les matériaux non liés, ceux traités aux liants hydrocarbonés, et enfin ceux traités aux liants hydrauliques. En ce qui concerne la dernière famille, on constate depuis une décennie une perte de parts de marché, et un manque d'innovations en termes de nature des matériaux, les deux phénomènes étant en partie liés. Pourtant, dans les vingt dernières années, on a pu assister à des progrès significatifs dans les mélanges à base de ciment, dus notamment à l'élargissement de la panoplie des constituants. Parmi ceux-ci, les superplastifiants permettent de fabriquer industriellement toute une gamme de matériaux à forte compacité, qui présentent des propriétés mécaniques et de durabilité très supérieures à celles des bétons classiques. Ces bétons à hautes performances (BHP) ne sont pas encore arrivés dans la route, sauf pour quelques applications limitées, notamment dans les pays où l'usage généralisé des pneus cloutés entraîne une forte agression des revêtements routiers. Dans ce cas, il apparaît que la résistance de la couche à l'abrasion est à peu près proportionnelle à sa résistance en compression [1], ce qui justifie le recours aux bétons à haute résistance mécanique. Avec le concept proposé dans cette note, on tente d'insérer cette famille de matériaux dans le paysage routier français, en tenant compte des caractéristiques du matériau et des exigences de la chaussée.

Optimiser l'emploi du ciment dans la route

Dans cette partie, on montre comment le BHP trouve naturellement sa place dans le haut de la structure de la chaussée.

Conception

La conception d'une chaussée revient à choisir des matériaux et des épaisseurs de couche compatibles avec le comportement du support, les charges de circulation, l'environnement climatique et les contraintes économiques. Si l'on se restreint aux matériaux hydrauliques, on est en face d'une gamme de matériaux, qui va des graves non traitées jusqu'aux BHP, et que l'on pourrait paramétrer par la teneur en ciment, par le coût unitaire, par le module élastique ou encore par la résistance en traction (fig. 1). Or, dans la gamme des matériaux comportant effectivement du ciment, le module élastique n'augmente que lentement avec le dosage ; en d'autres termes, le rendement marginal du ciment est le meilleur lors du passage des graves non traitées aux graves traitées. Ainsi, une grave-ciment dosée à 80/100 kg/m³ a un module de 23 GPa (valeur de calcul [2]), alors que celui d'un BHP dosé à 450 kg/m³ ne dépasse pas 40 à 50 GPa. C'est pourquoi, si l'on cherche à minimiser le coût d'une couche unique de matériaux devant résister aux efforts de flexion, on est conduit à viser une structure relativement épaisse de matériau de faibles caractéristiques, plutôt qu'une couche mince

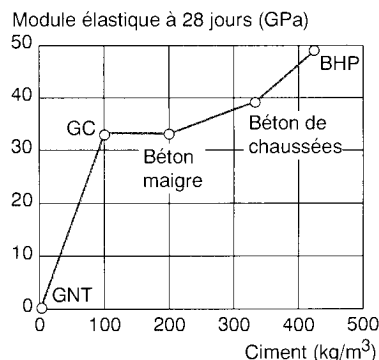


Fig. 1 - comparaison de la consommation en ciment des différents matériaux au regard de leur module élastique (simulations BETONLAB.PRO [8]). (GNT : grave non traitée ; GC : grave-ciment).

de matériau plus noble. C'est ce qui fait l'intérêt économique des chaussées dites semi-rigides.

Cependant, en plus des efforts structurels de flexion, une chaussée est également soumise aux agressions locales dues à la circulation. Au niveau de sa surface supérieure, il faut donc placer une couche de matériau présentant une résistance à l'abrasion et une adhérence avec les pneumatiques suffisantes. Cette couche, sous réserve d'accepter les déformations d'ensemble de la structure, n'a aucun besoin d'être épaisse. On voit donc qu'une analyse rationnelle conduit, par rapport à la structure d'une chaussée béton classique, à faire « migrer » une partie du ciment vers le haut, et à utiliser les extrêmes de la gamme des matériaux hydrauliques, plutôt que des bétons de caractéristiques médiocres (béton maigre) ou moyennes (bétons de couches de roulement classiques).

Du fait de leur faible déformabilité en traction, et de leur inévitable retrait thermique, les matériaux hydrauliques présentent, par temps froid, une fissuration systématique, éventuellement amplifiée par le retrait hydraulique. On peut, face à ce phénomène, prévoir d'emblée une couche de roulement sous forme de dalles séparées par des joints. Bien que cette technique, notamment lorsqu'elle s'accompagne d'un goujonnage, permette de réaliser des structures très durables,

son inconfort relatif la rend impopulaire, notamment dans le contexte français. De plus, si l'on choisit de réaliser une structure en graves traitées, il importe de limiter au maximum les infiltrations d'eau, qui ne manqueraient pas de provoquer des phénomènes de pompage et d'érosion. Enfin, l'utilisation d'une armature continue correctement dimensionnée peut conférer à la couche supérieure une ductilité la rendant apte à s'adapter à des déformations du support. C'est pourquoi, à ce stade du raisonnement, la technique du béton armé continu paraît s'imposer pour la couche de roulement en BHP, au moins dans le contexte du marché national.

Enfin, alors que l'adhérence entre une couche de roulement en béton et un substratum bitumineux peut s'avérer intéressante économiquement [3], car permettant de limiter les épaisseurs des deux couches, il faut au contraire éviter cette adhérence dans le cas présent. En effet, c'est le moyen de réduire au maximum la quantité d'armatures de béton armé, dont le rôle de couture de fissures se limitera à la couche supérieure. Par contre, le choix d'utiliser une couche mince de béton armé conduit à concevoir ce dernier comme une dalle de béton armé classique, et non comme une dalle non armée - ce qui reste le principe de base dans les méthodes actuelles de dimensionnement du béton armé continu de chaussée [2]. Les charges de circulation seront capables de fissurer le matériau, l'armature reprenant alors les efforts de traction correspondants. On doit donc renforcer la couche dans les deux sens, en s'assurant que la quantité d'acier est suffisante pour reprendre les efforts de fissuration, selon la notion d'armature minimale de non-fragilité [4].

Prédimensionnement

Pour ce qui concerne la couche de roulement, l'épaisseur minimale sera déterminée par les contraintes d'enrobage minimal des armatures (nécessaire à leur protection

vis-à-vis de la corrosion), par les capacités des matériels de mise en œuvre, et par des impératifs de tenue aux efforts de circulation. Vis-à-vis du premier critère, une épaisseur minimale de 2 cm est conforme aux exigences du règlement BAEL [5], ce qui, compte tenu des incertitudes sur le positionnement réel des armatures, conduit à choisir un enrobage nominal plus proche de 3 cm. En plaçant l'armature longitudinale dans le plan de symétrie, on arrive à une épaisseur de calcul de la couche de 6 cm. Celle-ci, combinée aux impératifs de limitation du bruit de roulement [6], conduit à choisir une taille maximale de granulats réduite, de l'ordre de 6 ou 8 mm. La résistance en compression du béton à viser n'est pas déterminée par les contraintes de compression en service, car la rigidité du support limite fortement leur valeur. Le critère déterminant est plutôt la prévention de la corrosion des armatures, obtenue grâce à la faible perméabilité du matériau, et au contrôle de l'ouverture des fissures. Une augmentation de résistance est favorable vis-à-vis de ces deux critères. À ce stade, on fixe la résistance caractéristique à une valeur de 80 MPa, seuil à partir duquel l'usage des entraîneurs d'air n'est, souvent, plus indispensable pour s'assurer de la résistance au gel.

Compte tenu de la nécessité d'armer la couche dans les sens longitudinaux et transversaux, et du faible diamètre des barres imposé par l'épaisseur de la couche, l'emploi du treillis soudé s'impose naturellement. Dans le sens longitudinal, la reprise des efforts de fissuration en traction simple impose un pourcentage d'armatures égal au rapport des résistances en traction du béton, et de l'acier, soit une valeur de 1,1 % (pour un acier E 500). Dans le sens transversal, la fissuration ne se produira qu'en flexion, sous l'effet des charges de circulation. Compte tenu du faible bras-de-levier des armatures, on adopte en première approximation un pourcentage d'armatures égal à la moitié de celui correspondant au sens longitudinal, soit 0,55 % de la section

de béton. Les sections étant dimensionnées, il apparaît intéressant de réduire le plus possible le diamètre des barres, de façon à maximiser l'adhérence acier-béton, d'où une réduction de l'ouverture des fissures et une amélioration de l'étanchéité de la couche. La limite à cette stratégie est constituée par l'espacement entre les barres, qui doit rester suffisant pour permettre une mise en place facile du béton. Des barres longitudinales de diamètre 8 mm espacées de 75 mm, et des barres transversales de diamètre 4,5 mm espacées de 50 mm conduisent à un treillis de dimensions « standard », conforme aux différentes exigences.

La structure de la chaussée en graves traitées, qui sera probablement construite en deux couches pour des raisons de limitation d'épaisseur compactable (32 cm dans le contexte actuel), est calculée selon les règles en vigueur [2]. On évalue le module équivalent de la couche de roulement à 17 GPa (compte tenu de la fissuration). Pour un trafic de niveau TC 7, une plate-forme de type PF3, et en considérant une voie dite du réseau structurant, l'adoption d'une moquette en BHP de 6 cm d'épaisseur conduirait à une structure en GC 3 de type 6BHP/26GC3/21GC3 (dimensionnement conduit selon la méthode française en ce qui concerne les couches de grave traitée) (fig. 2).

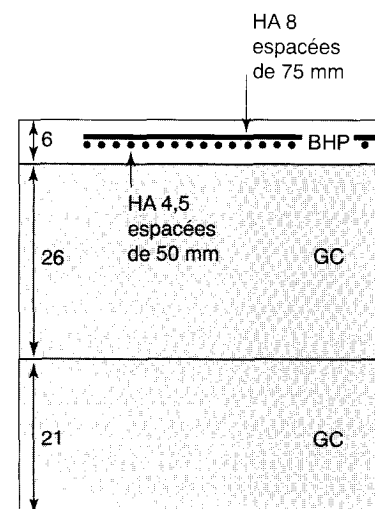


Fig. 2 - Structure proposée (coupe longitudinale).

Avant d'aborder les aspects économiques, on peut faire deux remarques sur la conception proposée :

- la structure de la chaussée pourrait tout aussi bien être réalisée en béton compacté, notamment dans les cas où le recours à ce matériau permettrait de réaliser l'assise en une seule couche ;
- le concept proposé ne doit pas être confondu avec la nouvelle technique de béton de ciment mince collé (BCMC), dans laquelle la couche de roulement en béton n'est pas armée, et adhère en principe à sa fondation bitumineuse.

Évaluation économique

On ne peut à ce stade évaluer finement les coûts liés à la fabrication et à la mise en œuvre de la couche de roulement en moquette BHP. Du fait de la nécessité de temps de malaxage prolongés pour les BHP, leur fabrication en centrales continues peut présenter des difficultés ; cependant, la faible épaisseur, et donc le moindre rendement nécessaire par rapport à celui d'un béton de chaussée conventionnel, peut conduire l'entreprise à faire appel à une centrale de béton prêt à l'emploi. La mise en œuvre peut se faire à la machine à coffrage glissant, à moins qu'un finisseur équipé d'un système de vibration de surface soit suffisant. Cependant, avec ce dernier matériel, la question du positionnement des armatures avant bétonnage se pose, le finisseur roulant sur la couche de base lors de la mise en œuvre de la couche de roulement.

On peut par contre évaluer la consommation de matériaux nobles par mètre carré, et la comparer à celle que l'on rencontre dans le cas d'une chaussée en béton traditionnelle, telle que proposée dans le nouveau catalogue des structures [7]. On a estimé la formulation du BHP sur la base du cahier des charges défini dans le tableau I. À l'aide du logiciel BETONLAB.PRO [8], on aboutit à la solution donnée dans le tableau II.

Le comparatif des dosages en ciment des différents matériaux hydrauliques apparaît alors dans le tableau III. Selon les matériaux considérés, on voit que le gain escompté avec la solution proposée est compris entre 34 et 70 %

(tableau IV), ce qui rend la solution attractive, eu égard aux orientations de la Direction des routes, appelant de ses vœux une réduction de 20 à 30 % du coût des infrastructures routières.

TABLEAU I
Cahier des charges du BHP de la couche de roulement

Propriété	Valeur
Affaissement au cône	entre 10 et 20 cm
Indice de serrage	inférieur ou égal à 7,5
Résistance en compression à 28 j	supérieure ou égale à 80 MPa
Retrait endogène	supérieur ou égal à $200 \cdot 10^{-6}$
Retrait total à 50 % d'humidité	supérieur ou égal à $600 \cdot 10^{-6}$

Le premier critère doit garantir un écoulement facile du béton, et une stabilité du matériau frais après serrage. Le deuxième correspond à une exigence de facilité de compactage. Le troisième permet en principe, sous réserve de vérification, d'obtenir un matériau résistant au gel-dégel, sans entraîneur d'air (adjuvant délicat à utiliser dans les bétons à hautes performances). Le quatrième correspond à l'exigence d'une fissuration relativement précoce, de façon à limiter la relaxation des contraintes dues au retrait. Enfin, le dernier critère va dans le sens de la conservation d'un état de traction longitudinale dans la moquette, même par temps chaud.

TABLEAU II
Formulation-type pour le BHP de la couche de roulement, calculée à l'aide du logiciel BETONLAB.PRO du LCPC [8].

Gravillon 2/6 pour couche de roulement (kg/m ³)	911
Sable silico-calcaire 0/4 (kg/m ³)	678
Ciment CPA CEM I (kg/m ³)	442
Filler calcaire (kg/m ³)	221
Fumée de silice (kg/m ³)	14
Superplastifiant (kg/m ³)	5,6
Eau (l/m ³)	171
Eau/ciment	0,39
Eau/(ciment + filler + FS)	0,25
G/S	1,34
Air occlus (%)	1,5
Densité	2,44
Seuil de cisaillement (Pa)	1 600
Viscosité plastique (Pa.s)	480
Slump (cm)	10
fc ₁ (MPa)	> 30
fc ₃ (MPa)	65
fc ₇ (MPa)	68
fc ₂₈ (MPa)	80
ft ₂₈ (MPa)	5,3
Ei ₂₈ (GPa)	44
Retrait endogène (10 ⁻⁶)	200
Retrait total (10 ⁻⁶)	700
Indice de serrage	7,5

L'emploi d'un filler calcaire a pour but d'augmenter le retrait total. Ce constituant pourrait être introduit par le biais de l'utilisation de sable concassé non défillerisé.

TABLEAU III
Dosage en ciment des différents mélanges

Matériaux	Grave-ciment	Béton maigre (BC2)	Béton de couche de roulement	BHP pour moquette
Teneur en ciment (kg/m ³)	80	220	330	440 (+ 15 FS) = 500 (★)

(★) En comptant la fumée de silice à raison de quatre fois sa masse d'équivalent-ciment, compte tenu de son prix élevé.

TABLEAU IV
quantités de matériaux « nobles » au mètre carré pour les deux solutions,
dans le cas d'une chaussée du réseau structurant sur plate-forme de type PF3 soumise à un trafic TC7.

Matériau	Solutions		
	BAC/BC2 [7]	Moquette BHP/GC3/GC3	Économie (%)
Gravillons pour couche de roulement	BAC : $0,19 \times 1\ 000 = 190 \text{ kg/m}^2$	BHP : $0,06 \times 910 = 54,6 \text{ kg/m}^2$	- 71
Ciment	BAC : $0,19 \times 330 = 62,7$ BC2 : $0,18 \times 220 = 39,6$ Total = $102,3 \text{ kg/m}^2$	BHP : $0,06 \times 500 (\star) = 30$ GC3 : $(0,26 + 0,21) \times 80 = 37,6$ Total = $67,6 \text{ kg/m}^2$	- 34
Acier	BAC : $0,008 (\star\star) \times 0,19 \times 7\ 850 = 11,9 \text{ kg/m}^2$	BHP : $0,0165 \times 0,06 \times 7\ 850 = 7,77 \text{ kg/m}^2$	- 35

(\star) En comptant la fumée de silice à raison de quatre fois sa masse équivalent-ciment, compte tenu de son prix élevé.
($\star\star$) En tenant compte des armatures transversales.

Problèmes techniques à résoudre

Il ne faut cependant pas perdre de vue que des questions techniques doivent être résolues avant de conclure à la faisabilité de la moquette en BHP.

Comportement à l'effort tranchant

Dans la conception classique des chaussées en béton, on s'arrange pour que les couches ne soient pas fissurées par la circulation des véhicules (ce qui conduit à limiter les contraintes de flexion en partie inférieure des couches). Ici, au contraire, on permet délibérément la fissuration, comptant essentiellement sur les couches inférieures pour assurer à la structure sa rigidité verticale. Or, le passage des essieux engendre dans la couche de roulement des contraintes de cisaillement. Au droit des fissures de retrait, ces contraintes seront reprises par un cumul de l'effet d'engrènement des granulats et de l'effet de goujon des armatures. En première analyse, un calcul pratiqué avec le logiciel ALIZÉ sur une structure constituée d'une moquette posée sur deux couches de grave-ciment de 20 cm d'épaisseur donne des valeurs de cisaillement au sein de la couche de BHP inférieures ou égales à 0,15 MPa (cf. annexe). Cette contrainte est très faible, si on la compare à la résistance en traction du

matériau (de l'ordre de 5 MPa). Même si l'on néglige complètement l'effet d'engrènement, le cisaillement moyen engendré dans les armatures est amplifié de façon inversement proportionnelle à leur pourcentage volumique, ce qui donne une valeur de 13,6 MPa, à comparer avec la limite élastique de l'acier, supérieure à 500 MPa. Ainsi, dans l'hypothèse d'une fondation intégrée, la tenue de la moquette à l'effort tranchant semble assuré, les contraintes appliquées restant très en dessous des limites d'endurance du matériau (au sens de sa résistance à la fatigue). L'impact d'une fissure de retrait thermique dans la fondation en grave traitée, et d'un éventuel phénomène de battement de dalle, est plus difficile à appréhender, et nécessitera des expérimentations spécifiques.

Prévention du glissement latéral de la couche de roulement

La couche de roulement étant, par sa conception, non adhérente à son support, on peut craindre *a priori* des déplacements horizontaux significatifs, sous l'effet des conditions climatiques ou sous celui de la circulation des véhicules (en particulier des poids lourds). Dans le sens longitudinal, il sera nécessaire de prévoir des joints lourds transversaux, selon la technologie classique du béton armé continu. Dans le sens

transversal, une engravure longitudinale dans l'axe de la route pourra s'avérer utile, notamment dans les courbes.

Prévention du flambement

Celui-ci pourrait se produire en cas de dilatation gênée de la couche de roulement, essentiellement par temps chaud. On propose de le prévenir en maintenant un certain niveau de traction dans la couche, grâce au retrait hydraulique. Par rapport aux bétons classiques, les BHP présentent un retrait endogène (en l'absence de séchage) plus important, généralement suffisant pour provoquer leur fissuration lorsque la déformation est gênée [9]. On peut donc penser que la moquette sera spontanément fissurée, quelques semaines après sa construction. Ensuite, le retrait hydraulique continuera à s'établir, pour atteindre une valeur limite dépendant de l'humidité moyenne et de la formulation du matériau. Si ϵ_{r0} représente le retrait total du béton à 50 % d'hygrométrie extérieure, la déformation libre rémanente, en cas d'élévation de température, s'écrira :

$$\epsilon = \frac{(100 - \text{H.R.})}{(100 - 50)} \epsilon_{r0} - \alpha(\theta_{\max} - \theta_0) \geq 0$$

où H.R., α , θ_0 et θ_{\max} symbolisent respectivement l'humidité relative environnante, le coefficient de dilatation thermique du béton, sa température au moment de la prise et la température maximale.

Simulant des conditions typiques du quart sud-est de la France, on prend $H.R. = 55 \%$, $\theta_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_{\max} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\alpha = 13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (béton de granulats siliceux). L'inégalité est alors strictement vérifiée pour $\varepsilon_{r0} = 577 \cdot 10^{-6}$. Il s'agit d'une valeur élevée pour un BHP, qu'il faudra introduire dans le cahier des charges du matériau. Selon les prévisions du logiciel BETONLAB.PRO du LCPC, la formulation donnée dans le tableau II satisfait à ces conditions. Le fait d'avoir un retrait libre toujours positif ne garantit pas cependant que la dalle en béton armé sera toujours tendue, car des effets de relaxation peuvent réduire l'effet du retrait hydraulique. Des essais sur échantillons de moquette soumis à des conditions environnementales représentatives devront être prévus, afin de valider cette approche au premier ordre.

Autres problèmes potentiels

Il faudra également s'assurer de la faisabilité de la mise en œuvre d'une couche à la fois mince et armée (l'expérience actuelle du BCMC se rapportant à du béton non armé). L'aspect du revêtement microfissuré pourrait être un frein à sa diffusion. Enfin, on a peu d'expérience sur le comportement sous trafic lourd d'une

dalle mince armée et non adhérente, eu égard notamment aux risques de départ de matériau (*punch-out*).

Conclusion

Le concept de moquette en BHP paraît prometteur à ce stade de la réflexion pour les raisons suivantes :

- associé à une assise traitée aux liants hydrauliques, il permet de réduire de façon importante le coût des matériaux en place, par rapport à une chaussée en béton traditionnelle ;
- la vitesse de durcissement du BHP, qui conduit couramment à des résistances de l'ordre de 30 MPa en compression à un jour, autorisera une mise en service rapide de la chaussée (en général moins de 24 h après le coulage) ;
- la taille du granulats garantit de faibles niveaux de bruit de roulement. Par ailleurs, la rhéologie du BHP à l'état frais laisse espérer l'obtention d'un uni satisfaisant, d'où un confort pour l'utilisateur très comparable à celui obtenu avec des matériaux bitumineux de type BBTM (béton bitumineux très mince) ;
- la surface en BHP devrait présenter une durabilité sans équivalent dans la panoplie des matériaux de couche de roulement

actuels. On peut penser que la première cause de fin d'état de service sera le polissage des gravillons. Ce problème doit pouvoir être réglé par une régénération de la micro-rugosité, sans diminution notable de l'épaisseur de la couche ;

- grâce à la densité du renforcement et à l'adhérence exceptionnelle du BHP avec les armatures, la moquette devrait assurer une excellente étanchéité vis-à-vis de l'assise. Or, la pénétration d'eau est la cause principale de dégradation de ce type de structure ;
- à l'heure où les considérations de développement durable prennent un poids grandissant, cette solution technologique permet un emploi optimal de la ressource en granulats : des gravillons « nobles » sur 6 cm seulement d'épaisseur, et des matériaux de moindre qualité, voire issus de déchets ou de recyclage pour le corps de la chaussée.

En termes de marché, outre les chaussées neuves, on pourrait envisager l'emploi de moquette BHP en réhabilitation de chaussées semi-rigides fissurées. Ces perspectives doivent maintenant être confirmées par un programme spécifique de recherche lancé dans le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées, dans le cadre du nouveau thème de recherche intitulé « Matériaux hydrauliques pour la route ».

Remerciements. L'auteur remercie Hugues Odéon, ingénieur des Travaux publics de l'État à la section Conception de chaussées et géotechnique routière du LCPC, pour son aide précieuse apportée dans le prédimensionnement des différentes structures de chaussée présentées dans cette note. Il n'oublie pas également les conseils avisés d'Yves Charonnat, de Jean-Louis Nissoux, directeurs de recherche au LCPC et de Jean-Pierre Christory, directeur adjoint du LROP.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

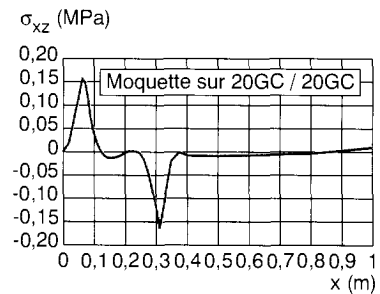
- | | | |
|--|--|---|
| <p>[1] GJØRV O.E., BAERLAND T., RØNNING H.R. (1987), <i>High-strength concrete for highway pavements and bridge decks</i>, Proceedings of the First International Symposium on the Utilization of High-Strength Concrete, Stavanger, June, edited by I. Holland, S. Helland,</p> | <p>B. Jakobsen and R. Lenschow, pp. 111-122.</p> | <p>sée de type BAC + GB3 sur la déviation des Rassats-Favrauds, <i>Revue générale des routes et autoroutes</i>, 768, pp. 42-50.</p> |
| <p>[2] LCPC-SETRA (1994), <i>Conception et dimensionnement des structures de chaussée</i>, Guide technique, décembre.</p> | <p>[3] BATTUT X., BAROIN L., GABRIELLI P.-P., LAURENT G., BRUSLE B., Expérimentation d'une structure de chaus-</p> | <p>[4] DE LARRARD F. (1996), Non-fragilité et pourcentages minimaux, <i>Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées</i>, Numéro spécial XIX.</p> |

- [5] Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et de l'Espace, Fascicule 62, titre I, section I, *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites, règles BAEL 91*, Cahiers du CSTB, mars, 1992.
- [6] CAESTECKER C. (1997), Revêtements peu bruyants - Tronçons comparatifs entre béton de ciment et enrobés drainants - Étude pré-comparative, *Revue générale des routes et autoroutes*, hors-série, **2**, Belgique.
- [7] Réseau routier national, *Catalogue des structures-types de chaussées neuves*, SETRA/LCPC, Édition 1998.
- [8] DE LARRARD F., SEDRAN T. (1999), *BETONLAB.PRO - Logiciel de formulation de bétons* - Version 1.01, logiciel et notice, LCPC, janvier.
- [9] PAILLÈRE A.-M., BUIL M., SERRANO J.-J. (1987), *Durabilité du béton à très hautes performances : incidence du retrait d'hydratation sur la fissuration au jeune âge*, From Materials Science to Construction Materials Engineering, Proceedings of the First International RILEM Congress, Versailles, septembre, edited by J.C. Maso, pp. 990-997.



Annexe
Calcul des contraintes de cisaillement
dans la moquette sous l'essieu de référence

On présente le résultat d'un calcul effectué à l'aide du modèle de Burmister (modèle multicouche élastique linéaire). La couche de BHP est supposée glissante par rapport à la couche de base, qui est semi-collée sur la couche de fondation, elle-même collée sur la plate-forme. Les charges appliquées sont représentées par leurs empreintes, ramenées à deux disques exerçant des pressions uniformes de 0,662 MPa (correspondant à l'essieu classique de 130 kN). Les centres des deux disques sont distants de 0,375 m. La figure ci-contre indique la variation du cisaillement dans un plan vertical perpendiculaire à l'axe défini par les centres des deux disques, le long de cet axe.



*Contrainte de cisaillement
à l'axe neutre de la couche
de roulement, en fonction
de la distance à l'axe de l'essieu.*