

Essais préliminaires d'un enduit hydraulique pour couche de roulement à longue durée de vie

François De LARRARD
Olivier GARCIN
Ferhat HAMMOUM
François TRAVERS

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'un programme de recherche international, le LCPC propose une solution technique innovante intitulée « Enduit hydraulique fibré gravillonné (EHFG) ». Il s'agit d'essayer de développer une technique de couche de roulement à longue durée de vie, consistant à étaler, sur une couche de liaison bitumineuse, une couche de mortier fibré à ultra-hautes performances, dans laquelle des gravillons à forte résistance au polissage seraient engravés. Au stade actuel, on a vérifié que ce matériau présentait des pertes de gravillons limitées dans un essai à l'ornièreur avec angle d'environnement, supposé simuler la sollicitation subie par une couche d'usure de chaussée. La suite du programme (essais en laboratoire et en semi-vraie grandeur) permettra de compléter l'évaluation de l'EHFG. En cas de comportement satisfaisant, une application sur un chantier expérimental pourra s'envisager.

DOMAINE : Route.

ABSTRACT

PRELIMINARY TESTS ON A HYDRAULIC COATING FOR WEARING COURSES WITH A LONG LIFE CYCLE

Within the framework of an international research program, LCPC has proposed an innovative technical solution entitled: "Hydraulic Fiber Gravel Coating (or EHFG, according to the French acronym)". This paper focuses on developing a technique for wearing courses with long life cycles, consisting of spreading a layer of ultra-high performance fiber mortar, in which gravel featuring high resistance to polishing has been inserted, over an asphalt binding course. At the present time, it is verified that this material displays only limited gravel loss during a test conducted using a rutting tester with a turning angle presumed to simulate the loading absorbed by a pavement wearing course. The remainder of the research program (tests both in the laboratory and on a half-scale set-up) will serve to complete the EHFG evaluation. In the case of satisfactory behavior, application on an experimental project site may be envisaged.

FIELD: Roads.

121

INTRODUCTION

L'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économiques) et la CEMT (Conférence Européenne des Ministres des Transports) mènent conjointement une étude économique sur les chaussées à longue durée de vie. L'objectif de cette étude est de déterminer dans quelle mesure, pour des chaussées à fort trafic dont l'interruption momentanée pour cause de travaux engendre des coûts sociaux importants, il serait profitable pour la collectivité d'utiliser des matériaux, et des solutions techniques associées, plus coûteux, mais plus durables. En admettant que la structure de ces chaussées ne nécessite pas d'entretien pendant 30 ou 50 ans, quel prix serait-on prêt à payer pour une couche de roulement dont la durée de vie serait de 20, 30 ou 40 ans alors qu'aujourd'hui, pour ce type de chaussées, les couches de roulement sont renouvelées tous les 7 à 15 ans ?

Après une première phase essentiellement bibliographique [1], le groupe de travail a entamé mi-2004 une seconde phase comprenant des essais de laboratoire et visant à fournir un début de validation technique pour des matériaux candidats. Parmi ceux-ci, les enrobés de type bitume-époxy ont été rapidement identifiés, car il existe pour ces matériaux une longue expérience, notamment en revêtement d'ouvrages d'art. En parallèle, on a souhaité évaluer des solutions à base de matériaux hydrauliques, compte tenu des progrès récents intervenus dans cette famille de solutions techniques. On pense en particulier à l'essor actuel des bétons fibrés ultra-performants (BFUP), matériaux apparus au milieu des années 90 [2, 3]. Cependant, à notre connaissance, les BFUP n'ont pas encore

fait l'objet d'applications routières. Le LCPC a donc proposé aux partenaires du projet d'étudier une solution innovante, qui utilise les potentialités des matériaux hydrauliques à très faible rapport eau/liant, tout en prenant en compte les spécificités fonctionnelles des revêtements routiers et en gardant à l'esprit la nécessité d'économie maximale, le contexte de compétition étant particulièrement prégnant. La solution actuellement à l'étude est présentée ici.

SOLUTION HYDRAULIQUE ENVISAGÉE

Précisons tout d'abord que l'on cherche à mettre au point une couche de roulement applicable sur une chaussée bitumineuse, type de chaussée le plus courant dans les pays participant au projet. Ces chaussées comprennent généralement une assise en matériau à dosage modéré en bitume (grave-bitume dans le contexte français), surmontée d'une couche de liaison plus riche (qui pourrait être, en France, un béton bitumineux semi-grenu, ou BBSG). Bien entendu, le corps de chaussée est supposé lui-même à longue durée de vie, c'est-à-dire qu'il ne doit présenter ni fissuration, ni orniérage pendant la vie de la couche de roulement.

Diverses considérations ont été prises en compte pour tenter de faire émerger une solution technico-économique viable :

- la première fonction d'une couche de roulement, liée à la sécurité, est d'assurer l'adhérence des véhicules avec la chaussée. Dans la plupart des solutions actuelles, c'est le granulat affleurant à la surface qui assure cette fonction. Sa granularité détermine la macro-rugosité, et son état de surface la micro-rugosité. S'agissant d'une couche de roulement à longue durée de vie, il est nécessaire de choisir un granulat qui présente une sensibilité minimale au polissage. La bauxite calcinée, sélectionnée par les entreprises routières pour les revêtements les plus performants, a été choisie. En ce qui concerne la taille de ces granulats, la nécessité de limiter le bruit de roulement tout en gardant une macro-texture suffisante a conduit, dans un premier temps, à choisir une fraction 3/7 mm parmi les coupures disponibles sur le marché ;
- les granulats de bauxite calcinée sont extrêmement coûteux (prix unitaire de l'ordre de 30 à 40 fois celui des granulats naturels). Il faut donc réduire au maximum la quantité utilisée. Cette constatation milite pour l'adoption d'une solution de type « enduit », dans laquelle un matériau adhérent, répandu en couche relativement fine, sert à assurer le collage entre la couche de liaison et une couche monogranulaire de gravillons ;
- dans la mesure où le choix a été fait *a priori* de faire appel à la famille des matériaux hydrauliques, le matériau adhérent sera nécessairement un coulis ou un mortier fin à très faible rapport eau/liant, afin de maximiser les performances d'adhérence aux interfaces couche de liaison-mortier et mortier-gravillon. Ce type de matériau hydraulique doit présenter d'autres qualités inhérentes aux bétons à ultra-hautes performances, comme la résistance à l'abrasion et la résistance à l'écaillage dû aux cycles de gel-dégel et aux sels de déverglaçage ;
- comme tous les matériaux hydrauliques, le mortier présentera un certain retrait libre, contrecarré par la rigidité du support sur lequel il sera collé. Loin des extrémités de la chaussée, la couche de roulement est en situation de déformation bloquée et la fissuration est alors inévitable. Pour la contrôler, il sera probablement utile d'inclure dans la formulation un renfort à base de fibres, en l'absence d'une technologie permettant d'introduire une armature continue dans une couche de faible épaisseur. La quantité de fibres devra être ajustée expérimentalement, compte tenu de la complexité du fonctionnement d'une couche de roulement, et du rôle d'armature, probable, mais difficilement quantifiable, joué par le support bitumineux ;
- les BFUP sont, comme la bauxite calcinée, des matériaux chers (environ 10 fois plus chers que les bétons classiques de chaussée). Il s'agit donc de limiter l'épaisseur de la couche de mortier, tout en évitant cependant un contact direct entre les gravillons de bauxite et le support bitumineux. Il faudra également que le complexe mortier/gravillon constitue une sorte de carapace protectrice pour la couche de liaison et les couches inférieures, que ce soit vis-à-vis de l'effet du trafic (efforts tangentiels de freinage des véhicules, notamment) ou des intempéries. Compte tenu des dimensions des gravillons annoncées plus haut, et de la rugosité de la couche de liaison, fraisée avant application de la couche de roulement, une épaisseur nominale de 8 mm de mortier semble à ce stade un ordre de grandeur raisonnable.

La solution envisagée, qui sera nommée provisoirement EHFG (Enduit Hydraulique Fibré Gravillonné), sera ainsi constituée d'un mortier fin à très faible rapport eau/liant, incluant une quantité à déterminer de fibres, appliqué en une couche d'environ 8 mm et « clouté » par des gravillons de bauxite calcinée de granularité 3/7 mm.

FORMULATION DU MORTIER ET FABRICATION DES ÉPROUVETTES

Choix des constituants

Le mortier devant être appliqué en une couche de 8 mm, la taille maximale de ses grains devait rester inférieure au cinquième de l'épaisseur, soit 1,6 mm. Cependant, il était aussi nécessaire que les plus gros grains de sable puissent s'intercaler entre les gravillons de bauxite, ce qui impliquait une discontinuité marquée entre les tailles extrêmes des deux granulats. D'un autre côté, choisir un sable trop fin aurait augmenté la demande en liant. Une taille maximale de 1 mm a donc été adoptée *a priori* pour le sable. Toujours pour faciliter le processus de cloutage des gravillons dans le mortier, un sable roulé siliceux a été préféré à un sable concassé. Compte tenu des coupures commerciales disponibles, deux types de sable ont été choisis : un sablon de dimensions comprises entre 80 et 315 μm , et un sable compris entre 200 et 1 000 micromètres.

La longueur des fibres choisies ne devait pas être trop importante par rapport à l'épaisseur de la couche. Par contre, eu égard au rôle de couture assigné à ces fibres lors de la fissuration de l'enduit gravillonné, les fibres devaient être sensiblement plus longues que la dimension maximale des gravillons (fixée à 7 mm). Une longueur de 13 mm a semblé représenter *a priori* un assez bon compromis. Compte tenu des disponibilités, le diamètre des fibres choisies était de 0,2 mm. S'agissant de fibres en acier, on pourrait craindre *a priori* que se développe un phénomène de corrosion. Cependant, compte tenu de la compacité de la matrice, cette corrosion ne peut apparaître qu'après fissuration. Or, c'est lors de l'établissement de cette fissuration que les fibres jouent leur rôle principal, en augmentant le nombre de fissures et en diminuant leur ouverture moyenne. En tout état de cause, des fibres organiques seront également testées dans la suite du projet.

La pâte de ciment devait comporter les éléments classiques de tous les mortiers et bétons à hautes performances : un ciment Portland de type CEM I, bien compatible avec les adjuvants, une fumée de silice et un superplastifiant. Le scénario de fabrication et de mise en œuvre n'étant pas encore fixé, on n'a pas envisagé, à ce stade encore préliminaire, l'utilisation d'un retardateur de prise, parfois nécessaire pour conserver la consistance d'un mortier pendant un temps suffisant pour son transport et sa mise en œuvre.

123

Proportions des constituants

On a fixé *a priori* le rapport eau/ciment à 0,20. Il est difficile de descendre en dessous de cette valeur tout en conservant un mélange maniable et sans obtenir un matériau exagérément sensible aux paramètres de fabrication. De même, la proportion de fumée de silice par rapport au ciment a été prise égale à 20 %, valeur proche de l'optimum de remplissage. Le superplastifiant a été dosé à un niveau proche de la saturation, ce qui garantit une réduction d'eau maximale pour une consistance donnée. Il restait à régler le volume de pâte par rapport au squelette sableux, ainsi que la proportion entre les deux sables. Ces ratios ont été déterminés à l'aide du logiciel BétonlabPro 2 [4]. Un mélange (sans fibres), constitué du mortier et de la moitié (en volume) des gravillons de bauxite*, a été simulé et on a optimisé ce mélange sur la base d'un indice de serrage égal à 7 et d'un volume de pâte minimum. À cette composition, on a ajouté 1 % en volume de fibres, ce ratio devant être optimisé dans la suite de la recherche.

Fabrication des éprouvettes d'essais

Un mortier de composition définie par les calculs précédents a été fabriqué selon le mode opératoire précisé dans le tableau I. Après quelques ajustements, la formule figurant dans le tableau II a été arrêtée. Fabriquée à raison de 25 litres dans un malaxeur à béton, son affaissement au cône d'Abrams était de 14 cm. Le mortier sans fibres a donné, sur éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ cm, des résistances en compression et en flexion respectivement égales à 123,7 et 22,4 MPa à l'âge de 28 jours. Dans les mêmes conditions, le mortier avec 1 % de fibres a fourni des valeurs de 172,0 et 23,5 MPa. Le niveau

* En admettant qu'en moyenne, les gravillons seront enfoncés dans le mortier sur la moitié de leur volume.

TABLEAU I
Mode opératoire de fabrication du mortier, dans un malaxeur à mortier classique de marque Perrier

Phase	Action
$T < T_0$	Dans malaxeur sec, ajout de la fumée de silice, du ciment, du superplastifiant et des deux sables
$T_0 \text{ à } T_0 + 1'$	Malaxage lent à sec
$T_0 + 1' \text{ à } T_0 + 1'30$	Ajout de l'eau
$T_0 + 1'30 \text{ à } T_0 + 2'30$	Malaxage lent
$T_0 + 2'30 \text{ à } T_0 + 4'$	Malaxage rapide
$T_0 + 4' \text{ à } 4'15$	Arrêt et ajout des fibres
$T_0 + 4'15 \text{ à } T_0 + 5'$	Malaxage lent

TABLEAU II
Composition du mortier (en kg/m³)

Sable siliceux 0,2/1	445
Sable siliceux 0,08/0,315	445
Ciment CEM I 52,5 CP2 « blanc »	1 021
Fumée de silice	204
Superplastifiant (poudre)	3,06
Fibre d'acier 13 mm × 0,20 mm	76,5
Eau	204

particulièrement élevé de résistance en traction par flexion laissait augurer une bonne adhérence, tant avec le support bitumineux qu'avec les gravillons et les fibres.

Il fallait ensuite mettre au point un procédé d'application de l'enduit en laboratoire. On a tout d'abord fabriqué des prismes en EME (enrobé à module élevé) 0/10, devant servir de support peu déformable à l'enduit hydraulique. Après quelques tâtonnements, il est apparu que la vibration n'avait guère d'effet sur l'écoulement du mortier, de consistance très collante, mais que l'on pouvait appliquer la couche de 8 mm au moyen d'une règle glissant sur des cales, comme illustré sur la figure 1. Les gravillons étaient ensuite appliqués manuellement, en essayant de constituer une couche monogranulaire la plus dense possible et en évitant les zones trop proches du bord du prisme. Il fallait encore faire pénétrer les gravillons dans le mortier, ce qui fut fait au moyen d'un cylindre en bois, roulant sur une rehausse (Fig. 2). Après enlèvement de gravillons non adhérents faute d'un contact direct avec le mortier, la densité surfacique de gravillon était de l'ordre de 6 kg par mètre carré.

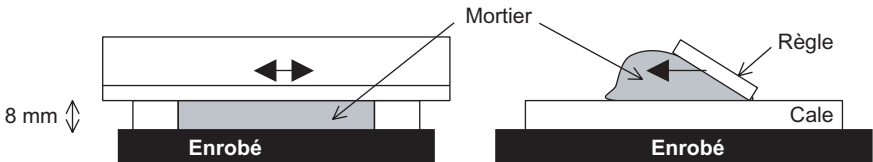
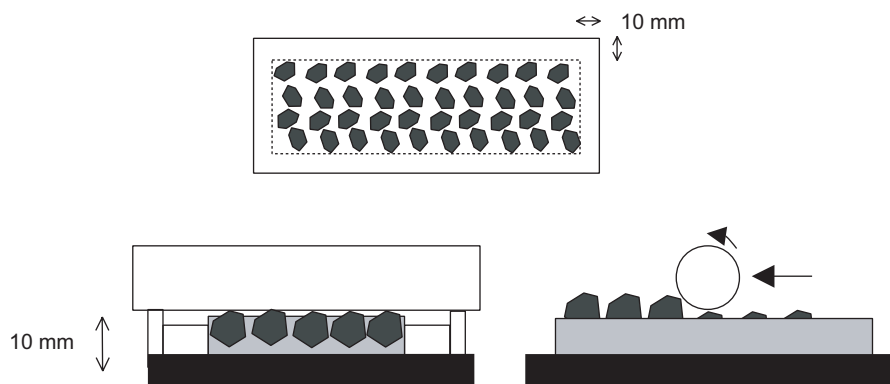


Figure 1
Application du mortier en laboratoire. Le matériau est étalé sur le support avec une règle poussée sur deux cales de 8 mm d'épaisseur. La règle est manipulée avec un mouvement de va-et-vient transversal, afin de limiter le bullage au niveau de la surface libre du mortier.



■ **Figure 2**

Application des gravillons sur la couche de mortier frais. Les gravillons sont étalés manuellement dans la zone située à plus d'un centimètre de distance des bords. Ils sont ensuite enfoncés dans le mortier à l'aide d'un rouleau posé sur des cales de 10 mm de hauteur.

Il est apparu, lors de ces essais, que les fibres se couchaient à l'horizontale et s'orientaient naturellement dans le sens de lissage du mortier, qui serait sur la chaussée le sens longitudinal. Ce phénomène est bien sûr favorable à la couture efficace de fissures transversales de retrait. Par ailleurs, ces fibres, au pourcentage adopté, ne semblaient pas gêner l'incrustation des gravillons dans le mortier, comme on le craignait au départ. Les prismes revêtus d'EHFG ont été placés à 20 °C en cure humide, pendant 28 jours.

EFFET D'UN PASSAGE À L'ORNIÉREUR SUR LE COMPORTEMENT DES ÉPROUVETTES

Il n'existe pas aujourd'hui d'essai de laboratoire reconnu et validé, capable d'évaluer quantitativement la durabilité d'une couche de roulement. En attendant la mise au point d'un tel essai [5], et à titre de première mise à l'épreuve, les éprouvettes composites fabriquées (au nombre de deux) ont été soumises à un essai à l'orniéreur LCPC [6], comme montré sur la figure 3. Après une première série de 1 000 cycles, on a imposé à la roue de l'orniéreur un angle d'envirage de 5°, afin de rendre la sollicitation plus agressive et plus représentative de l'action des pneumatiques en cas de virage, de freinage ou d'accélération. 2 000 cycles supplémentaires ont été appliqués. Le chargement a été ensuite interrompu, compte tenu de l'état d'usure avancée du pneu. Les résultats de ces essais apparaissent sur la figure 4.



■ **Figure 3a**

Éprouvette avant essai à l'orniéreur LCPC.

Figure 3b

Éprouvette après essai
à l'ornièreur LCPC.



Figure 4

Évolution des départs de gravillon
pendant l'essai à l'ornièreur (moyenne
des valeurs obtenues dans deux essais).

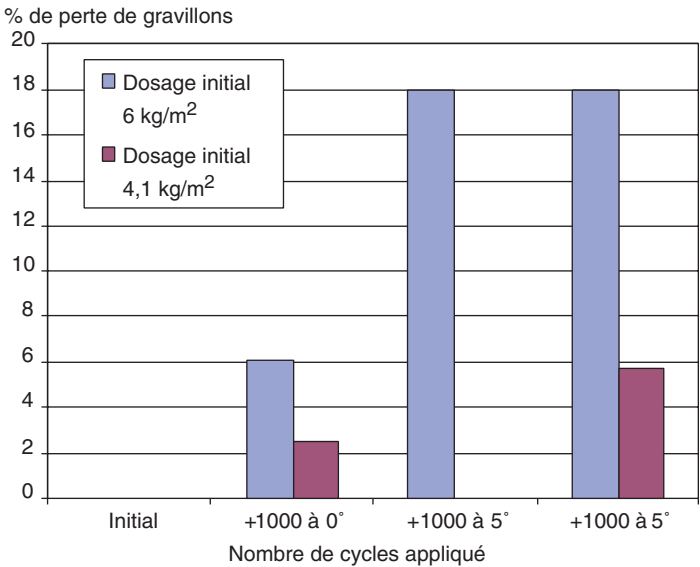
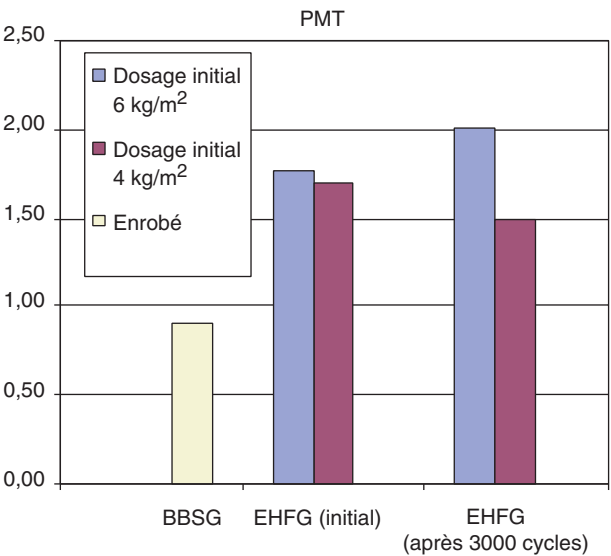


Figure 5

Évolution de la hauteur
au sable de l'échantillon.



On a constaté après 1 000 cycles un départ de gravillon d'environ 6 %, par rapport au total de gravillons incrustés dans la surface de roulement. Ce ratio montait à 18 % après 2 000 cycles (effet de l'angle d'envirage), mais se stabilisait au-delà. La figure 5 présente les valeurs de profondeur moyenne de texture (ou hauteur au sable), mesurée selon la norme NF EN 1 3 036-1. D'après ces mesures, le niveau de hauteur au sable est comparable, voire supérieur, à celui des couches de roulement actuelles. Compte tenu de la résistance au polissage des gravillons, l'adhérence de ce revêtement devrait être satisfaisante. On a cependant cherché à optimiser le procédé, en réduisant la quantité de gravillons appliquée, afin d'améliorer leur indentation dans le mortier.

ESSAIS COMPLÉMENTAIRES

Pour la deuxième série d'essais d'orniérage, les gravillons ont été appliqués selon un mode opératoire modifié, décrit ci-après. On a utilisé pour chaque éprouvette une feuille d'aluminium adhésive, que l'on posait sur une couche de gravillons disposés à plat sur une surface horizontale. Le soulèvement de la feuille permettait de ne prélever que les gravillons adhérents. La feuille était ensuite appliquée sur le mortier frais, et roulée par le même moyen que précédemment. Cette feuille assurait, grâce à son imperméabilité, la cure de la surface de mortier. Elle était arrachée quand le mortier avait atteint l'âge de 48 heures. La densité surfacique de gravillons appliqués n'était plus que d'environ 4,1 kg/m³. Par contre, les gravillons étaient mieux enchâssés dans le mortier, comme en témoignent les moindres départs de matériaux consignés dans la figure 4. La valeur atteinte avec ce nouveau mode opératoire devient comparable avec les ordres de grandeur de départs de gravillons rencontrés dans les techniques d'enduit classique. À noter qu'avec ce deuxième mode opératoire d'application des gravillons, la hauteur au sable diminue légèrement avec le trafic (Fig. 5).

Ces résultats préliminaires sont donc encourageants, même si, bien entendu, le nombre de cycles appliqué est sans commune mesure avec celui que subirait une telle couche de roulement pendant sa durée de vie. Par ailleurs, le degré de sévérité de ce test par rapport à la réalité n'est pas connu ; il est prévu de le pratiquer sur des matériaux témoins comparables (de type enduit au bitume-époxy) afin de mieux évaluer la tenue des gravillons de l'EHFG.

CONCLUSION

Afin de répondre à un besoin identifié dans la plupart des pays industrialisés, et dans le cadre d'un programme de recherche international, le LCPC propose une solution innovante de couche de roulement à longue durée de vie espérée, à base de matériaux hydrauliques, appelée provisoirement EHFG. Un programme de validation de cette solution est en cours. Il comprend notamment des essais de fatigue sur éprouvettes, des essais de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage, des essais de fissuration par retrait empêché sur des sections de diverses longueurs, des essais de résistance à l'abrasion, des mesures d'adhérence avant et après usure, des évaluations du bruit de roulement des véhicules et, enfin, un essai sur structure complète à l'aide d'une machine linéaire de fatigue, avec contrôle de la température.

Si les résultats de ces essais sont satisfaisants, il faudra imaginer une méthode industrielle de mise en œuvre. Il restera alors, dans le cadre de la phase III du projet OCDE/ECMT, à réaliser des sections d'essai circulées, dont le suivi sur le long terme sera nécessaire pour assurer le succès de la démarche.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient :

- le groupe SIKA (Isabelle Lallemand-Gamboa) pour le conseil prodigué dans le choix des constituants de l'enduit hydraulique, et pour la fourniture des constituants de l'EHFG à l'ensemble des participants au projet ;
- Anders Henriksen, de la société DBT (Danemark), pour les discussions fructueuses tenues lors de la conception de l'EHFG ;
- les collègues de la BAST (Allemagne), du RTA (Australie), du DRI (Danemark), du FHWA (USA) et du TRL (Royaume-Uni) qui participent à cette recherche.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Collectif, *Évaluation économique des chaussées à longue durée de vie. Phase I*, Rapport OCDE/ECMT, **2004**.
- [2] RICHARD P. et al., Les bétons de poudres réactives (BPR) à ultra-haute résistance (200 à 800 MPa), *Annales de l'ITBTP*, **532**, mars-avril **1995**, pp. 81-143.
- [3] De LARRARD F., SEDRAN T., Optimization of Ultra-High Performance Concrete by Using a Packing Model, *Cement and Concrete Research*, vol. 24, **6**, **1994**, pp. 997-1009.
- [4] SEDRAN T., De LARRARD F., BétonlabPro 2 – Logiciel d'aide à la formulation des bétons, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, **2000**.
- [5] HAMMOUM F., STÉFANI C., COTINEAU L.M., DESROCHES J.-P., Quantification of accelerated wear for road materials by using a new testing apparatus, *Proceedings of WTC III : World Tribology congress & Exhibition*, 12-16 September **2005**, Washington, DC, USA, accepté.
- [6] Matériel LPC. Adresse Internet :
http://www.lcpc.fr/fr/produits/materiels_mlcp/fiche.dml?id=60&type=abcdaire