

Performances des EME et BBME : bilan des études de formulation

Khalid EL AZDI

*[Centre d'Etudes et de Recherches des Infrastructures de Transport], [Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes], [Maroc],
[elazdi@lpee.ma]*

RÉSUMÉ :

La formulation des mélanges hydrocarbonés en général et des enrobés à module élevé en particulier relève d'une démarche empirique qui consiste à chercher le meilleur compromis entre plusieurs paramètres pour atteindre les objectifs fixés par la norme.

La nature des constituants (granulats et bitume), leur composition, le taux de fines ou de passants à 2 mm, la teneur en bitume sont autant de paramètres qu'il convient de fixer de façon optimale pour garantir des performances pour la plupart antagonistes.

L'étude de formulation au laboratoire est une étape cruciale avant tout démarrage de chantier. Elle conditionne le déroulement de ce dernier et constitue un gage pour garantir la pérennité de la chaussée construite.

Dans cette communication, on se propose de faire le bilan de cinq années d'expérience en termes d'études de formulation au laboratoire des EME et BBME en rappelant la démarche suivie, les contraintes liées à ces études notamment en ce qui concerne les délais nécessaires souvent assez longs et en faisant état des plages de performances obtenues eu égard des spécifications fixées. L'objectif ultime est d'apprécier le degré de difficulté ou non de l'atteinte des objectifs fixés par les normes et les cahiers de charges.

1- Introduction

Depuis quelques années déjà, et face à l'accroissement de trafic et à l'augmentation de son agressivité au sein du réseau national, les maîtres d'ouvrage se sont orientés vers des mélanges hydrocarbonés à hautes performances tels que les enrobés à module élevé (EME) ou les bétons bitumineux à module élevé (BBME) respectivement pour les couches d'assises et de roulement. Ces mélanges permettent un gain substantiel en termes d'épaisseur et donc de consommation des granulats et permettent d'assurer un grand apport structurel améliorant ainsi la durabilité des chaussées.

La formulation de ce type d'enrobés est réalisée en suivant un processus de laboratoire visant à rechercher la composition optimale permettant d'atteindre les meilleures performances possibles ou du moins les exigences fixées par les cahiers des charges ou les normes produits correspondantes.

Le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes a été sollicité dans ce sens à chaque fois et a pu cumuler un certain nombre de données lui permettant aujourd'hui de faire un bilan aussi bien des résultats obtenus en ayant recours à des granulats marocains et en utilisant différents types et classes de bitume.

Par ailleurs, il est intéressant également de faire état de certaines difficultés rencontrés parfois pour atteindre les spécifications exigées ainsi que des difficultés opérationnelles liées aux délais de réalisation de ce type d'études de formulation qui ne sont pas toujours pris en compte.

2- La démarche de l'étude de formulation

L'épreuve de formulation a pour objet de définir la composition granulaire, le pourcentage de liant et éventuellement celui des ajouts susceptibles d'atteindre les performances requises définies par la norme produits correspondante.

Après une première phase d'identification des intrants, l'épreuve de formulation qui se déroule au laboratoire comprend des séquences d'essai adaptées. Ainsi, il est possible de distinguer quatre niveaux de formulation :

Niveau 1 : Il consiste à examiner le pourcentage des vides à la Presse à cisaillement giratoire et sur la tenue à l'eau du mélange. Le niveau 1 est suffisant dans les cas courants de trafics faibles ou moyens sans sollicitation particulière.

Niveau 2 : Il comprend les essais de niveau 1, complétés par un essai d'orniérage. Il correspond aux formules destinées à des chaussées soumises à des contraintes particulières, en relation avec des problèmes d'orniérage tel le cas d'une chaussée supportant un trafic élevé, un trafic lent, canalisé ou en épaisseur forte.

Niveau 3 : Introduit en plus un essai à caractère structurel, la détermination du module de rigidité dans des conditions fixées.

Niveau 4 : Ce niveau prend en compte la résistance à la fatigue.

Le niveau 0 correspond à la phase d'identification des matériaux de base et la composition du mélange granulaire.

3- Considérations liées aux délais de réalisation des études de formulation

En fonction du niveau choisi des épreuves de formulation, le délai peut varier de quelques jours à quelques semaines. Il dépend du niveau de l'épreuve comme présenté sur le tableau 1 d'une part et du nombre d'itérations nécessaires à chaque niveau pour atteindre les performances fixées. Les niveaux 3 et 4 sont les niveaux qui demandent le plus de temps en raison de la complexité des essais de module et fatigue ajoutée au délai nécessaires pour la confection des corps d'épreuve.

Niveau d'épreuve	Essai	Qté de matériau	Durée de l'essai	Préparation	Durée totale y/c préparation
0	Masse volumique des granulats	3 Kg par fraction granulaire	1j	Séchage	2 j
	Analyse granulométrique	3 Kg par fraction granulaire	1 j	Séchage	2 j
1	Duriez	20 Kg	8 j	Séchage + mélange	10 j
	PCG	30 Kg	1 j	Séchage + mélange	2 j
Total niveau 1		40 à 60 Kg			12 j
2	Orniérage 2 plaques 30 000 cycles	50 Kg	3 j	Confection + mûrissement + Mva	7j
Total niveau 2		110 Kg			15 j
3	Module complexe ¼ fréquences	80 Kg	4 j	Confection + sciage + mûrissement + Mva + collage	18 j
Total niveau 3		200 Kg			21 j
4	Fatigue	200 Kg	15 j	Confection + sciage + mûrissement + Mva + collage	25 j
Total niveau 4		400 Kg			30 j

Il est important de signaler à ce stade l'incompatibilité de des délais des études de formulation notamment celles de niveau 4 et des délais du cahier des charges travaux pour la remise de telles études. En effet, la période de préparation des travaux étant de trois mois en général pour des chantiers d'une certaine taille, il est très difficile de s'inscrire dans ces délais en ce qui concerne les études de formulation pour les raisons suivantes :

- La plupart des entreprises routières ne disposant pas de leurs propres carrières fait que la phase de recherche de carrières, d'établissement des contrats fournisseurs, de réglage des concasseurs, d'établissement des fuseaux de régularité est consommatrice d'une grande partie de ce délai de trois mois et l'étude de formulation est souvent entamée en fin de la période de préparation ;
- Le bitume, notamment lorsqu'il s'agit de bitume modifié, est fourni par des fournisseurs de l'entreprise adjudicataire avec toutes les difficultés de coordination que cela suppose pour produire un bitume devant conduire aux performances requises du premier coût ;
- Les spécifications parfois inadaptées car ne tiennent pas en compte les caractéristiques des matériaux disponibles dans la région.

4- Considérations liées aux coûts des études de formulation

Mener une étude de formulation de niveau 4 exige la réalisation d'un nombre très important d'essai de complexité et de coût divers. Le nombre des essais à faire avoisine 88 essais répartis comme suit :

Désignation	Quantité	Observation
Analyse granulométrique d'un granulat	15	5 échantillons par classe
Mesure de coefficient d'aplatissement d'un granulat	10	5 échantillons par classe de gravillon
Mesure de la propreté superficielle d'un granulat	10	5 échantillons par classe de gravillon
Essai Los Angeles	2	5 échantillons par classe de gravillon
Essai micro deval	2	5 échantillons par classe de gravillon
Essai au bleu de méthylène d'un sable	5	5 échantillons par classe de sable
Essai d'équivalent de sable à 10% de fines	5	5 échantillons par classe de sable
Essai de friabilité des sables	1	Par nature de sable
Coefficient d'écoulement du sable	1	Par nature de sable
Indice des vides RIGDEN	1	Par nature de sable
Pouvoir absorbant des fines	1	Par nature de sable
Pouvoir rigidifiant des fines	1	Par nature de sable
Masse volumique réelle pré séchée	1	Par nature de sable
Masse volumique réelle des granulats	3	1 échantillon par classe granulaire
coefficient du polissage accélère	1	Etude pour couche de roulement
Détermination Pourcentage des surfaces cassées dans les gravillons	10	Pour granulat alluvionnaire
Pénétrabilité	1	-
Point de ramollissement bille et anneaux	1	-
Densité relative à la méthode du pycnomètre	1	-
Perte de la chaleur	1	-
Point d'éclair	1	-
Ductilité à 25°C	1	-
Retour élastique	1	Pour les bitumes modifiés
Stabilité au stockage	1	-
RTFOT	1	-
Point de fragilité fraass	1	-
essai d'adhésivité des granulats	1	Si les granulats d'origine quartzique
PCG	3	Etude de niveau 1
Essai duriez	2	Etude de niveau 1
Essai d'orniérage	1	Etude de niveau 2
Essai de module complexe	1	Etude de niveau 3 (série de 4 éprouvettes)
Résistance à la fatigue	1	Etude de niveau 4 (série de 18 éprouvettes)
Total des essais	88	--

L'investissement en matériel nécessaire à l'exécution de l'ensemble de ces essais dépasse 10 Millions de dirhams et le temps en jours homme n'est pas loin de 30 jours-hommes.

Tout ce qui précède fait que le coût de ces études est relativement important et la perception de l'entreprise ne se fait pas toujours en tenant en compte les aspects signalés. De ce fait, l'entreprise doit veiller à la rentabilisation de ce type d'études et leurs réutilisation dans plusieurs chantiers à travers la maîtrise de la régularité des produits de base et à éviter autant que possible la multiplication de ses sources d'approvisionnements. Dans ce cas de figure, une simple vérification pourrait être suffisante au démarrage des travaux.

5- Rappel des spécifications

Les normes produits relatives à l'EME et au BBME auxquelles font référence les cahiers de charges sont respectivement la norme NF P 98-140 et la norme NF P 98-141 version 1999. Les principales performances exigées sont rappelées ci-après :

5-1- Enrobé à module élevé EME :

Module de richesse : Les valeurs minimales du module de richesse figurent dans le tableau suivant :

Classe d'EME 0/10-0/14 ou 0/20	EME classe 1	EME Classe 2
Module de richesse K	2,5	3,4

Pourcentage des vides : il doit être inférieur à valeurs consignées ci-dessous :

Essai de compactage à la PCG	EME classe 1	EME Classe 2
- à 80 girations pour un EME 0/10 - à 100 girations pour un EME 0/14 - à 120 girations pour un EME 0/20	=< 10%	=<6%

Performances mécaniques : Le mélange doit permettre d'aboutir aux performances suivantes :

Essai de compactage à la PCG	EME classe 1	EME Classe 2
Rapport r/R (Essai Duriez)	=>0,70	=>0,75
Essai d'orniérage	=<7,5%	
Module complexe à 15°C, 10 Hz	=>14 000	
Essai de fatigue (déformation à 106 cycles, 10°C, 25 Hz)	=>100	=>130

5-2- Béton bitumineux à module élevé BBME :

Module de richesse : Les valeurs minimales du module de richesse figurent dans le tableau suivant :

Type du BBME	BBME 0/10	BBME 0/14
Module de richesse K	3,5	3,3

Pourcentage des vides : il doit être inférieur à valeurs consignées ci-dessous :

Essai de compactage à la PCG	BBME 0/10	BBME 0/14
- à 10 girations	>=11%	>=11%
- à 60 girations	5 à 10%	--
- à 80 girations	--	4 à 9%

Performances mécaniques : Le mélange doit permettre d'aboutir aux performances suivantes :

Essai de compactage à la PCG	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Rapport r/R (Essai Duriez)	=>0,80		
Essai d'orniérage	=<10%	=<7,5%	=<5%
Module complexe à 15°C, 10 Hz	=>9 000	=>12 000	
Essai de fatigue (déformation à 106 cycles, 10°C, 25 Hz)	=>110	=>100	

6- Bilan des études de formulations réalisées : cas de l'EME et du BBME

6-1- Approche méthodologique :

Il s'agit de l'analyse et l'exploitation des données issues des études réalisées entre 2013 et 2017 à l'occasion de divers chantiers et à travers tout le Maroc. Un ensemble de 50 études de formulation ont été examinées. Elles sont relatives aux produits bitumineux suivants :

- 19 études de formulation d'EME 0/14 ;
- 11 études de formulation de BBME 0/10 ;
- 20 études de formulation de BBME 0/14 ;

Pour chacune des études mentionnées, ont été examinés successivement :

- a- Sur le plan du mélange minéral : les pourcentages des différents granulats, le pourcentage des agrégats d'apport, les ajouts de ciment ou de filler ;
- b- Sur le plan du liant utilisé : sa classe, sa pénétrabilité, son point de ramollissement bille et anneau, son retour élastique quand cela est requis ainsi que le pourcentage adopté dans le mélange et le module de richesse correspondant ;
- c- Sur le plan des performances mécaniques : les caractéristiques Duriez, PCG, module et fatigue.

Dans les paragraphes qui suivent, il ne sera pas tenté d'établir des corrélations entre les différents paramètres du fait que cette analyse est issue d'études de formulation réelles. Une telle tentative aurait supposé la nécessité de fixer des paramètres et étudier l'évolution des autres caractéristiques ce qui n'est pas l'objet de cette communication. L'objectif étant de faire un constat sur les tendances actuelles en matière de formulation de ce type d'enrobés et d'apprécier la plus ou moins difficulté éventuelle à atteindre les performances exigées.

6-2- Principaux constats :

6-2-1 : Cas de l'EME

a- Classe granulaire de l'EME :

Dans la quasi-totalité des formules étudiées, la classe retenue est celle d'un EME 0/14 exception d'une seule formule testée qui correspond à un EME 0/10. Toutes les formules testées correspondent par ailleurs à un EME classe 2.

b- Composition granulaire :

Dans les formules étudiées, le recours aux agrégats d'enrobés reste relativement limité (5 formules sur 19 soit près de 20% des cas étudiés).

Dans le cas général, Trois à quatre classes granulaires sont utilisés pour la composition du mélange minéral : un à deux sables et deux gravillons. Le recours à un deuxième sable est requis quand le premier n'est pas suffisamment fillerisé. Avec des variations plus ou moins importantes, le pourcentage global du sable avoisine en moyenne 48% de la formule alors que les gravillons en constituent les 52% restants. En revanche, la courbe granulométrique du mélange, caractérisée par les passants à 63 microns, à 2 mm et à 6,3 mm, est assez stable comme le montre tableau ci-dessous avec :

- Un pourcentage de fines allant de 4,9 à 7,7% avec une moyenne de 6,0% ;
- Un pourcentage de passants à 2 mm allant de 24 à 35% avec une moyenne de 30% ;
- Et un pourcentage de passants à 6,3 mm variant de 45 à 61% avec une moyenne de 54%.

N° Formule	S1	S2	S1+S2	G1	G2	%fines	<2mm	<6,3mm
F1-2	45		45	25	30	6,4	31	49
F1-4	45		45	30	25	6,9	31	56
F1-6	35		35	30	35	5,8	28	45
F1-7	45		45	20	35	7,7	31	48
F1-9	40	15	55	15	30	5,1	26	54
F1-10	50		50	20	30	5,5	29	61
F1-11	50		50	20	30	6,9	31	56
F1-12	50		50	20	30	6,6	30	58
F1-13	45		45	25	30	4,9	33	52
F1-14	45		45	30	25	7,4	24	54
F1-15	40	15	55	20	25	5,3	29	56
F1-16	45		45	30	25	5,2	29	52
F1-18	45	15	60	15	25	5,3	33	54
F1-19	30	20	50	25	25	5,4	35	58
Min			35	15	25	4,9	24	45
Max			60	30	35	7,7	35	61
Moyenne			48	23	29	6,0	30	54

Dans le cas du recours aux agrégats (fraisât) dont l'apport est fixé à 20% car au-delà, des études spécifiques sont nécessaires, le sable ou les sables constituent près de 35% du mélange et le complément (45%) est apporté par les deux autres gravillons. Le taux de fines, les passants à 2 mm et à 6,3 mm sont sensiblement les mêmes que ceux obtenus dans le cas de formules sans agrégats.

N° Formule	S1	S2	S1+S2	G1	G2	Fraisât	%fines	<2mm	<6,3mm
F1-1	25	10	35	20	25	20	6,1	31	52
F1-3	35		35	20	25	20	5,4	31	56
F1-5	32		32	20	28	20	6,4	35	55
F1-8	35		35	20	25	20	6,4	34	54
F1-17	25	10	35	25	20	20	6,8	32	57
Min			32	20	20	20	5,4	31	52
Max			35	25	28	20	6,8	35	57
Moyenne			34	21	25	20	6,2	33	55

c- Nature et teneur en bitume

Le bitume utilisé pour la série des études de formulation examinées est exclusivement un bitume pur de classe 20/30 avec une pénétrabilité allant de 20 à 28 1/10 mm et une température bille et anneaux variant de 57 à 63 °C avec une moyenne de 59°C.

Les dosages de bitume retenus pour les 19 formules étudiés oscillent entre 5,6 et 5,9% pour des modules de richesse de 3,49 à 4,81 exclusion faite de la formule F1-12 pour laquelle la recherche de module a conduit à travailler avec un taux de bitume relativement faible et en acceptant une compactabilité à la PCG inférieure aux limites spécifiées.

Il est à noter que même pour les formules intégrant des agrégats d'enrobés, les dosages en bitume restent sensiblement les mêmes que ceux adoptés pour les formules sans agrégats (cas des formules F1-1, F1-3, F1-5, F1-8 et F1-17).

N° Formule	Pénétrabilité (en 1/10 mm)	Température bille et anneaux (en °C)	% bitume	module de richesse
F1-1	28	57	5,8	3,60
F1-2	23	59,5	5,8	3,49
F1-3	22	60	5,6	3,65
F1-4	20	59	5,6	3,63
F1-5	26	61,5	5,85	3,71
F1-6	23	59,5	5,6	3,63
F1-7	20	61	5,7	3,52
F1-8	28	58	5,8	4,81
F1-9	20	58	5,8	3,88
F1-10	22	58	5,6	3,65
F1-11	21	59	5,8	3,69
F1-12	25	58,6	5,2	3,28
F1-13	20	63	5,7	3,69
F1-14	20	61,8	5,7	3,68
F1-15	20	61,8	5,7	3,72
F1-16	25	58,4	5,7	3,80
F1-17	23	58,4	5,8	3,72
F1-18	28	58,6	5,8	3,74
F1-19	22	58	5,6	3,6
Min	20	57	5,2	3,28
Max	28	63	5,9	4,81
Moyenne	23	59	5,7	3,71

Tous les modules de richesse sont supérieurs à la valeur spécifiée qui est de 3,4 à l'exception d'une seule formule où cette valeur est de 3,28. A noter que dans la quasi-totalité des formules étudiées ce module dépasse largement la valeur de 3,4 en atteignant 3,8 et ce dans une recherche d'atteinte de la résistance à la fatigue qui est avantagée par la plus grande richesse en bitume.

d- Compactabilité à la PCG

Le pourcentage de vides à 100 girations varie, pour les formules étudiées, entre 2 et 6% avec une moyenne de 4% si l'on exclut la formule F1-12. Ces niveaux de vides sont compatibles avec celui préconisé par la norme correspondante qui est de 6% pour un EME de classe 2.

N° Formule	compacité 100G
F1-1	97
F1-2	95
F1-3	98
F1-4	98
F1-5	98
F1-6	97
F1-7	97
F1-8	95
F1-9	95
F1-10	97
F1-11	--

N° Formule	compacité 100G
F1-12	90
F1-13	94
F1-14	95
F1-15	95
F1-16	94
F1-17	95
F1-18	95
F1-19	94
Minimum	90
Maximum	98
Moyenne	95

e- Tenue à l'eau : Essai Duriez

Pour toutes les formules, l'essai Duriez permet d'atteindre des résistances à sec variant de 11,7 à 18,5 MPa avec des rapports Rh/Rs très homogènes de 0,7 à 0,9. En effet, l'essai Duriez pour ce type de formule ne paraît pas être très discriminant et les résultats obtenus sont presque toujours conformes aux exigences en termes de sensibilité à l'eau.

N° Formule	Rs	Rh/Rs
F1-1	13,4	0,8
F1-2	14,5	0,8
F1-3	13,4	0,8
F1-4	15,4	0,9
F1-5	14,6	0,8
F1-6	13,2	0,8
F1-7	15,4	0,8
F1-8	15,0	0,8
F1-9	16,3	0,8
F1-10	18,5	0,9
F1-11	14,2	0,8

N° Formule	Rs	Rh/Rs
F1-12	16,3	0,7
F1-13	12,2	0,8
F1-14	14,9	0,8
F1-15	11,7	0,8
F1-16	13,7	0,8
F1-17	12,1	0,8
F1-18	14,2	0,9
F1-19	15,3	0,8
Min	11,7	0,7
Max	18,5	0,9
Moyenne	14,4	0,8

f- Résistance à l'orniérage

La résistance à l'orniérage à 30 000 cycles pour les formules étudiées varie 1,13 à 5,28%. Ces valeurs sont, pour toutes les formules, inférieures au seuil exigé par la norme qui est de 7,5%.

N° Formule	prof ornière 30 000 cycles en %
F1-1	1,25
F1-2	2,46
F1-3	1,13
F1-4	3,16
F1-5	1,9
F1-6	5,28
F1-7	2,28
F1-8	2,25
F1-9	2,22
F1-10	1,64
F1-11	2,68

N° Formule	prof ornière 30 000 cycles en %
F1-12	1,99
F1-13	2,6
F1-14	2,12
F1-15	3,29
F1-16	4,46
F1-17	3,37
F1-18	1,47
F1-19	1,92
Min	1,13
Max	5,28
Moyenne	2,50

g- Modules et résistance à la fatigue

Les valeurs de module et fatigue présentées dans le tableau ci-dessous sont :

- Conformes pour un EME classe 2 pour 15 formules sur 19,
- Non conformes pour 4 formules sur 19 : 3 cas pour le module et 1 cas pour la fatigue.

N° Formule	Module en MPa	Fatigue en micro déf
F1-1	15 205	138
F1-2	15 868	
F1-3	14 691	133
F1-4	14 957	133
F1-5	15 778	141
F1-6	13 250	132
F1-7	16 142	
F1-8	15 389	136
F1-9	14 844	113
F1-10	16 404	
F1-11	16 591	

N° Formule	Module en MPa	Fatigue en micro déf
F1-12	14 273	
F1-13	10 596	
F1-14	16 704	
F1-15	15 457	
F1-16	14 619	132
F1-17	14 180	134
F1-18	12 092	
F1-19	14 288	133
Min	10 596	113
Max	16 704	141
Moyenne	14 807	132

6-2-2 : Cas du BBME

a- Classe granulaire du BBME :

Les classes granulaires choisies pour le BBME sont soit un 0/10 soit un 0/14.

b- Composition granulaire :

Dans les formules étudiées, les courbes du mélange sont caractérisées par :

	BBME 0/10			BBME 0/14		
	Min	Max	Moyenne	Min	Max	Moyenne
% des fines	5,0	7,5	6,0	4,3	6,6	5,6
Passants à 2 mm	24,0	34,7	29,4	25,0	33,0	29,5
Passants à 6,3 mm	53,1	73,0	62,8	46,0	59,0	53,0

Comme on peut le remarquer, les formules 0/10 sont plus sableuses que les formules 0/14.

c- Nature et teneur en bitume

Le bitume utilisé est dans la plupart des cas un bitume modifié. Un bitume dur de classe 20/30 est également utilisé. Dans le cas de recours à un bitume modifié, les valeurs du retour élastique se situent entre 62 et 94% avec une moyenne de 75%.

La teneur en bitume pour les deux classes de BBME se situe entre 5,2 et 6,1 avec une moyenne de 5,7% pour le BBME 0/10 et 5,4% pour le BBME 0/14.

Formule	Classe	type bitume	pene	tba	Retour élastique	% bitume	module de richesse
F2-2	0/10	20/30	22	58	--	5,7	3,75
F2-11	0/10	20/30	22	58	--	5,83	3,64
F3-7	0/14	20/30	25	58	--	5,5	3,54
F3-17	0/14	20/30	23	58,4	--	5,4	3,47
F3-19	0/14	20/30	21	59,8	--	5,6	3,92
F2-1	0/10	BM	32	61	76	6,1	3,63
F2-3	0/10	BM	27	70	88	5,7	3,6
F2-4	0/10	BM	35	71	63,5	5,5	3,54
F2-5	0/10	BM	33	86,5	76	5,6	3,6
F2-6	0/10	BM	33	86,5	76	5,5	3,56
F2-7	0/10	BM	26	76,8	62	5,5	3,37
F2-8	0/10	BM	40	70,4	81	5,4	3,53

F2-9	0/10	BM	37	86,5	86	5,6	3,64
F2-10	0/10	BM	33	60,2	69	5,8	3,64
F3-1	0/14	BM	--	78,4	89	5,4	3,44
F3-2	0/14	BM	--	78,4	89	5,4	3,46
F3-3	0/14	BM	27	61,0	--	5,7	3,65
F3-4	0/14	BM	21	91,0	94	5,4	3,52
F3-5	0/14	BM	20	80,0	79	5,5	3,68
F3-6	0/14	BM	27	81,0	90	5,3	3,53
F3-8	0/14	BM	20	78,0	86	5,7	3,53
F3-9	0/14	BM	29	75,0	75	5,4	3,46
F3-10	0/14	BM	30	87,5	94	5,6	3,45
F3-11	0/14	BM	21	81,0	75	5,5	3,54
F3-12	0/14	BM	12	70,8	75	5,2	3,61
F3-13	0/14	BM	42	60,0	62	5,3	3,61
F3-14	0/14	BM	18	81,5	75	5,6	3,68
F3-15	0/14	BM	33	75,2	75	5,3	3,44
F3-16	0/14	BM	35	62,0	71	5,2	3,67
F3-18	0/14	BM	--	87,4	84,5	5,6	3,6
F3-20	0/14	BM	25	68,8	69	5,2	3,52
Minimum			12	58	62	5,2	3,37
Maximum			42	91	94	6,1	3,92
Moyenne			27	73	78	5,5	3,57

d- Compactabilité à la PCG

Le pourcentage des vides à 10 girations pour toutes les formules est supérieur à 11% préconisé par la norme et le pourcentage à 60, 80 et 100 girations se situe entre 5,3 et 7,7%.

Formule	Classe	comp 10G	comp 60G	comp 80G	comp 100G
F2-2	0/10	84,6	90,9	--	--
F2-11	0/10	82,5	89,9	--	--
F3-7	0/14	84,4	--	93,2	--
F3-17	0/14	82,7	--	91,1	91,9
F3-19	0/14	83,2	94,4	--	96,6
F2-1	0/10	85,8	93,1	--	--
F2-3	0/10	82,7	90,8	--	93,0
F2-4	0/10	82,9	90,1	91,3	--
F2-5	0/10	82,8	91,4	92,8	--
F2-6	0/10	82,9	91	92,3	--
F2-7	0/10	86,8	93,6	--	95,5
F2-8	0/10	87,1	93,9	--	95,8
F2-9	0/10	83,1	90,9	92,2	--
F2-10	0/10	81,4	89,4	--	--
F3-1	0/14	87,1	--	--	95,4
F3-2	0/14	85,1	--	--	93,3
F3-3	0/14	85,3	--	--	94,5
F3-4	0/14	84,1	--	92,1	--
F3-5	0/14	85,0	--	93,7	--
F3-6	0/14	84,0	--	91,7	--
F3-8	0/14	85,8	--	94,9	--
F3-9	0/14	87,8	--	96,3	--
F3-10	0/14	84,3	--	93,4	--
F3-11	0/14	84,4	--	92,9	--

F3-12	0/14	86,6	94,5	95,6	--
F3-13	0/14	85,8	93,6	--	94,7
F3-14	0/14	86,9	95,4	--	96,3
F3-15	0/14	85,2	92	92,8	--
F3-16	0/14	87,2	94,9	96,1	--
F3-18	0/14	83,8	90,4	91,1	--
F3-20	0/14	86,0	93,7	94,9	--
Minimum		81,4	89,4	91,1	91,9
Maximum		87,8	95,4	96,3	96,6
Moyenne		84,8	92,3	93,2	94,7

e- Tenue à l'eau : Essai Duriez

Pour toutes les formules, le rapport r/R satisfait aux conditions de la norme sur les BBME à l'exception d'une seule formule où ce rapport est de 0,77.

Formule	Classe	Rs	Rh/Rs
F2-2	0/10	16,57	0,81
F2-11	0/10	15,82	0,85
F3-7	0/14	12,47	0,86
F3-17	0/14	11,82	0,80
F3-19	0/14	17,24	0,77
F2-1	0/10	13,5	0,82
F2-3	0/10	11,21	0,85
F2-4	0/10	14,08	0,80
F2-5	0/10	11,96	0,80
F2-6	0/10	10,22	0,82
F2-7	0/10	11,22	0,87
F2-8	0/10	14,48	0,81
F2-9	0/10	10,17	0,84
F2-10	0/10	16,37	0,86
F3-1	0/14	13,90	0,83
F3-2	0/14	13,50	0,83
F3-3	0/14	14,50	0,84

Formule	Classe	Rs	Rh/Rs
F3-4	0/14	13,52	0,85
F3-5	0/14	14,27	0,81
F3-6	0/14	12,60	0,80
F3-8	0/14	13,41	0,83
F3-9	0/14	14,70	0,81
F3-10	0/14	12,33	0,8
F3-11	0/14	16,18	0,84
F3-12	0/14	17,74	0,85
F3-13	0/14	13,28	0,83
F3-14	0/14	14,30	0,87
F3-15	0/14	13,99	0,81
F3-16	0/14	13,08	0,81
F3-18	0/14	14,30	0,85
F3-20	0/14	12,34	0,81
Minimum		10,17	0,77
Maximum		17,74	0,87
Moyenne		13,71	0,83

f- Résistance à l'orniérage

Pour toutes les formules testées, la profondeur d'orniérage à 30 000 cycles est largement respectée puisqu'elle se situe entre 1,39 et 3,39% correspondant à une spécification pour un BBME de classe 3 (<5%).

Formule	Classe	prof ornière 10000	prof ornière 30000
F2-2	0/10	--	1,49
F2-11	0/10	1,91	2,67
F3-7	0/14	--	2,47
F3-17	0/14	1,91	2,96
F3-19	0/14	2,61	3,09
F2-1	0/10	--	3,39
F2-3	0/10	1,18	1,39
F2-4	0/10	--	1,87
F2-5	0/10	2,36	2,79
F2-6	0/10	1,13	1,39

Formule	Classe	prof ornière 10000	prof ornière 30000
F3-4	0/14	--	2,04
F3-5	0/14	--	1,97
F3-6	0/14	--	2,77
F3-8	0/14	--	2,22
F3-9	0/14	--	1,92
F3-10	0/14	--	2,44
F3-11	0/14	--	1,40
F3-12	0/14	--	--
F3-13	0/14	2,36	2,82
F3-14	0/14	2,05	2,4

F2-7	0/10	1,55	2,31
F2-8	0/10	2,1	2,67
F2-9	0/10	1,65	1,97
F2-10	0/10	1,84	2,47
F3-1	0/14	--	3,18
F3-2	0/14	--	2,48
F3-3	0/14	--	3,34

F3-15	0/14	1,62	2,33
F3-16	0/14	2,06	3,19
F3-18	0/14	1,54	2,2
F3-20	0/14	2,01	2,57
Minimum		1,13	1,39
Maximum		2,61	3,39
Moyenne		1,87	2,41

g- Modules et résistance à la fatigue

Pour commenter les résultats obtenus, il est à noter que la plupart des cahiers des charges font référence à un BBME classe 2 donc un module supérieur à 12 000 MPa et une résistance à la fatigue supérieure à 100 micro-déf.

Sur les 31 formules de BBME testées, près du tiers (10 formules) n'ont pas permis d'atteindre le module requis. Il se situe dans ce cas entre 7000 et 11 000 MPa.

A noter que du fait que la plupart des cahiers des charges n'exigent qu'une étude de niveau trois, il n'a pas été possible d'analyser statistiquement les valeurs de fatigue obtenues. Les trois formules pour lesquelles le niveau d'étude a été de 4 sont toutes supérieures à 100 micro-déf.

Formule	Classe	Bitume	Module	Fatigue
F2-2	0/10	20/30	12 343	--
F2-11	0/10	20/30	13 167	128
F3-7	0/14	20/30	12 951	--
F3-17	0/14	20/30	12 469	144
F3-19	0/14	20/30	14 156	--
F2-1	0/10	BM	12 067	--
F2-3	0/10	BM	8 800	--
F2-4	0/10	BM	7 179	--
F2-5	0/10	BM	10 626	--
F2-6	0/10	BM	8 739	--
F2-7	0/10	BM	9 493	--
F2-8	0/10	BM	13 061	--
F2-9	0/10	BM	9 260	--
F2-10	0/10	BM	12 387	--
F3-1	0/14	BM	13 952	--
F3-2	0/14	BM	12 240	--
F3-3	0/14	BM	12 415	--

Formule	Classe	Bitume	Module	Fatigue
F3-4	0/14	BM	12 317	--
F3-5	0/14	BM	12 855	--
F3-6	0/14	BM	14 533	--
F3-8	0/14	BM	12 703	--
F3-9	0/14	BM	10 333	--
F3-10	0/14	BM	12 170	--
F3-11	0/14	BM	12 154	--
F3-12	0/14	BM	10 600	--
F3-13	0/14	BM	13 282	--
F3-14	0/14	BM	11 474	--
F3-15	0/14	BM	12 205	--
F3-16	0/14	BM	12 081	--
F3-18	0/14	BM	12 445	164
F3-20	0/14	BM	10 394	--
Minimum			7 179	128
Maximum			14 533	164
Moyenne			11 769	145

7- Conclusion

Mener des études de formulation pour les produits type EME et BBME suppose la réalisation d'un nombre considérable d'essais allant de l'identification des matériaux de base jusqu'à l'évaluation des performances mécaniques des dits produits. Le délai et le coût de ces études est à prendre en compte lors de la planification des travaux.

Le secteur des granulats et des liants hydrocarbonés étant, pour le moment assez peu organisé en termes de régularité de fabrication, les entreprises sont amenées, pour chaque chantier de procéder à une nouvelle étude de formulation. Ceci ne permet pas la réutilisation de formules préétablies pouvant amener à optimiser le délai et le coût de ces études.

Les données précédemment exposées et qui découlent des études de formulation réalisées au cours des cinq dernières années au LPEE permettent de conclure à ce qui suit :

- L'étude de la compactabilité à la PCG est une étape importante qui permet de faire un premier choix de la composition à tester. Cet essai ne présente pas, en général, une difficulté particulière puisqu'on arrive assez aisément à varier deux paramètres (la proportion de la fraction sableuse et le pourcentage en bitume) pour aboutir à une formule compactable. Il est à noter dans ce sens, que l'on est amené parfois à déroger aux valeurs de consignes dans l'objectif d'améliorer les performances mécaniques de l'enrobé.
- L'essai de sensibilité à l'eau, ne paraît pas, sur la base des études réalisées, être un essai suffisamment discriminant à même de permettre le choix entre plusieurs formules. Les valeurs obtenues sont toujours bonnes. Par contre, il nous semble plus pertinent, pour l'évaluation de la sensibilité à l'eau, de vérifier l'affinité liant-granulat à travers l'essai d'adhésivité.
- Le recours à des formules présentant moins de 50% de sable et un passant à 2 mm ne dépassant pas 30% a permis de s'affranchir du phénomène d'orniérage en adoptant des formules rugueuses présentant un bon frottement interne. Les résultats obtenus sont toujours satisfaisants.
- Les performances mécaniques : module et fatigue, ne sont pas toujours facilement atteintes et plusieurs tentatives sont souvent nécessaires pour y arriver. Dans ce sens, il est à préciser que :
 - o Le module de l'EME fixé à 14 000 MPa est généralement atteint surtout quand on a recours à un bitume dur. La résistance à la fatigue, quand elle est demandée, est plus ou moins facilement obtenue.
 - o Le module du BBME fixé à 12 000 MPa est, quant à lui, plus difficilement atteignable et l'étendue des valeurs obtenues est importante (7 000 à 12 000 MPa). Les formules validées l'ont été avec des valeurs dépassant de très peu 12 000 MPa. Sur ce point et devant cette difficulté, se pose la question de la pertinence de cette spécification ou du moins son niveau si l'on tient compte que cet enrobé est destiné à la couche de roulement. Pour cette dernière, il nous semble que la résistance à l'orniérage, en plus d'être nécessaire, est suffisante pour assurer un bon comportement de la couche de roulement. La recherche de couches trop rigides en surface peut d'ailleurs conduire à un vieillissement plus rapide et une fissuration par le haut de ce type d'enrobés.

Sur la base de ce qui précède, il est recommandé de :

- Mieux tenir en compte le délai et le coût des études de formulation dans la planification et l'exécution des travaux ;
- Encourager l'organisation des carrières et des usines de modification des liants pour assurer une régularité à même de favoriser le recours à des formules pré-étudiées. Une simple vérification des intrants avec quelques essais mécaniques pourraient être dans ce cas suffisants ;
- Réfléchir sur les spécifications à adopter notamment en ce qui concerne le module exigé pour les BBME. Les études de dimensionnement ou les études de variantes se feront alors sur la base des valeurs de module arrêtées.