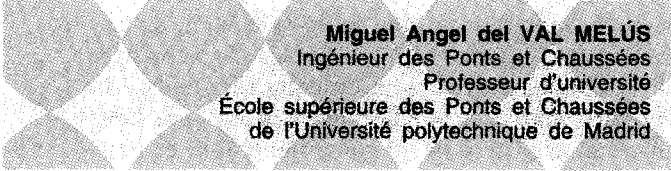


# Contribution à la mise au point d'un nouveau matériau de construction des chaussées L'enrobé bitumineux à haut module pour couches de base



Miguel Angel del VAL MELÚS  
Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Professeur d'université  
École supérieure des Ponts et Chaussées  
de l'Université polytechnique de Madrid

## RÉSUMÉ

L'article présente l'étude réalisée sur les couches de base en enrobés bitumineux à haut module entre 1991 et 1993 au Laboratoire des Ponts et Chaussées de l'Université polytechnique de Madrid, en vue d'adapter l'usage de ces matériaux au contexte espagnol.

L'étude porte sur des enrobés réalisés à partir d'un bitume de référence 60/70 et de quatre bitumes durs de natures différentes, d'un granulats calcaire d'usage répandu en Espagne et utilisé pour cette étude avec deux granularités distinctes. Les essais mécaniques usuels conduisent à retenir quatre enrobés pour lesquels on détermine les modules dynamiques et les caractéristiques en fatigue.

Une analyse structurelle effectuée à l'aide du modèle multi-couche élastique de Burmister permet alors d'estimer le gain en épaisseur obtenu dans des structures bitumineuses types avec ces enrobés à haut module par rapport aux matériaux traditionnels (jusqu'à 10 cm pour les structures sur fondation granulaires). Quelques considérations de mise en œuvre complètent l'information sur ces matériaux.

**MOTS CLÉS :** 31-52 - Enrobé - Couche de base - Bitume - Calcaire - Granulat - Essai - Mécanique - Module d'élasticité - Dynamique - Caractéristiques - Fatigue - Épaisseur - Mise en œuvre (appl.) - Espagne.

L'objet de cet article est de présenter brièvement l'étude réalisée sur des couches de base bitumineuses à haut module entre 1991 et 1993 au laboratoire des Ponts et Chaussées de l'École supérieure des Ponts et Chaussées de l'Université polytechnique de Madrid, avec la collaboration du Centre de recherches Elpidio Sánchez Marcos, S.A. Ont également participé à cette étude : l'entreprise Composán Distribución, S.A., qui a mis au point les liants bitumineux avec lesquels on a travaillé, ainsi que le Centre d'études des routes du CEDEX (Ministère espagnol de l'Équipement, des Transports et de l'Environnement), où on a réalisé les essais dynamiques de caractérisation des enrobés bitumineux.

On désigne par le terme générique d'enrobés bitumineux à haut module les enrobés possédant une rigidité d'environ deux ou trois fois supérieure à celle des enrobés bitumineux traditionnels. Déjà, dans les années 1970, on mettait au point quelques matériaux qui correspondaient à cette définition, comme des mélanges de goudron-PVC ; ils ne sont plus du tout utilisés à l'heure actuelle. Dans les années 1980, apparaissaient en France des enrobés à haut module destinés aux couches de base, à granularité continue et avec une teneur élevée en bitume dur, ce qui les rendait particulièrement résistants à la fatigue. Plus tard, on créait en France d'autres enrobés également très rigides mais avec une teneur en bitume légèrement inférieure, donc moins résistants à la fatigue et ne pouvant être employés que sur des supports également rigides. Enfin, mentionnons les enrobés à rigidité très élevée mis au point ces dernières années, et utilisés comme nouvelles couches de roulement sur des chaussées existantes. Ces couches nécessitent l'utilisation de bitumes modifiés, contrairement aux couches de base pour lesquelles, en général, on utilisait jusqu'à maintenant des bitumes purs ou avec des additifs, mais non « modifiés », au sens strict du terme.

En Espagne, l'intérêt pour ces matériaux apparaît à la fin des années 1980 ; les ingénieurs espagnols suivent l'exemple de la France mais ils sont aussi soucieux de résoudre certains problèmes structurels propres aux chaussées construites dans leur pays, et d'utiliser certains résidus bitumineux produits en grande quantité par les raffineries. C'est l'objectif que se donne Composán Distribución en 1990, après avoir étudié les caractéristiques de la production de bitume dans la raffinerie de Repsol à Puertollano.

En résumé, le but recherché est d'utiliser, pour réaliser des couches de base, des matériaux très rigides (modules de plus de 10 000 MPa, dépassant même 14 000 MPa) capables de supporter des tractions élevées tout en étant résistants à la fatigue. Ainsi, ces matériaux doivent posséder une capacité de déformation importante et pouvoir reposer sur des couches qui ne soient pas nécessairement rigides. Pour cela, on part de teneurs élevées (près de 6 %) en bitume dur (pénétrabilité à 25 °C inférieure à  $30 \cdot 10^{-1}$  mm et proche en général de  $20 \cdot 10^{-1}$  mm), de granulats possédant un indice de frottement interne et un pourcentage de fines (environ 8 %) élevés.

L'idée initiale était de disposer de couches de base plus résistantes à la fatigue que les couches de base bitumineuses traditionnelles, ne posant pas les problèmes de fissuration par retrait des couches de base traitées aux liants hydrauliques et qui de plus, devaient être mises en place sur des couches de fondation également rigides. Comme on a pu le constater, ceci conduit aussi à des structures de chaussées ayant une épaisseur totale de matériaux bitumineux plus faible, donc moins coûteuses.

Avec l'utilisation de bitumes très durs, on pourrait s'attendre à l'apparition de fissures d'origine thermique. En fait, il est très peu probable que des phénomènes de retrait thermique se produisent dans des enrobés bitumineux en Espagne, car les températures ne sont pas assez basses pour cela. Quant aux phénomènes de fatigue

thermique, ils peuvent se produire dans les couches de roulement, mais plus difficilement dans les couches de base, où les gradients thermiques sont plus atténués. Cependant, pour cette raison, il est recommandé que l'épaisseur d'enrobé recouvrant la couche de base à haut module ne soit pas trop réduite.

Après cette introduction, nous nous centrerons sur les aspects théoriques et exposerons les principales phases de l'étude :

- Sélection des bitumes : ce sujet n'a pas seulement une importance théorique mais aussi pratique. En effet, l'offre de bitumes durs est très réduite sur le marché espagnol. Par conséquent, le prix de ces matériaux est l'un des principaux facteurs qui déterminent la viabilité économique de la technique en question.
- Détermination de la granulométrie des granulats.
- Essais mécaniques traditionnels pour établir les teneurs en liant optimales.
- Essais dynamiques pour évaluer la rigidité et la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux.
- Analyses structurelles de nouvelles sections de chaussée.
- Sections expérimentales.

### Bitumes étudiés

L'étude a porté sur un bitume B 60/70 qui a servi de référence pendant toute l'étude, ainsi qu'un ensemble de liants dont les principales caractéristiques technologiques sont indiquées dans le tableau I :

- un bitume B 20/30 ;
- un mélange d'un bitume de désasphaltage obtenu avec du propane et d'une base dure obtenue par distillation sous vide ;
- un bitume modifié avec des polymères ;
- un bitume avec asphalte naturel, la gilsonite, asphalte naturel extrait des gisements du bassin de l'Uinta entre le Colorado et l'Utah (États-Unis).

TABLEAU I  
Caractéristiques technologiques des liants employés

Désignation	Description	Pénétrabilité à 25 °C ( $10^{-1}$ )	T <sub>BA</sub> (°C)	Indice de Pénétrabilité	Densité 25/25
B 60/70	Bitume traditionnel	60	49,4	- 0,9	1,029
B 20/30	Bitume traditionnel	29	56,2	- 0,9	1,034
B 20/30 R	Résidu de désasphaltage au propane plus résidu sous vide	21	59,4	- 0,9	1,050
B 20/30 M	Bitume modifié aux polymères	25	63,6	+ 0,2	1,035
B 20/30 G	Bitume avec gilsonite	24	63,0	0,0	1,039

On a préparé le mélange de bitume de désasphaltage et de la base dure dans le laboratoire du Centre de recherches Elpidio Sánchez Marcos S.A., en recherchant une valeur de pénétrabilité du mélange voisine de 20. On a écarté la possibilité d'employer un bitume de désasphaltage obtenu avec du butane, car sa pénétrabilité pratiquement nulle le rendait difficilement maniable. On lui a préféré un bitume de désasphaltage obtenu avec du propane, ayant une pénétrabilité comprise entre 7 et 10. Quant à « la base dure » employée pour ramollir, elle avait une pénétrabilité de 150/200 (la désignation « base dure » en refère au processus de distillation qui a conduit à l'obtention du bitume et non à sa pénétrabilité). Ces deux matériaux d'origine provenaient de la raffinerie de Puertollano.

En ce qui concerne le bitume avec gilsonite, on a simplement voulu explorer les possibilités d'incorporation d'asphaltes naturels. Les résultats obtenus, comme on le verra ci-après, n'ont pas été bons. Cependant, il ne faut pas en conclure que les asphaltes naturels, qui ont fait l'objet d'expériences très positives en Espagne, ne sont pas adaptés en général à ces applications. On n'a pas recherché les causes réelles de ces mauvais résultats, car il est par ailleurs difficile d'avoir un approvisionnement régulier en gilsonite.

## Granulats et fines

Dans cette étude, on a employé exclusivement un granulats provenant du concassage d'une roche calcaire, semblable à celui utilisé dans une grande partie de l'Espagne pour les couches de base des chaussées. Son coefficient Los Angeles est compris entre 25 et 30 et son équivalent de sable est légèrement supérieur à 50. Rappelons que dans certaines régions, les seuls granulats disponibles pour les couches inférieures sont de mauvaise qualité, tout au moins en théorie. C'est le cas des granites de Galice, dont les coefficients Los Angeles sont d'environ 35. Or, comme les couches de base bitumineuses à haut module offrent de grands avantages structurels, elles semblent idéales pour exploiter des granulats qui, en principe, devraient être qualifiés de médiocres.

On a analysé plusieurs granularités, et, après une série de tests, on en a sélectionné deux. La première se situe au centre du fuseau G 20 défini dans les prescriptions espagnoles. La seconde correspond approximativement à la proposition faite par différents auteurs français pour les couches de base bitumineuses à haut module. Elle se différencie de la première dans la mesure où elle est sensiblement plus fermée (semblable dans la tranche des gros éléments au fuseau S 20 des prescriptions espagnoles) et où elle possède une teneur en fines notablement supérieure. On la désignera à partir de maintenant par le terme de BAM (voir tableau II).

TABLEAU II  
Fuseaux granulométriques  
S 20, G 20 et BAM

Tamis (mm)	Passant (%)		BAM
	S 20	G 20	
25	100	100	100
20	80-95	75-95	90-100
12,5	65-80	55-75	70-90
10	60-75	47-67	60-80
5	43-58	28-46	44-62
2,5	30-45	20-35	30-44
0,63	15-25	8-20	12-24
0,32	10-18	5-14	8-18
0,16	6-13	3-9	7-14
0,080	4-8	2-6	6-10

Pour ce qui est des fines, on a d'abord utilisé uniquement celles des granulats. Cependant, les essais d'immersion-compression réalisés sur tous les enrobés ont mis en relief l'impossibilité d'obtenir une résistance résiduelle suffisante. C'est pourquoi il a fallu employer une certaine proportion de fines d'apport pour obtenir la résistance résiduelle nécessaire (au moins égale à 75 %). Notons que, comme pour la sélection du type de liant, la nature et la proportion de fines ont également une importance pratique. En effet, étant donné les pourcentages de fines dans les granulométries employées, le coût final de l'enrobé dépendra de la décision que l'on prendra à ce sujet.

## Essais mécaniques traditionnels

Les essais mécaniques traditionnels avaient pour objectif principal de comparer les compositions des mélanges et de déterminer la teneur en liant optimale dans les différents enrobés. Ces essais ont été : l'essai Marshall (norme NLT-159/86), l'essai d'immersion-compression (norme NLT-162/84) et l'essai de compression diamétrale pour évaluer la résistance en traction indirecte (norme NLT-346/90). Ce dernier essai a été réalisé sur des éprouvettes Marshall, avec une vitesse de déformation constante de 50,8 mm/min et à une température de 5 °C. On les a réalisés sur dix enrobés bitumineux différents (deux granulométries pour cinq liants).

La conclusion la plus importante après réalisation de ces essais concerne les teneurs en liant optimales. Dans le cas de la granulométrie G 20, elles sont de 3,2 et 3,5 % du poids des granulats (teneur en vides dans l'enrobé de l'ordre de 9 %). Dans le cas de la granulométrie BAM, elles varient de 5,5 à 5,8 % de teneur en liant (teneur en vides dans l'enrobé de l'ordre de 4 %).

Avec la granulométrie G 20, on obtient des enrobés d'une stabilité assez faible (stabilité Marshall d'environ 15 kN), d'une capacité de déformation réduite (déformation Marshall très inférieure à 2 mm) et d'une résistance à la traction indirecte relativement faible (un peu plus de 2 MPa à 5 °C). En revanche, avec la granularité BAM, les stabilités Marshall atteignent facilement 20 kN, la déformation Marshall dépasse dans tous les cas 2 mm et la résistance à la traction indirecte est très élevée (plus de 4 MPa à 5 °C).

Alors que les différences liées aux deux granularités étudiées sont clairement mises en évidence par ces essais mécaniques traditionnels, il n'en va pas de même pour les différences éventuelles entre les liants analysés. Le seul point qui les distingue nettement concerne les résistances résiduelles particulièrement faibles dans les enrobés fabriqués avec deux de ces liants : moins de 55 % pour le B 20/30 G et moins de 45 % pour le B 20/30 R. Dans les phases suivantes, on a utilisé ce résultat comme critère de défaillance pour rejeter le liant B 20/30 G. En revanche, on a gardé le bitume B 20/30 R pour le seul intérêt qu'il présente : celui d'exploiter un sous-produit de raffinerie.

À partir de ces résultats, on a travaillé exclusivement avec les quatre enrobés suivants :

- enrobé G 20 : granularité G 20 et 3,5 % de bitume B 60/70 (enrobé qui servira dorénavant de référence dans cette étude) ;
- enrobé BAM1 : granularité BAM et 5,8 % de bitume B 20/30 ;
- enrobé BAM2 : granularité BAM et 5,8 % de bitume B 20/30 R ;
- enrobé BAM3 : granularité BAM et 5,8 % de bitume B 20/30 M.

Avant la réalisation des essais dynamiques dont traite le paragraphe suivant, on a effectué quelques essais de résistance aux déformations plastiques (NDT : essai d'orniérage) (norme NLT- 173/84). Cependant, après avoir constaté que les enrobés étudiés ont une grande résistance aux déformations plastiques, ces essais ne présentent plus d'intérêt dans une analyse comparative puisqu'ils ne permettent pas d'établir d'éventuelles différences entre les liants. Dans le cas de la France où, en général, les enrobés bitumineux ne sont pas spécialement résistants aux déformations plastiques, il est intéressant de réaliser ce type d'essais, en particulier sur les enrobés à haut module appelés EME, de la classe 1. Ceux-ci ont justement été élaborés en prenant en compte, non pas une résistance à la fatigue élevée, mais leurs caractéristiques de résistance à l'orniérage.

## Essais dynamiques

Les essais dynamiques sur les quatre enrobés bitumineux présélectionnés ont été réalisés au Laboratoire d'infrastructure routière du Centre d'études des routes du CEDEX, dans le but de déterminer leurs modules d'élasticité et leurs lois de fatigue, et d'obtenir des données pour mener à bien les analyses structurelles des sections de chaussée comportant des enrobés à haut module en couche de base.

Pour la détermination des modules dynamiques (norme NLT-349/90), on emploie des éprouvettes cylindriques, d'éclatement égal à 2 et on les soumet à une charge axiale sinusoïdale, à une température et une fréquence prédéterminées. Au cours de l'essai, on enregistre les courbes de charge et déplacement dans la partie centrale de l'éprouvette tous les 100 cycles jusqu'à 1 000 cycles. On prend comme module dynamique dans un cycle le rapport de l'amplitude cyclique de la force sur l'amplitude cyclique de la déformation. On définit l'angle de phase comme celui existant entre les fonctions force et déformation, fonctions du type  $A \cdot \sin(2\pi Ft + B) + K$  ajustées par la méthode des moindres carrés à partir de plus de 50 points équidistants (avec A amplitude de la fonction, B angle de phase, F fréquence de la fonction de charge, t temps et K constante). On prend comme résultats finaux pour le module dynamique et l'angle de phase, la moyenne des dix mesures réalisées.

La détermination des modules complexes (modules d'élasticité et angles de phase) des enrobés étudiés a été réalisée pour les conditions indiquées dans le tableau III. Pour chaque enrobé et chaque température d'essai, on a effectué les mesures sur trois éprouvettes différentes. Les valeurs moyennes sont reportées dans le tableau IV.

Quant aux lois de fatigue en déformation, elles s'expriment sous la forme :

$$\log \varepsilon = A + B \log N \quad (1)$$

où  $\varepsilon$  est la déformation appliquée (multipliée par  $10^6$ ), N est le nombre de cycles pour lequel, avec cette déformation, il se produit une rupture du matériau (au sens où la rigidité totale de l'éprouvette est réduite de moitié).

TABLEAU III  
Caractéristiques de l'essai  
pour la détermination des modules dynamiques

Type	:	compression simple
Éprouvettes	:	cylindriques
Charge statique	:	0,3 MPa
Amplitude	:	0,3 MPa
Fréquence	:	10 Hz
Températures	:	15, 20 et 25 °C

TABLEAU IV  
**Modules dynamiques (MPa) et angles de phase (degrés)**  
**des enrobés testés à différentes températures avec une fréquence de 10 Hz**

Enrobés	15 °C		20 °C		25 °C	
	E (MPa)	Phase (degré)	E (MPa)	Phase (degré)	E (MPa)	Phase (degré)
G20	7 400	12,5	6 700	14,4	5 600	16,7
BAM1	13 100	10,9	11 400	13,8	9 700	15,5
BAM2	14 300	7,8	13 200	9,5	11 800	11,1
BAM3	12 100	10,2	11 100	12,0	9 800	13,5

TABLEAU V  
**Caractéristiques fondamentales de l'essai**  
**pour la détermination de lois de fatigue**

Type	Flexion simple Déplacement imposé
Éprouvette	Prismatique
Fréquence	10 Hz
Température	20 °C

TABLEAU VI  
**Paramètres des lois de fatigue**  
**des enrobés étudiés à une température de 20 °C**  
**et avec une fréquence de 10 Hz**

Enrobé	A	B	$\epsilon_8 (N = 10^8)$	$\epsilon_7 (N = 10^7)$	$\epsilon_6 (N = 10^6)$
G20	3,83	- 0,35	10,3	23,1	52,0
BAM1	3,24	- 0,22	41,8	66,5	105,9
BAM2	2,96	- 0,16	46,4	67,4	97,7
BAM3	3,31	- 0,21	45,8	73,8	118,2

Pour la détermination de la loi de fatigue à déplacement imposé, on utilise des éprouvettes prismatiques, fixes à leurs extrémités et soumises en leur centre à un déplacement qui varie dans le temps selon une loi sinusoïdale. Les éprouvettes mesurent  $300 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ , et sont obtenues en sciant des éprouvettes fabriquées par vibrocompression et mesurant  $300 \times 300 \times 50 \text{ mm}^3$ . Pour établir chaque loi de fatigue, il faut tester au moins dix éprouvettes. On les dispose dans une chambre thermostatée, et on place au centre de leur paroi inférieure un extensomètre. La presse, à commande servohydraulique, possède une capacité de charge au moins égale à 2,5 kN, et peut travailler avec une fréquence d'au moins 10 Hz. On commence l'essai dans des conditions déterminées de fréquence et de température, que l'on maintient jusqu'à la fin de l'essai. L'amplitude totale du déplacement peut varier en général entre 80  $\mu\text{m}$  et 350  $\mu\text{m}$ . On enregistre la valeur de la force nécessaire pour maintenir le déplacement constant aux cycles 200, 700, 1 200, 1 700,... jusqu'à la fin de l'essai que l'on fixe au cycle N, atteint lorsque la valeur de l'amplitude cyclique de la force calculée dans

ce cycle est inférieure ou égale à la moitié de la valeur de l'amplitude correspondant au cycle 200. La loi de fatigue est déterminée par ajustement au moyen de la méthode des moindres carrés, à partir de couples de valeurs : moitié de l'amplitude cyclique de la fonction de déformation au cycle 200 et nombre de cycles N pour lequel on met fin à l'essai.

La procédure d'essai a été suivie avec les paramètres donnés par le tableau V. Quant au tableau VI, il indique les paramètres A et B des lois de fatigue pour chacun des quatre enrobés étudiés, ainsi que les déformations (exprimées en microdéformations) qui provoquent la rupture à des valeurs déterminées de N ( $10^6$ ,  $10^7$  et  $10^8$  cycles).

## Analyse structurelle

Dans cette phase de l'étude, on a analysé différentes sections de chaussée comportant une couche de base en matériaux bitumineux à haut module possédant un comportement structurel apparemment équivalent à celui de diverses sections de l'Instruction 6.1 et 2 IC. Dans tous les cas, on a supposé que le sol de fondation était de catégorie E2 (module d'Young retenu pour le calcul de 100 MPa).

On a pris deux groupes de sections de ladite Instruction. Le premier était formé de sections à base de matériaux bitumineux reposant sur des couches de fondation granulaires en grave concassée (GA) : sections 021, 121 et 221. Le deuxième était composé de sections à base de matériaux bitumineux reposant sur des sols de fondation traités au ciment (SC) : sections 023, 123 et 223. On a pris comme hypothèse l'emploi d'enrobés S 20 pour la couche de surface et d'enrobés G 20 pour les couches de base. En conclusion, les sections servant de référence étaient les suivantes :

021 12 cm S20 + 23 cm G20 + 20 cm GA  
 121 12 cm S20 + 18 cm G20 + 20 cm GA  
 221 15 cm S20 + 10 cm G20 + 20 cm GA  
 023 12 cm S20 + 18 cm G20 + 20 cm SC  
 123 15 cm S20 + 10 cm G20 + 20 cm SC  
 223 6 cm S20 + 12 cm G20 + 22 cm SC

Pour leur part, les sections supposées équivalentes, ayant une couche de base en matériaux bitumineux à haut module, se composaient dans tous les cas d'une couche de roulement S 20 de 6 cm d'épaisseur, de la couche de base à haut module (BAM) et de 20 cm de GA ou de SC.

Pour la réalisation de l'étude comparative des différentes sections, on a utilisé un logiciel reposant sur un modèle multicouche de type Burmister. Les caractéristiques des matériaux introduites dans le modèle figurent dans le tableau VII. Dans le cas des matériaux bitumineux entrant dans la composition des couches de base, les valeurs adoptées sont celles qu'on a obtenues dans la phase précédente pour une température de 20 °C.

Quant aux conditions d'adhérence (totale ou nulle) adoptées entre couches, elles sont indiquées dans le tableau VIII. L'étude a été effectuée en partant des hypothèses habituelles pour ce type d'analyse. Dans le cas des sections en sol traité au ciment, on a envisagé les deux options possibles pour l'interface entre la couche inférieure et l'enrobé bitumineux. Entre les couches bitumineuses et les couches non traitées (gravier ou sols de fondation), la situation pourrait varier selon les cas et pour une même section au cours du temps : si l'imprégnation est bien réalisée, ce qui n'est pas facile, l'adhérence peut être pratiquement totale dans la première phase ; cependant, la grande différence de rigidité entre les couches en contact tendra à les séparer et à réduire sensiblement l'adhérence. En conséquence, on a adopté ici l'hypothèse la plus pessimiste où l'adhérence serait nulle. Cela est acceptable puisque, dans tous les cas de figure, la couche critique parmi les sections analysées est celle de l'enrobé bitumineux en contact avec une couche granulaire ou avec le sol de fondation.

Pour l'analyse de la fatigue des enrobés G 20, BAM1, BAM2 et BAM3, on a utilisé les lois données dans le paragraphe précédent. La loi de fatigue considérée pour l'enrobé bitumineux S 20 est la suivante ( $\epsilon$  en  $10^{-6}$ ) :

$$\lg \epsilon = 3,4 - 0,14 \cdot \lg N \quad (2)$$

Pour exprimer en pourcentage la déformation verticale de compression  $\epsilon_z$  à la surface du sol de fondation, la loi de fatigue utilisée est celle proposée par Brown et Pell :

$$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28} \quad (3)$$

Dans le cas de la grave concassée, on a pris comme critère de rupture les décompactages locaux dus aux tractions à la base de la couche. On peut supposer que ce type de détérioration ne

TABLEAU VII  
Caractéristiques élastiques des matériaux considérées dans le modèle multicouche

Couche	Module d'élasticité (MPa)	Coefficient de Poisson
S20	5 600	0,33
G20	6 700	0,33
BAM1	11 400	0,25
BAM2	13 200	0,25
BAM3	11 000	0,25
SC	5 000	0,30
GA	250	0,40
E2	100	0,40

TABLEAU VIII  
Conditions d'interface adoptées dans le modèle multicouche

Couche supérieure	Couche inférieure	Condition d'interface
Enrobé bitumineux	Enrobé bitumineux	Collée
Enrobé bitumineux	GA/E2	Décollée
Enrobé bitumineux	SC	Collée/Décollée
SC	E2	Décollée
GA	E2	Collée

se produit pas quand, en valeur absolue, la contrainte horizontale de traction ( $\sigma_h$ ) n'excède pas la somme de la contrainte verticale de compression ( $\sigma_z$ ) et de la contrainte due au propre poids des matériaux situés au-dessus. En exprimant celle-ci approximativement en fonction de l'épaisseur  $h$  de la couche de gravier, le critère de rupture est le suivant :  $\sigma_h \leq \sigma_z + 2,2 \cdot h \cdot 10^{-4}$ , avec  $h$  exprimé en cm et  $\sigma_h$  et  $\sigma_z$  exprimés en MPa.

Quant à la loi de fatigue utilisée pour les couches de sol-ciment, elle était la suivante :

$$\sigma_h/R_f = 1 - 0,065 \cdot \lg N \quad (4)$$

$\sigma_h$  étant la contrainte horizontale de traction dans la fibre inférieure et  $R_f$  la résistance à la traction par flexion du sol traité au ciment (0,75 MPa).

Dans l'analyse, on considère que deux sections sont équivalentes quand elles peuvent supporter le passage d'un même nombre d'essieux  $N$ . Le

tableau IX présente l'équivalence entre sections quand les couches inférieures sont en matériaux granulaires. Pour les sections avec sol traité au ciment, on a étudié deux cas, comme nous l'avons déjà dit : avec une adhérence nulle entre le sol-ciment et la couche de base bitumineuse, d'une part, et avec une adhérence totale entre les deux, d'autre part. Les équivalences entre sections dans ce cas figurent dans le tableau X.

**TABLEAU IX**  
**Équivalence entre sections de l'Instruction**  
**avec couche de fondation granulaire et sections**  
**avec couche de base bitumineuse à haut module**  
**(épaisseurs en cm)**

Section de l'instruction	Sections à couche de base en matériau bitumineux à haut module			
021	12 S20	6 S20	6 S20	6 S20
	+	+	+	+
	23 G20	18 BAM1	15 BAM2	13 BAM3
	+	+	+	+
	20 GA	20 GA	20 GA	20 GA
121	12 S20	6 S20	6 S20	6 S20
	+	+	+	+
	18 G20	15 BAM1	13 BAM2	11 BAM3
	+	+	+	+
	20 GA	20 GA	20 GA	20 GA
221	15 S20	6 S20	6 S20	6 S20
	+	+	+	+
	10 G20	12 BAM1	11 BAM2	8 BAM3
	+	+	+	+
	22 GA	20 GA	20 GA	20 GA

**TABLEAU X**  
**Équivalence entre sections de l'Instruction**  
**avec couche de fondation en sol traité au ciment**  
**et sections avec couche de base bitumineuse**  
**à haut module (épaisseurs en cm)**

Section de l'instruction	Sections à couche de base en matériau bitumineux à haut module*			
023	12 S20	6 S20	6 S20	6 S20
	+	+	+	+
	18 G20	16/22 BAM1	15/22 BAM2	16/20 BAM3
	+	+	+	+
	20 SC	20 SC	20 SC	20 SC
123	15 S20	6 S20	6 S20	6 S20
	+	+	+	+
	10 G20	15/16 BAM1	15 BAM2	15/16 BAM3
	+	+	+	+
	20 SC	20 SC	20 SC	20 SC
223	6 S20	6 S20	6 S20	6 S20
	+	+	+	+
	12 G20	11/13 BAM1	12 BAM2	13 BAM3
	+	+	+	+
	20 SC	20 SC	20 SC	20 SC

\* Dans les lignes indiquant l'épaisseur des couches de base à haut module, la limite inférieure correspond à l'hypothèse d'une adhérence nulle entre la couche et le sol-ciment ; la limite supérieure est celle qu'on obtient dans l'hypothèse d'une adhérence totale.

## La fabrication et la mise en œuvre

Depuis 1992, on a réalisé en Espagne quelques sections expérimentales avec des couches de base en matériau bitumineux à haut module. Il s'agit aussi bien de chaussées nouvelles que de chaussées renforcées, sur des routes à trafic T3 ou T2 faible. Il est encore trop tôt pour tirer des conclusions sur le comportement de ces sections, mais l'expérience semble positive. Cependant, comme nous l'avons fait remarquer précédemment, le domaine d'application des couches de base en matériau bitumineux à haut module serait plutôt celui des routes à trafic T1 ou T0.

En ce qui concerne les procédures de fabrication et de mise en œuvre, il faut souligner qu'on travaille avec des enrobés tout à fait traditionnels, à ceci près qu'en raison de la dureté du bitume, les températures doivent être légèrement supérieures dans les trémies de stockage du bitume (165-175 °C) et à la sortie de l'enrobé de la centrale (175-185 °C). Durant le compactage, la température minimale est également un peu plus élevée (140-150 °C). Pour le reste, la procédure de répannage est identique à celle de tout autre enrobé. Le compactage est obligatoirement énergique (il combine normalement des rouleaux vibrants avec des compacteurs à pneus) et peut parfois être plus simple puisque la haute teneur en bitume a un effet lubrifiant. Normalement, les épaisseurs des couches de base à haut module que l'on met en œuvre peuvent varier, selon les cas, entre 8 et 16 cm. Même si, avec les moyens habituellement disponibles, il n'est pas difficile de répandre en une seule couche des épaisseurs de 15 ou 16 cm, il est préférable de procéder à un répannage en deux couches quand l'épaisseur excède 13 cm, et ce, pour différentes raisons (pour obtenir un meilleur uni superficiel, par exemple).

## Considérations finales

Tous les avantages des couches de base en matériau bitumineux à haut module pourront vraiment être mis en évidence lorsqu'on commencera à les utiliser sur les autoroutes et les routes express. Cette initiative devrait être encouragée par les administrations responsables, plutôt que par les entreprises incitant à l'emploi de variante dans le projet des ouvrages qui leur ont été adjugés. Dans ce cas-là, il faudra résoudre avant tout le problème de la fourniture du liant en quantité suffisante, avec les garanties de qualité et d'homogénéité nécessaires, et bien sûr à un prix raisonnable.

En ce qui concerne les études préalables de formulation, elles peuvent s'appuyer sur des recherches générales comme celle que nous avons pré-

sentée dans cet article. Cependant, une étude rigoureuse exige la caractérisation des enrobés qui vont être effectivement utilisés dans l'ouvrage (en comptant avec les matériaux disponibles). Cela suppose la réalisation des essais dynamiques correspondants, pour la détermination de modules et de lois de fatigue.

Le problème du dimensionnement des sections serait résolu si l'on intégrait des sections avec des couches de base en matériau bitumineux à haut module dans le catalogue de l'Instruction. De plus, cela inciterait à les utiliser. Cependant, on pense qu'il ne faut pas le faire trop rapidement. Cette affirmation peut paraître paradoxale après ce que nous avons dit, mais il est très important de ne pas homologuer trop tôt des techniques dont on ne connaît pas le comportement à long terme. En effet, comme cela s'est produit récemment en Espagne avec d'autres matériaux, certains échecs, tout au moins apparents, provoquent un énorme retard dans la mise au point d'une technique, ce que ne souhaitaient certainement pas les personnes qui ont insisté pour l'inclure dans l'Instruction.

En résumé, il faut promouvoir la conception et la construction de sections de chaussée avec des couches de base en matériau bitumineux à haut module sur tous les types de routes, en s'appuyant sur les études préalables et les contrôles nécessaires, pour inclure ces sections dans l'Instruction uniquement après avoir acquis une expérience assez grande.

## Conclusion

□ Pour la fabrication d'enrobés bitumineux à haut module, il faut employer des liants très durs. En principe, ces liants peuvent être des bitumes traditionnels, des bitumes modifiés ou des mélanges de bitume de désasphaltage et de base dure. Les résultats qu'on obtiendra dépendront non seulement de la pénétrabilité, mais aussi de l'ensemble de leurs caractéristiques rhéologiques. Par ailleurs, il faut recourir à des granulats concassés, ayant une granularité continue et une haute teneur en fines (de l'ordre de 8 %).

□ Avec les essais mécaniques traditionnels, on peut établir les teneurs en liant optimales et rejeter les enrobés dont le comportement est visiblement mauvais. Cependant, avec ces essais, il n'est pas possible d'établir les avantages des enrobés à haut module.

□ Les teneurs en liant pour couches de base ne doivent jamais représenter moins de 5,5 % du poids des granulats.

□ Pour établir avec précision les caractéristiques mécaniques des enrobés à haut module, il faut

effectuer des essais dynamiques qui permettent de déterminer modules d'élasticité et lois de fatigue. À une température de 20 °C, le module des enrobés étudiés se situe entre 11 000 et 13 500 MPa, à peu près le double de celui des enrobés bitumineux traditionnels employés habituellement dans des couches de base. Les lois de fatigue obtenues sont similaires à celles des enrobés de type S 20 et sont sensiblement supérieures à celles des enrobés de type G 20. En conséquence, les enrobés à haut module peuvent remplacer avantageusement les enrobés de type G 20 utilisés habituellement dans des couches de base bitumineuses. On peut même les considérer comme une solution de remplacement aux couches traitées avec des liants hydrauliques.

□ En plus des essais dynamiques qui ont mis en évidence les caractéristiques mécaniques, les analyses structurelles démontrent la viabilité pour des trafics lourds de nouvelles sections de chaussée possédant des couches de base à haut module. Si l'on dispose une couche de roulement d'enrobé bitumineux traditionnel de 6 cm, l'épaisseur nécessaire pour la couche de base à haut module est de l'ordre de 13 à 18 cm pour une structure correspondant à un trafic lourd et reposant sur une couche de fondation granulaire. Cela signifie une réduction de plus de 10 cm de l'épaisseur totale des enrobés bitumineux. Avec des couches de fondation en sol-ciment, la couche de base à haut module aurait une épaisseur d'environ 15 cm, ce qui permettrait de réduire d'environ 5 cm l'épaisseur totale des enrobés bitumineux.

□ Les sections expérimentales réalisées corroborent ce que nous avons dit précédemment et démontrent que la fabrication et la mise en œuvre des enrobés à haut module pour couches de base ne posent pas de problème particulier. Les expériences doivent s'étendre aux autoroutes et aux routes express. Cependant, il n'est pas recommandé d'inclure pour le moment dans la réglementation ces nouvelles structures.

## — RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES —

- AFNOR, *Enrobés hydrocarbonés. Couches d'assises : enrobés à module élevé*, Norme NF P 98-140, Paris.
- BARDESI A. (1994), *Bases de alto módulo*, Jornada sobre mezclas de alto módulo, CEDEX y Centro de Investigación E.S.M., Madrid.
- COSTA A. (1992), *Mezclas bituminosas de alto módulo (MAM). Utilización como capa de base en carreteras nueva construcción y refuerzo de firmes*, Jornadas sobre subbases y bases par firmes de carreteras, Santiago de Compostela.
- DUVAL J. (1989), *Structures bitumineuses à haut pouvoir de renforcement*, 4e Symposium Eurobitume, Madrid.



- GARCIA CARRETERO, J. MARTIN N. (1992), Fisuración de capas de mezclas bituminosas en firmes flexibles, *Ingeniería Civil*, **84**, pp. 43-52, Madrid.
- GERMAN F.-M., STOTZEL M. (1985), *Nouvelle génération des bétons bitumineux pour l'établissement et le renforcement des chaussées*, 3e Symposium Euro-bitume, Delft.
- GOACOLOU H., DIMITRI A., PRUDHOMME F., GEORGE L.A. (1992), *Use of subnormal local aggregates in high modulus asphalt mixes*, 7th International Conference on Asphalt Pavements, volume 3, pp. 132-147, Nottingham.
- GROSSE P., AZOUS J.-J. (1993), Aéroport Charles-de-Gaulle. Rechargement de la piste n° 1, *Revue générale des Routes et des Aéroports*, **704**, pp. 56-61, Paris.
- LEBRET R., LEBRAS A. (1987), Nouveaux produits pour couches de base. Les enrobés à très haut module, *Génie Urbain*, **12**, Paris.
- LEGAL Y. et al. (1990), Allongement de la piste d'Ajaccio. Structure de chaussée innovante, *Revue générale des Routes et des Aéroports*, **673**, pp. 65-69, Paris.
- MARSOT A. (1993), Enrobés à haut module et liants modifiés, *Revue générale des Routes et des Aéroports*, **711**, pp. 39-41, Paris.
- MIRO R. (1991), Nuevos criterios y técnicas de conservación en carreteras metropolitanas, *Carreteras*, **54**, pp. 39-53, Madrid.
- MORO J. (1992), *Mezclas de alto módulo*, I° Congreso de Firmes Flexibles, pp. 279-289, Valladolid.
- PETRONGARIJ.-P. et al. (1992), Contournement de Saint-Chamond. Réalisation des chaussées, *Revue générale des Routes et des Aéroports*, **701**, pp. 32-40, Paris.
- POTTI J.J., RUBIO B. (1993), Mezclas bituminosas de alto módulo, *Carreteras*, **63**, pp. 61-69, Madrid.
- RUIZ A. (1994), *Caracterización de las mezclas de alto módulo*, Jornada sobre mezclas de alto módulo, CEDEX y Centro de Investigación E.S.M., Madrid.
- SERFASS J.P., BAUDUIN A., GARNIER J.F. (1992), *High modulus asphalt mixes. Laboratory evaluation, practical aspects and structural design*, 7th International Conference on Asphalt Pavements, volume 1, pp. 275-288, Nottingham.
- SERVICE D'ÉTUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET DES AUTOROUTES (1988), *Renforcements en enrobés à module élevé en traversée d'agglomération*, Guide Technique, Paris.
- SICARD J., MARTIN C., MEUNIER Y. (1993), Aéroport Charles-de-Gaulle. Le renforcement de la piste 1, un chantier exceptionnel, *Revue générale des Routes et des Aéroports*, **704**, pp. 62-66, Paris.
- VERHÉE F., DELORME J.-L. (1991), Enrobés classiques et à module élevé. Bilan de comportement des enrobés à module élevé, *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, **172**, pp. 43-46, Paris.
- VIVIER H., DEGUINES J.-P. (1986), Les enrobés à haut module. Application à la rocade sud de Salbris, *Revue générale des Routes et des Aéroports*, **633**, pp. 31-39, Paris.

### Remerciements

*Cette étude a bénéficié de l'aide financière de la Commission Interministérielle espagnole des Sciences et des Techniques (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología - CICYT) obtenue par l'intermédiaire de l'Association espagnole des Laboratoires d'essai sur le Bâtiment (Asociación de Investigación de Laboratorios de Construcción (AILAC) [projet MAT 91-0120]).*

*Je tiens à remercier les personnes qui m'ont apporté une aide capitale pendant la réalisation de cette étude et sans qui cet article n'aurait pu voir le jour : M. Jaime Gordillo et M. Ramón Tomás, du Centre de recherches Elpidio Sánchez Marcos, S.A., m'ont engagé à entreprendre cette recherche, ont défini ses objectifs et ont obtenu l'aide financière nécessaire pour la réaliser ; M. Alberto Bardesi, de Composán Distribución, S.A., a fourni les liants bitumineux et a donné à mon travail la cohérence nécessaire pendant la phase finale ; M. Aurelio Ruiz m'a autorisé à réaliser les essais dynamiques dans le Laboratoire d'infrastructure routière qu'il dirige à l'intérieur du Centre d'études des routes du CEDEX ; enfin, je remercie tout particulièrement M. Félix Pérez González qui était, il y a encore quelques mois, maître assistant à l'Université polytechnique de Madrid. C'est lui qui a effectué les calculs pour l'élaboration des nouvelles propositions de sections de chaussée.*

NOTA : *Cet article a été publié en espagnol dans la revue Carreteras (n° 73 de septembre-octobre 1994). Il débute une série d'échanges de publications entre cette revue et le Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées.*

NDLR

## **ABSTRACT**

### **Contribution to the development of a new pavement construction material High-modulus bituminous mix for base courses**

M. A. DEL VAL MELÚS

The article deals with the study conducted on high-modulus bituminous mix base courses between 1991 and 1993 at the highway engineering laboratory of the Madrid Polytechnic University in order to adapt the use of these materials to the Spanish context.

The study covers bituminous materials made from a 60/70 reference bitumen and four hard bitumens of different kinds, a calcareous aggregate widely used in Spain and employed for this study with two different gradations. The usual mechanical tests lead to the adoption of four mixes for which the dynamic moduli and the fatigue properties are determined.

Structural analysis performed by means of the Burmister elastic multi-layer model then makes it possible to estimate the gain in thickness obtained in typical bituminous structures with these high-modulus mixes in relation to conventional materials (up to 10 cm for granular base structures). Some considerations relative to laying operations complete the information on these materials.