

# **GB5: ALTERNATIVE ENVIRONNEMENTALE & ECONOMIQUE A L'EME2 POUR ASSISES DE CHAUSSEES A LONGUE DUREE DE VIE DE PAR L'EMPLOI DE COURBES GRANULAIRES OPTIMISEES & DE BITUMES POLYMERES**

F. OLARD

EIFFAGE Travaux Publics, Direction Recherche & Développement, FRANCE

[francois.olard@eiffage.com](mailto:francois.olard@eiffage.com)

## **RESUME**

Les concepts d'empilements granulaires développés initialement par Caquot (1937) dans le domaine des bétons hydrauliques à hautes performances, puis par de nombreux autres chercheurs depuis les années 1970, ont été transposés dans le domaine des enrobés bitumineux. Ces concepts, associés dans le cadre de cette étude à l'emploi de la presse à cisaillement giratoire (PCG) sur granulats seuls, ont permis de développer une nouvelle procédure de laboratoire pour la formulation d'enrobés bitumineux denses à haut module de rigidité. Ces enrobés sont notamment caractérisés par un empilement granulaire optimisé entre les gravillons et par la non-nécessité d'avoir recours aux bitumes durs pour satisfaire les spécifications EME2, en particulier le module de rigidité de 14000MPa à 15°C.

De plus, l'utilisation d'une faible teneur en bitume modifié au polymère SBS (e.g. 3,9%), combinée à l'empilement granulaire précédemment obtenu, aboutit à la formulation d'enrobé dénommée GB5<sup>®</sup> présentant à la fois une excellente aptitude au compactage, un haut module de rigidité et, surtout, une moindre susceptibilité au vieillissement (par oxydation) et une très grande résistance en fatigue, ce qui permet d'envisager une réduction d'épaisseur des assises de chaussées et une meilleure durabilité.

La caractérisation performantielle de ces matériaux en laboratoire a consisté à évaluer leur aptitude au compactage, leur tenue à l'eau, leur résistance à l'orniérage à 60°C, leur module complexe à 15°C et leur résistance en fatigue à 10°C. En plus de ces résultats, sont également illustrées les mises en œuvre in-situ concluantes de ce nouvel enrobé bitumineux à hautes performances, principalement effectuées en France et en Espagne.

La nouvelle génération d'enrobés à hautes performances proposée, validée en laboratoire et sur le terrain, peut être considérée comme une solution technique innovante pour des chaussées durables, se détériorant peu structurellement et nécessitant seulement un entretien régulier de la couche de roulement.

## **1. INTRODUCTION**

Dans le cadre des études de formulation d'enrobés bitumineux en laboratoire, prévoir et maîtriser l'empilement granulaire est essentiel puisque les granulats représentent 95% environ de la masse de l'enrobé. Or, l'empilement granulaire dépend principalement de cinq paramètres (e.g. Caquot [1], Baron [2], Larrard [3-6], Corté & Di Benedetto [7]):

- courbe granulométrique (continue ou discontinue)
- forme des granulats (aplatis et allongé, cubique, rond)
- micro-texture à la surface des granulats (lisse, micro-rugueux, micro-poreux)
- type et énergie de compactage (pression statique, vibration horizontale ou verticale)
- épaisseur de couche (e.g. Cooper et al. [8])

Cet article traite principalement du premier paramètre (courbe granulométrique), et plus particulièrement de l'optimisation de la combinaison des fractions fines (le sable) et grossières (gravillons) au sein du mélange, en vue d'obtenir une matrice très dense de gravillons dans l'enrobé (maximisation des contacts entre gravillons) et indirectement un enrobé à hautes performances (Roque [9], Kim et al. [10]), en particulier une résistance à la compression simple, une résistance à l'orniérage et une rigidité les plus hautes possibles.

Par ailleurs, l'amélioration de la tenue en fatigue et au vieillissement (par oxydation) des matériaux bitumineux par ajout de polymères SBS est reconnue (Baaj [11], Dressen [12]). Toutefois, l'emploi de SBS se limite en général aux couches de surface (roulement et liaison) pour des raisons de pérennité des caractéristiques de surface, mais surtout de coût. De plus, le haut module de rigidité requis dans le cadre des couches d'assise à longue durée de vie nécessite souvent le recours aux bitumes durs (et, en conséquence, une teneur en liant plus élevée pour conserver une bonne résistance en fatigue), posant des problèmes de viscosité et de compatibilité avec les SBS conventionnels. Ainsi, est venue l'idée de tirer profit à la fois des empilements granulaires optimisés et des bitumes modifiés aux SBS, de façon à obtenir un enrobé pour couches d'assise ou de liaison, à la fois très rigide et très résistant en fatigue dans une seule et même formulation, sans avoir recours ni aux liants durs (visant par là même une meilleure recyclabilité) ni à une forte teneur en liant (pour préserver le bitume d'origine fossile et permettre de conserver un niveau de prix comparable, voire inférieur aux enrobés dits "à module élevé" actuels).

## 2. CONCEPTS D'EMPILEMENTS GRANULAIRES 'OPTIMAUX'

De très nombreuses courbes granulométriques "idéales" sont citées dans la littérature technique [e.g. 13-14]. Ces courbes, continues et de forme parabolique, sont censées fournir un empilement granulaire "idéal" très dense:

$$P = 100(d/D)^b \quad \text{équation (1)}$$

où P: pourcentage de granulats passant à un tamis donné (%);

d: taille de l'ouverture du tamis considéré (mm);

D: taille du plus gros granulats (mm);

b: coefficient. Pour Nijboer [14] et Yoder [15], l'équation (1) permet d'obtenir une densité maximale pour tout mélange compacté si b est proche de 0,45 ou 0,5.

Cependant, comme souligné par Lees [17], la forme et la taille des granulats, l'énergie de compactage, la présence d'un liant d'enrobage, ou encore la taille et la forme d'un moule utilisé en laboratoire, sont autant d'éléments qui influent sur l'optimum de densité visé. Des concepts d'empilements granulaires plus généraux furent introduits par Caquot dès 1937 [1] dans le domaine des bétons hydrauliques à hautes performances, puis par de nombreux chercheurs depuis les années 1970 [3-6, 16]. Un état de l'art a, en outre, été récemment présenté par Perraton [18] et Olard & Perraton [19-20], transposant ces concepts dans le domaine de la formulation d'enrobés. Les sections suivantes en brossent un rapide aperçu.

### 2.1. Notions de base associées aux mélanges binaires

En 1937, Caquot [1] met en évidence l'influence de deux types d'interactions entre les granulats de tailles différentes, l'effet "de paroi" et l'effet "de desserrement" (encore appelé effet "d'interférence"), sur l'évolution de l'indice des vides, noté e ( $e = (\text{vol. vides}) / (\text{vol. solides})$ ), dans le cas de mélanges binaires.

D'une part, l'effet "de paroi" est illustré en Figure 1 (à gauche). En considérant un milieu infini de particules fines d'indice de vides donné, l'introduction d'une particule de grande taille va se traduire par un plus faible indice des vides du mélange. Cependant, très localement, à la surface de la particule grossière, l'arrangement granulaire des éléments fins a été perturbé et l'indice de vides propre à ces éléments fins a augmenté (Caquot [1], Chanvillard [21]).

D'autre part, l'effet "de desserrement" est illustré en Figure 1 (à droite). Dans le cas d'une introduction d'éléments fins au sein d'un milieu infini d'éléments de grande taille: lorsque la concentration en éléments fins augmente, à partir d'une certaine concentration les éléments les plus gros sont desserrés, leur empilement granulaire est ainsi modifié. Cette concentration critique est intéressante au sens où elle permet d'obtenir une forte densité du mélange sans toutefois que l'empilement des particules de grande taille ne soit perturbé.

Si la taille moyenne des éléments fins ( $d_{\text{FINS}}$ ) est suffisamment faible comparée à celle des éléments grossiers ( $d_{\text{GROS}}$ ) ( $d_{\text{FINS}}/d_{\text{GROS}} < 0,2$ ), l'effet de paroi est linéaire et suit le principe de superposition. Quant à l'effet "de desserrement", il n'est jamais linéaire (Baron [2]).

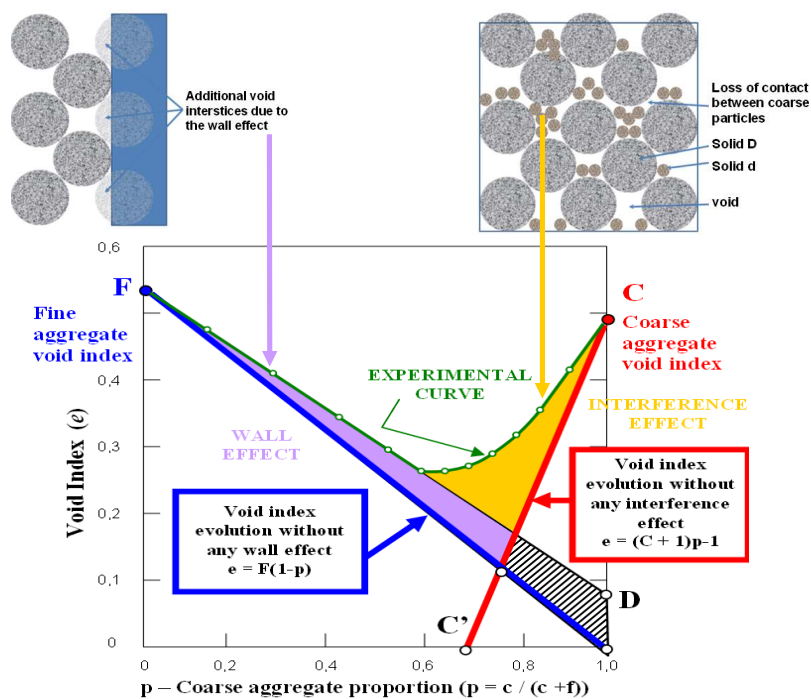


Figure 1 – Effets de paroi et de desserrement pour un mélange binaire, Powers [22].  
 f et c sont respectivement les volumes des granulats fins et des granulats gros ( $f+c=1$ );  
 F (resp. C) = indice des vides des granulats fins (resp. grossiers).

## 2.2. Evolution de l'indice des vides en fonction de la dimension moyenne des particules

L'évolution de l'indice des vides ( $e$ ) d'un mélange binaire en fonction de la dimension moyenne des particules fines et grossières a été mise en évidence par Furnas [13]. La Figure 2 illustre que plus les éléments fins ont une taille négligeable comparativement aux éléments grossiers, plus il est facile d'obtenir un indice des vides du mélange binaire très faible. Les effets d'interactions précités diminuent par ailleurs. De cette constatation, en particulier, est née l'idée d'introduire des discontinuités granulaires dans les mélanges de façon à obtenir des densités les plus fortes possibles.

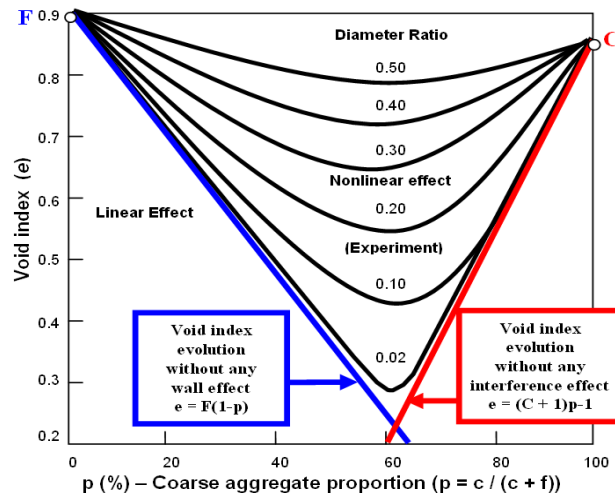


Figure 2 – Effet du rapport  $d_{\text{FINS}}/d_{\text{GROS}}$  sur l'indice des vides ( $e$ ) dans le cas de mélanges binaires d'éléments grossiers ( $c$ ) ou fins ( $f$ ) (Furnas [13], Oger [23], Perraton [18]).

### 2.3. Cas idéal d'un mélange binaire de granulats très fins et de granulats grossiers

Présentons les concepts d'empilements optimaux introduits dans l'ouvrage de référence sur les bétons hydrauliques de Baron & Sauterey [2], transposés ici pour la formulation d'enrobés. Dans cet ouvrage, Baron schématise l'évolution de l'indice des vides d'un mélange binaire de granulats (des éléments très gros et des éléments très fins, absence d'éléments de taille intermédiaire) par trois droites (Fig. 3). Deux seuils sont définis,  $p_X$  et  $p_T$ , correspondant à des concentrations critiques ( $p$  est la concentration volumique des gros granulats) éliminant toute interaction forte sur l'empilement des deux familles de granulats:

- Pour un mélange binaire avec une forte teneur en éléments fins,  $p < p_X$ :

$$e = F(1-p) + Dp \quad \text{équation (2)}$$

où  $F$  est l'indice de vides des fins et  $D$  un coefficient lié à l'effet dit "de paroi" (Fig. 3).

- Pour un mélange binaire avec une forte teneur en gros éléments,  $p > p_T$ :

$$e = (C+1)p - 1 \quad \text{équation (3)}$$

où  $C$  est l'indice de vides des gros (Fig. 3).

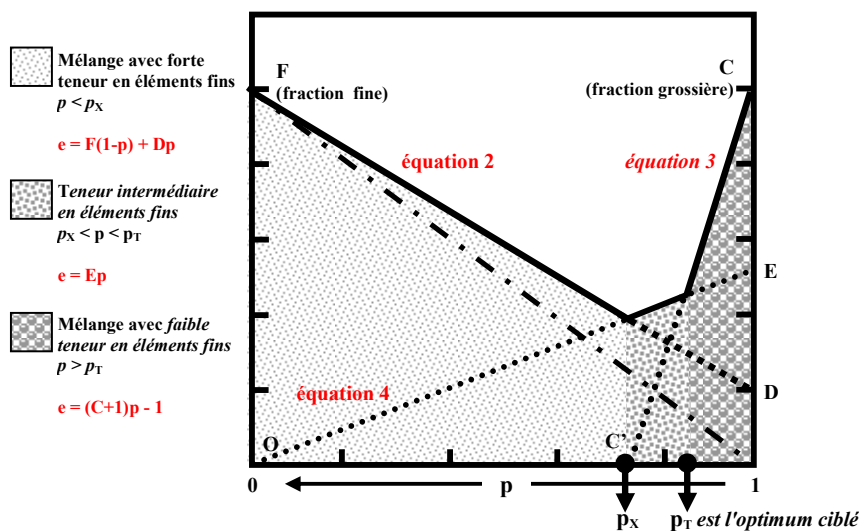


Figure 3 – Variation de l'indice des vides ( $e$ ) dans le cas d'un mélange binaire, l'une des deux fractions granulaires est très fine comparée à l'autre (selon Baron [2]).

- Pour un mélange binaire intermédiaire,  $p_x < p < p_T$ :  
 $e = E_p$  équation (4)  
 où E est un coefficient déterminé graphiquement (Fig. 3).

### 3. OBJECTIF DE LA PRESENTE ETUDE

L'approche de Baron pour optimiser les empilements granulaires, développée dans le domaine des bétons hydrauliques à hautes performances en 1982 [2], a été transposée au domaine des enrobés bitumineux au sein du Centre d'Etudes et de Recherches (CER) EIFFAGE Travaux Publics (France). Le but étant d'évaluer la pertinence d'une telle approche dans le domaine des enrobés avec des matériaux français et espagnols typiques. La question sous-jacente était de déterminer s'il est possible ou non de développer des enrobés denses à hautes performances de par une optimisation granulaire spécifique?

Après publication de résultats préliminaires encourageants obtenus par Perraton [16] et Olard & Perraton [17-18], une campagne expérimentale ambitieuse a été lancée au CER EIFFAGE Travaux Publics, incluant l'évaluation de l'aptitude au compactage, la tenue à l'eau, la résistance à l'orniérage, le module de rigidité, ainsi que la résistance en fatigue.

### 4. MATERIAUX DE L'ETUDE

Deux bitumes purs (même brut et même raffinerie) ont été testés, de grades 35/50 et 35/45B (la dénomination "B" correspond à un bitume semi-soufflé). Ces mêmes bitumes ont chacun été modifiés avec 2,5% de SBS réticulé, pour évaluation. L'analyse du liant issu d'un agrégat d'enrobé recyclé "RAP Tours" a aussi été menée. Le Tableau 1 présente les résultats conventionnels (Pénétrabilité à 25°C, Température Bille-Anneau) obtenus pour ces bitumes.

Une seule nature de granulats est ici considérée (diorite): fractions 0/2, 0/4 et 10/14 mm de la carrière "La Noubleau". Le filler calcaire de la carrière "S<sup>t</sup> Hilaire" a également été utilisé. De plus, des agrégats d'enrobés recyclés (RAP) du poste d'enrobage "Touraine Enrobés" (EIFFAGE TP Centre) ont été étudiés en complément. Le Tableau 2 donne les courbes granulométriques de chaque fraction granulaire. La dimension moyenne du filler a été déterminée au moyen d'un analyseur Coulter<sup>®</sup>.

Tableau 1 – Résultats conventionnels des bitumes testés

Bitumes	Pénétrabilité 25°C (mm/10) NFEN1426	Température Bille-Anneau (°C) NFEN1427
35/50	38	53,5
35/45B	37	62
35/50+2,5%SBS réticulé	38	62,2
35/45B+2,5%SBS réticulé	33	71
Liant issu du "RAP Tours"	10	71,2

Tableau 2 – Passant et taille moyenne de particules pour chaque fraction granulaire

Tamis (mm)	Passant (%)				
	filler	Granulats Noubleau			Recyclés RAP Tours
		0/2	0/4	10/14	
16				100	100
14				93	97
12.5				77	89
10				22	72
8				5	63
6.3			100	1,7	55
4		100	96	0,4	45
2		97	54	0,3	32
1		68	37	0,2	23
0,5		45	25	0,2	17
0,25	100	31	18	0,2	10
0,125	94	22	13	0,2	10
0,08	83	17	10	0,2	9
<b>Taille moyenne de particules, notée d<sub>50</sub></b>					
<b>Diamètre (mm)</b>	0,025	0,6	1,9	11,5	5

## 5. CARACTERISATION PERFORMANTIELLE DES ENROBES

De nombreux essais de laboratoire ont été réalisés:

- L'aptitude au compactage, mesurée à la presse à cisaillement giratoire « PCG » selon la norme NFEN 12697-31. Ce test est un très bon indicateur du pourcentage de vides obtenu sur chantier, en fonction de l'épaisseur de la couche (Harman et al. [24]). Ce test, réalisé avant les autres essais comme screening, est le plus couramment utilisé en France pour l'optimisation des formules d'enrobés à chaud.

- La tenue à l'eau, mesurée avec l'essai dit de "Sensibilité à l'eau" (NFEN 12697-12) consiste en un essai de compression simple sur deux lots d'éprouvettes cylindriques, dont un lot est conservé dans l'eau durant huit jours. Si le rapport « i/C (%) » des résistances en compression obtenues selon les modes de conditionnement eau/air est supérieur à une certaine valeur, le matériau est jugé acceptable. Ce rapport i/C est l'homologue français de l'ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio) sur éprouvettes Marshall.

- La résistance à l'orniérage à 60°C, caractérisée selon la norme NFEN 12697-22. Deux plaques d'enrobés rectangulaires par mélange sont chacune soumises aux passes répétées d'une roue équipée d'un pneu à pression contrôlée et à fréquence constante, engendrant ainsi une déformation permanente.

- Le module complexe à 15°C-10Hz (NFEN 12697-26) sur éprouvettes cylindriques.

- La tenue en fatigue à 10°C-25Hz (NFEN 12697-24) sur éprouvettes trapézoïdales en mode de déformation imposée. Le critère classique de fatigue,  $N_{f50}$ , a été retenu, correspondant à une diminution de 50% de la valeur du module en cours d'essai. L'amplitude de déformation correspondant à une rupture à un million de cycles est notée dans la suite  $\varepsilon_6$  (utilisée dans la méthode française de dimensionnement SETRA-LCPC [25]).

## 6. METHODE PROPOSEE POUR L'OPTIMISATION GRANULAIRE & RESULTATS

Utiliser une discontinuité granulaire, simple voire double, peut s'avérer très efficace afin d'obtenir des enrobés denses [26] avec un empilement optimisé de gravillons (nombre de contacts gravillon-sur-gravillon maximisé, cf. Figure 3).

Dans le cadre de cette étude, une granulométrie 0/14mm discontinue 4/10mm a été investiguée à titre d'exemple, utilisant les granulats Noubleau. La Figure 4 (de gauche à droite) décrit le processus itératif d'optimisation granulaire pour le mélange quaternaire comprenant les fractions 10/14mm, 0/4mm, 0/2mm et le filler, en utilisant la presse à cisaillement giratoire (PCG) sur granulats seuls –sans bitume– comme détaillé précédemment. Cette optimisation granulaire consiste en trois séries de mesures PCG à 20 girations (au-delà de 20 girations sans bitume, les phénomènes d'abrasion ou d'attrition apparaissent, cf. Figure 5):

- la 1<sup>ère</sup> série d'essais PCG est réalisée pour déterminer le mélange binaire 10/14-0/4 optimal ( $p=80\%$  (i.e. 80% 10/14 et 20% 0/4), cf. Figure 4). Notons que du fait d'un ratio  $d_{50}(0/4)/d_{50}(10/14)=0,165$  créant quelque interférence, une légère différence existe entre les valeurs  $e(p_x)$  et  $e(p_T)$  calculées, d'une part, et les données expérimentales, d'autre part (Figure 3);

- la 2<sup>e</sup> série d'essais PCG est ensuite menée pour déterminer le mélange ternaire 10/14-0/4-0/2 optimal, qui est considéré comme un mélange binaire lors de cette 2<sup>e</sup> série d'essais: en effet, le mélange optimal précédent 80% 10/14 - 20% 0/4 est pris comme "fraction grossière", tandis que la fraction 0/2 est prise comme "fraction fine". La teneur optimale en éléments gros est 80%;

- la 3<sup>e</sup> et dernière série de tests PCG est réalisée de façon à déterminer le mélange quaternaire 10/14-0/4-0/2-filler optimal (dans ce cas,  $p_T=86,5\%$ , cf. Figure 4).

Ainsi, la méthode d'optimisation granulaire proposée aboutit au mélange quaternaire optimal 10/14-0/4-0/2-filler suivant:

- 55,3% 10/14 ( $=0,865*0,64$ )
- 13,9% 0/4 ( $=0,865*0,16$ )
- 17,3% 0/2 ( $=0,865*0,2$ )
- 13,5% de filler d'apport ( $=1-0,865$ )

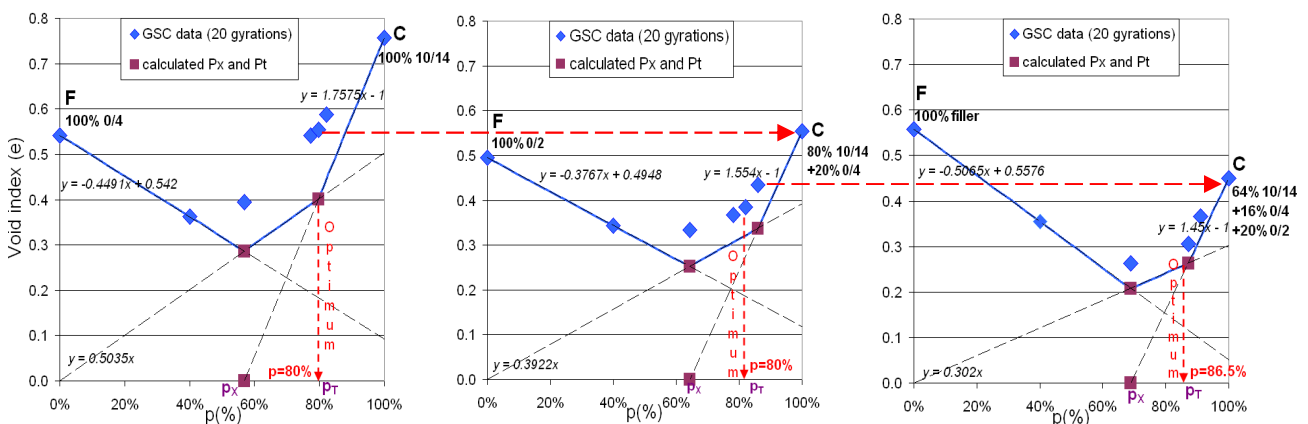


Figure 4 – Optimisation itérative en 3 étapes du mélange granulaire quaternaire Noubleau 10/14-0/4-0/2-filler.





Figure 5 – Exemple de phénomènes d'attrition, de ségrégation et d'abrasion observés à 100 girations en utilisant la presse à cisaillement giratoire (PCG).

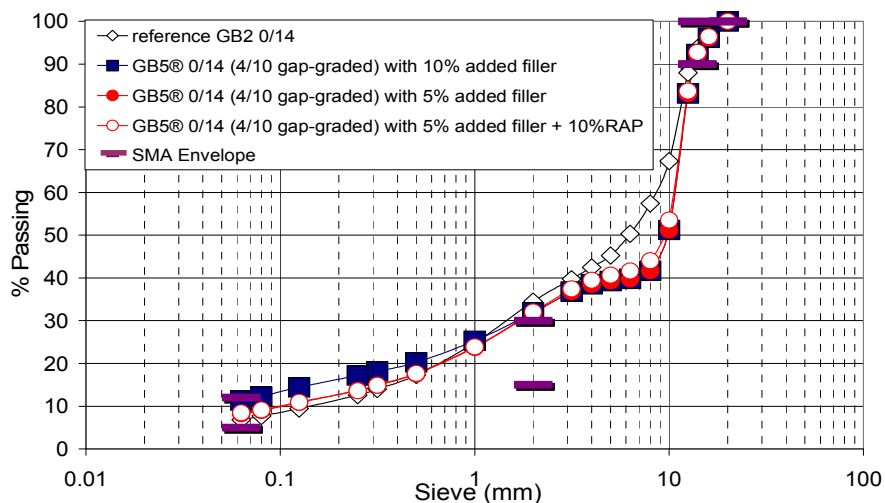


Figure 6 – Courbes granulométriques discontinues "GB5" des mélanges granulaires quaternaires "optimaux" Vs courbe granulométrique continue de référence "GB2".

Pour des raisons pratiques et économiques en centrale d'enrobage (le dosage de 10% ou plus de filler d'apport n'est pas facile sur postes discontinus et même impossible sur la plupart des postes continus), le taux de filler d'apport a été fixé à 5%. Finalement, deux granulométries discontinues ont été étudiées: la première sans recyclés comme déterminée précédemment, la seconde avec 10% de recyclés (Figure 6). La Figure 6 illustre en particulier que le passant à 2 mm des granulométries proposées est au dessus du fuseau SMA (NF EN 13108-5, 2006), ce qui est dû indirectement à la discontinuité 4/10 utilisée. De plus, le passant à 63µm est élevé, proche de 10%.

Il est possible de généraliser la technique d'optimisation granulaire précédemment introduite pour 4 fractions granulaires: dans un cas plus général, pour  $n$  fractions granulaires, la séquence d'optimisation peut être réalisée en  $n-1$  étapes.



## 7. PERFORMANCES DES ENROBES OBTENUS & DISCUSSION

Le module de richesse ( $k$ ) –lié à l'épaisseur du film de liant en surface des granulats (Corté & Di Benedetto [7], Fontana [27])– a été fixé à 2,55 pour tous les enrobés Noubleau testés. Cette valeur du module de richesse correspond ici à 3,9% de liant par rapport au poids de granulats (10% vol.). Le Tableau 3 donne les performances des enrobés discontinus denses GB5® comparés à la référence en Grave Bitume GB2 d'assise traditionnellement usitée en France. Pour comparaison, le module de richesse d'un EME2 est de l'ordre de 3,4 à 3,8.

Tableau 3 – Performances des enrobés GB5 comparés à l'enrobé GB2 de référence.  
Granulats Noubleau, teneur en liant de 3,9% / masse de granulats (%vol.=10.0%)

Formules	PCG 100 girations	Essai Duriez Ornière (mm) 3 10 <sup>4</sup> cycles	E (MPa) 15C-10Hz	$\epsilon_6$ (10 <sup>-6</sup> ) 10C-25Hz	R (MPa)		Tenue à l'eau (%)	
					%RAP	%Air		
<i>Spécifications "Grave Bitume 2" (GB2)</i>	<10%	-	>70%	<10%	>9000	>80		
<i>Spécifications "Enrobé à Module Elevé 2" (EME2)</i>	<6%	-	>70%	<7.5%	>14000	>130		
GB2	35/50	0	9,7	10,1	93	4,1	14200 à 4,1% vides	86
GB5®	35/50	0	5,9	11,8	83	5,1	16500 à 2,7% vides	89
		10	7,2	121	91	4,1	16600 à 2,7% vides	90
		0	5,7	12,3	93	2,4	15600 à 3,2% vides	110
	35/45B		5,8	12,7	92	2,5	13100 à 2,9% vides	115
	35/45B +2,5%SBS		5,7	13,1	91	3,0	13700 à 2,5% vides	130

### 7.1. Aptitude au compactage (PCG)

L'aptitude au compactage est nettement améliorée: la densité augmente de 2,3% à 4%. En revanche, l'emploi de 10% d'agrégat d'enrobé recyclé (de granulométrie continue) amenuise très légèrement la grande aptitude au compactage du mélange GB5 (7,2% de vides à 100 girations au lieu de 5,9%), indiquant des effets d'interférence non négligeables entre granulats. L'excellente aptitude au compactage de telles GB5 a été confirmée in-situ.

### 7.2. Résistance en compression & tenue à l'eau (test dit de "Sensibilité à l'eau")

La résistance en compression simple augmente de 1,2MPa à 3MPa. Concernant la tenue à l'eau ("rapport i/C"), elle se situe au delà du seuil minimal de spécification pour Grave Bitume GB2, mais ne semble pas toutefois être influencée par les granulométries ou les SBS usités.

### 7.3. Résistance à l'orniérage (Ornièreur français)

Les enrobés GB5 sont très résistants à l'orniérage du fait d'une optimisation de l'empilement granulaire (contacts gravillon-sur-gravillon maximisés) et de l'utilisation de liants semi-soufflés ou modifiés en SBS, peu susceptibles à l'orniérage à hautes températures (60°C).

#### 7.4. Module de rigidité complexe

Pour une nature et une teneur en liant fixées, l'optimisation de l'empilement granulaire apporte ici une augmentation d'environ 17% du module mesuré à 15°C-10Hz. La procédure d'empilement granulaire "optimal" présentée, appliquée aux empilements discontinus denses, pourrait semble-t-il être utilisée dans le cadre de la formulation d'enrobés à haut module sans avoir recours aux bitumes durs (de pénétrabilité très faibles à 25°C < 30dmm), améliorant ainsi la recyclabilité et la résistance en fatigue desdits enrobés.

#### 7.5. Résistance en fatigue

A nature et teneur en liant fixées, la résistance en fatigue mesurée à 10°C-25Hz ne semble pas être influencée par l'empilement granulaire. Cependant, la nature du liant bitumineux utilisé joue un rôle prépondérant: la modification en SBS (2,5% réticulé) ou l'utilisation de bitume semi-soufflé engendrent une augmentation de la valeur  $\varepsilon_6$  de l'ordre de 24-29  $10^{-6}$  individuellement et jusqu'à 44  $10^{-6}$  lorsqu'ils sont combinés. Il convient de souligner que la valeur  $\varepsilon_6$  de 130  $10^{-6}$  (à 10°C-25Hz), obtenue avec le liant 35/45B modifié avec 2,5% de SBS réticulé, est une valeur prodigieuse, en France, pour un enrobé contenant 3,9% de liant.

### 8. ALTERNATIVE ENVIRONNEMENTALE AUX EME2

Une alternative aux enrobés à haut module "EME2" à forte teneur en liant (classiquement 5,5% à 6%) est ici proposée: en effet, considérant les résultats très encourageants présentés au Tableau 3 (avec 3,9% de liant), il a été entrepris au laboratoire EIFFAGE Travaux Publics de combiner désormais les empilements granulaires dits "optimaux" et l'utilisation de bitumes de haute qualité, semi-soufflés ou modifiés en SBS, de façon à obtenir des enrobés à la fois très rigides et très résistants en fatigue, pour couches d'assise ou de liaison à la fois à longue durée de vie et économiques.

Cette démarche a été appliquée à de nombreuses natures de granulats, utilisant des granulométries présentant une ou deux discontinuités, ainsi qu'un grand nombre de liants semi-soufflés ou modifiés en SBS. Les performances ainsi obtenues sont très proches, souvent au delà des spécifications requises pour les EME2 (rigidité de 14000MPa à 15°C et tenue en fatigue de 130  $10^{-6}$  à 10°C) avec une teneur en liant beaucoup plus faible (de l'ordre de 3,8% à 4,7%). Cette formulation innovante, dénommée GB5<sup>®</sup>, a été brevetée.

Les deux sections suivantes 8.1 & 8.2 présentent une étude de cas comparative avec divers dimensionnements de chaussée & les impacts environnementaux correspondants

#### 8.1 Hypothèses de dimensionnement & de coût matières

La méthode française de dimensionnement de chaussées a été utilisée, les calculs reposant sur l'utilisation du logiciel ALIZE. Le facteur de correction  $k_c$ , utilisé pour déterminer la valeur de déformation  $\varepsilon_{t,ad}$  admissible en fond de couche d'assise GB5<sup>®</sup>, est considéré égal à 1,3 (valeur typique pour une couche d'assise française GB3/GB4). De plus, l'hypothèse  $k_c=1$  est faite pour l'enrobé à module élevé (référence EME2) qui utilise un bitume dur (Pénétrabilité à 25°C<30dmm). Pour plus de détails sur ce coefficient  $k_c$  (qui ajuste les résultats issus du calcul théorique au comportement observé sur chaussées réelles de même type), se reporter au guide technique Sétra-LCPC [28].

Afin de comparer les coûts associés aux différentes structures routières, avec assise traditionnelle EME2 ou innovante GB5<sup>®</sup>, les coûts de matières suivants ont été considérés:

- prix du bitume dur 10/20 ≈ bitume pur 35/50 + 40 à 60 €/ t
- prix du bitume 35/45B ≈ bitume pur 35/50 + 40 à 60 €/ t
- prix du bitume 35/50 + 2,5%SBS ≈ bitume pur 35/50 + 150-170 €/ t
- prix du bitume 35/45B + 2,5%SBS ≈ bitume pur 35/50 + 200-220 €/ t

Les masses volumiques apparentes (t/m<sup>3</sup>) sont, en outre, prises en compte:

- ρ(BBM): 2,42 t/m<sup>3</sup>
- ρ(GB5): 2,47 t/m<sup>3</sup>
- ρ(EME2): 2,49 t/m<sup>3</sup>

## 8.2 Dimensionnement comparatif, coût relatif et impact sur le prélèvement de ressources nobles ou sensibles

Le Tableau 4 présente un dimensionnement comparatif avec le logiciel ALIZE, pour un trafic "TC6<sub>20</sub>", une couche de surface BBM en 4cm et une plate-forme PF3. Les matériaux sont ceux listés au Tableau 3. Les impacts environnementaux (différences d'épaisseurs, de prélèvements en granulats et en bitume) et les coûts relatifs sont mis en exergue. Comme le montre l'ampleur des différences obtenues entre chaque structure considérée, les enjeux environnementaux et économiques liés aux enrobés GB5<sup>®</sup> sont considérables.

Connaissant les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) équivalent associées au granulats, au bitume pur et au bitume modifié –respectivement égales à 10, 285 et 310 kgCO<sub>2</sub>/t–, on en déduit les niveaux d'émission suivants pour les enrobés: 25,7kgCO<sub>2</sub>/t pour BBM et EME2, 20,7kgCO<sub>2</sub>/t pour GB5 35/45B et 27,1kgCO<sub>2</sub>/t pour GB5 35/50+2.5%SBS et GB5 35/45B+2.5%SBS. La structure de chaussée avec assise GB5<sup>®</sup> réduit les émissions CO<sub>2</sub> de près de 30% au m<sup>2</sup> en comparaison du dimensionnement classique EME2 (cf. Tableau 4).

Tableau 4 – Dimensionnement comparatif ALIZE des structures avec matériaux La Noubleau, coûts relatifs et impacts environnementaux

Chaussées Bitumineuses Epaissees TC6 <sub>20</sub> . Revêtement BBM 4cm. Plate-Forme PF3				
	Solution Traditionnelle	Solutions Innovantes GB5 <sup>®</sup>		
	<b>EME2</b> TL=5,7%	<b>GB5 35/45B</b> TL=3,9%	<b>GB5 35/50+2.5%SBS</b> TL=3,9%	<b>GB5 35/45B+2.5%SBS</b> TL=3,9%
C. de surface	4cm BBM	4cm BBM	4cm BBM	4cm BBM
C. d'assise	16cm EME2	14cm GB5	12cm GB5	10cm GB5
Différence d'épaisseur des couches d'assise	Référence	- 2cm (- 10%)	- 4cm (- 20%)	- 6cm (- 10%)
Différence en quantité de granulats		- 10%	- 20%	- 30%
Différence de quantité de bitume		- 28%	- 39%	- 48%
Différence relative de coût matières /m <sup>2</sup>		-23%	-27%	-38%
Différence relative de kg CO <sub>2</sub> eq. /m <sup>2</sup>		-24%	-17%	-28%

## 9. REFERENCES CHANTIERS DES ANNEES 2010-2011

Près de 10 essais de faisabilité grandeur réelle ont été réalisés sur différentes centrales d'enrobage EIFFAGE Travaux Publics en 2010. Ces essais préliminaires ont permis de valider les choix techniques avant de pouvoir généraliser ensuite la formulation GB5<sup>®</sup> sur chaque centrale EIFFAGE. La grande aptitude au compactage des enrobés GB5<sup>®</sup> a été confirmée jusqu'à aujourd'hui sur plus de 30 chantiers (Figures 7, 8 et 9).



Figure 7 – Mise en œuvre d'une GB5<sup>®</sup> 0/14 avec granulats Noubleau et bitume semi-soufflé 35/45B près de Tours. Densité en place: 96,4% ; module mesuré en compression diamétrale  $E^*(15^{\circ}\text{C}-10\text{Hz})$ : 14100MPa.



Figure 8 – Mise en œuvre d'une GB5<sup>®</sup> 0/14 avec granulats Cemex et bitume semi-soufflé 35/45B avec 35% d'agrégats d'enrobé recyclé près de Toulouse. Densité en place: 97% ; module mesuré en compression diamétrale  $E^*(15^{\circ}\text{C}-10\text{Hz})$ : 15100MPa.



Figure 9 – Chantier de 12 000 tonnes de GB5<sup>®</sup> 0/14, au liant modifié au SBS Biprene<sup>®</sup>, sur autoroute concédée A43 (AREA, section Chignin-Francin) en région alpine.



Différentes natures de granulats ont été étudiées en laboratoire et utilisées in-situ. Quatre tailles maximales de gravillons ont été testées: 11mm, 14mm, 16mm et 20mm. Des granulométries à simple ou double discontinuité ont été investiguées avec succès. Des bitumes semi-soufflés de grades 20/30, 35/50, 50/70 et 70/100 ont été utilisés, ainsi que les liants modifiés en polymères SBS de l'entreprise dénommés Biprene® (procédé avec ou sans réticulation), sur la plupart des essais en grandeur réelle en 2010-2011.

L'utilisation d'agrégats d'enrobés recyclés à des taux courants de 10% à 35% a été validée.

Les enrobés GB5® ont été appliqués au finisseur et ont été très facilement compactés aux cylindres vibrants (Figures 7 et 8). L'utilisation de compacteurs à pneus lourds n'a pas été jugée nécessaire, la densité en place étant généralement comprise entre 2,5% et 6% avec cylindres vibrants seuls. Les épaisseurs de mise en œuvre de l'enrobé GB5® étaient jusqu'à maintenant comprises entre 7cm et 16cm. Du fait des courbes granulométriques discontinues, le compactage de tels enrobés apparaît possible sur des couches de faible épaisseur (6-7cm) mais aussi de forte épaisseur (16-17cm).

Plusieurs mois après ces différents chantiers de référence, les sites ont été auscultés de façon à réaliser un suivi et prélever des carottes pour évaluation des densités et des valeurs de modules complexe ou sécant en compression diamétrale. Ce suivi est très favorable et confirme les performances élevées obtenues initialement en laboratoire.

Pour finir, dans le cadre de la procédure française d'innovation routière du SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), le projet innovant GB5® a récemment été sélectionné. En 2011, des protocoles d'encadrement de la réalisation et du suivi des chantiers expérimentaux à venir seront signés pour des chantiers d'envergure (sections routières ou autoroutières à très fort trafic), entre le SETRA, l'entreprise et des Conseils Généraux ou des sociétés autoroutières. Un suivi technique de cinq années encadré par le SETRA sera dès lors planifié pour validation de la technique innovante.

## **10.CONCLUSIONS**

Les concepts d'empilements granulaires développés initialement dans le domaine des bétons hydrauliques à hautes performances ont été transposés avec succès dans le domaine des enrobés bitumineux, avec une procédure adaptée d'emploi de la presse à cisaillement giratoire (PCG) sur granulats seuls. Les enrobés issus de cette nouvelle méthode de formulation sont notamment caractérisés par un empilement granulaire optimisé entre les gravillons (simple ou double discontinuité granulaire) et par la non-nécessité du recours aux liants durs pour satisfaire les spécifications des enrobés à module élevé EME2, en particulier le module de rigidité de 14000MPa à 15°C.

De plus, l'utilisation d'une faible teneur en bitume semi-soufflé et/ou modifié au polymère SBS (de l'ordre de 4%), combinée à l'empilement granulaire précédemment obtenu, aboutit à la formulation d'enrobé dénommée GB5® présentant à la fois une excellente aptitude au compactage, un haut module de rigidité et, avant tout, une moindre susceptibilité au vieillissement et une grande résistance à la fatigue, ce qui permet d'envisager des réductions d'épaisseur d'assise de chaussées et une meilleure durabilité.

Les résultats des essais de laboratoire sont très encourageants:

- les courbes granulométriques optimales discontinues, obtenues à partir de la méthode innovante fondée sur la presse à cisaillement giratoire (PCG), mènent à une très grande aptitude au compactage et à une augmentation de la résistance en compression et du module de rigidité. En outre, la méthode d'optimisation granulaire proposée pourrait être utilisée pour la formulation d'enrobés à module élevés (e.g. French 'EME2') avec des bitumes de grades sensiblement plus mous que de coutume (Pénétrabilité à 25°C > 30dmm), améliorant ainsi la recyclabilité et la tenue à la fatigue des enrobés bitumineux.

- l'utilisation de bitumes semi-soufflés et/ou modifiés en SBS permet d'atteindre, quant à elle, des résistances à l'orniérage et à la fatigue très élevées.

De façon plus générale, la combinaison de courbes granulométriques présentant une ou deux discontinuités avec l'emploi de bitumes semi-soufflés et/ou modifiés en SBS (à une teneur de l'ordre de 4%), donnant lieu à des mélanges bitumineux à la fois très rigides et résistants à la fatigue, a fait l'objet d'un dépôt de brevet.

Des chantiers expérimentaux en grandeur réelle ont été réalisés avec succès en France et en Espagne, dans le domaine de température des enrobés dits "à chaud" (170°C) ou "tièdes" (125°C) ou encore "semi-tièdes" (90°C).

Dans une certaine mesure, la nouvelle famille d'enrobés à hautes performances proposée, validée en laboratoire et sur le terrain, peut être considérée comme une solution technique innovante pour des chaussées durables, se détériorant peu structurellement et nécessitant seulement l'entretien régulier de la couche de roulement.

Finalement, il convient néanmoins de souligner que l'approche proposée est très différente des formulations typiques SMA ou EME2, puisque la teneur en bitume est faible (environ 4% au lieu de 5,5%-6% par rapport à la masse de granulats) tout en conservant d'excellentes performances thermo-mécaniques. La diminution de la quantité requise de bitume par tonne d'enrobé (malgré le surcoût en polymère SBS) et de l'épaisseur d'assise (due aux excellentes performances thermo-mécaniques) donne une solution très innovante d'assise de chaussée à longue durée de vie, environnementale et économique.

## References

1. A. Caquot. "Le rôle des matériaux dans le béton", Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France, pp. 562-582, July-August 1937. [In French]
2. J. Baron., R. Sauterey., "Le béton hydraulique: Connaissance et pratique", Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1982. [In French]
3. F. De Larrard. "Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances", Rapport de recherche LPC N°149, ISSN 0222-8394, March 1988. [In French]
4. F. De Larrard, T. Sedran and D. Angot. "Prediction of the Packing Density of Granular Mixtures with the Solid Suspension Model. I: Theoretical Basis and Calibration", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°194, 1994.
5. F. De Larrard, T. Sedran. "Optimization of ultra high-performance concrete by the use of a packing model". Cem. Con. Res. 24/6, 1994.
6. F. De Larrard, T. Sedran. "Mixture-proportioning of high-performance concrete". Cem. Con. Res. 32, 2002.
7. J-F. Corte, H. Di Benedetto. "Matériaux Routiers Bitumineux 1: description et propriétés des constituants", Lavoisier, 238 p., 2004. [In French]



8. K.E. Cooper, S.F. Brown, G.R. Pooley. "The design of aggregate gradings for asphalt basecourses", Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1985.
9. R. Roque, S. Huang and B.E. Ruth. "Maximizing shear resistance of asphalt mixtures by proper selection of aggregate gradation", 8<sup>th</sup> Int. Soc. for Asphalt Pavements, Seattle, 1997.
10. S. Kim, A. Guarin, R. Roque and B. Birgisson. "Laboratory Evaluation for Rutting Performance Based on the DADR Porosity of Asphalt Mixture", Road Materials and Pavement Design, Vol. 9, Issue 3, 2008.
11. H. Baaj, H. Di Benedetto and P. Chaverot. "Effect of binder characteristics on fatigue of asphalt pavement using an intrinsic damage approach", Road Materials and Pavement Design, Vol. 6, Issue 2, 2005.
12. S. Dreessen, M. Ponsardin, J-P. Planche, A-G. Dumont, M. Pittet. "Durability study: Field aging of conventional and cross-linked polymer modified bitumens", LJMU (Liverpool John Moore University) conference, 2011.
13. C.C. Furnas. "Relations between Specific Volume, Voids and Size Composition on Systems of Broken Solids of Mixed Sizes", US Bureau of Mines, Report of Investigations, 2894, pp 1-10, 1928.
14. L.W. Nijboer. "Plasticity as a Factor in the Design of Dense Bituminous Road Carpets", Elsevier Publishing Company, 1948.
15. E.J. Yoder. "Principles of Pavement Design", John Wiley and Sons, Inc., 1959.
16. P.J. Andersen V. Johansen. "A Guide to Determining the Optimal Gradation of Concrete Aggregates", SHRP-C-334 Report, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C., 1993.
17. G. Lees. "The Rational Design of Aggregate Gradings for Dense Asphaltic Compositions", Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists Conference, 1970.
18. D. Perraton, M. Meunier, A. Carter. "Application of granular packing methods to the mix design of Stone Matrix Asphalts (SMA)", Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, N°270-271, 2007.
19. F. Olard, D. Perraton, "On the optimization of the aggregate packing characteristics for the design of high-performance asphalt mixes", Road Material and Pavement Design, vol.11, Special Issue EATA Parma 2010.
20. F. Olard, D. Perraton, "On the Optimization of the Aggregate Packing for the Design of Self-Blocking High-Performance Asphalts", Congress of the International Society for Asphalt Pavements, Nagoya, 2010.
21. G. Chanvillard. "Le matériau béton : Connaissances générales", Lyon, Editions Aléas, 1999. [In French]
22. T.C. Powers. "The Properties of Fresh Concrete", John Wiley & Sons, Inc, New York, 1968.
23. L. Oger. "Etude des corrélations structure-propriétés des mélanges granulaires", Thèse d'Etat, Université de Rennes, 1987. [In French]
24. Harman T., Bukowski J.R., Moutier F., Huber G., McGennis R., "The History and Future Challenges of Gyrotory Compaction 1939 to 2001", Annual Meeting of the TRB, Washington D.C., 2002.
25. SETRA-LCPC. "French design manual for pavement structures", Ed. LCPC & SETRA, Paris, 1997.
26. F. Olard. "Innovative Design Approach for High-Performance Asphalt Concretes for Long-Life Base and Binder Courses by Use of Aggregate Packing Concepts and Polymer Modified Binders", Proceedings of the Transportation Research Board annual meeting, Washington D.C., 2011.
27. Fontana M., Di Benedetto H., Dumont G., Voies de circulation II, Chapitre 5. Cours de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998. [In French]
28. Sétra-LCPC, French design manual for pavements structures, Sétra-LCPC Publications, 1997.