

Etude Comparative de L'effet D'ajout de Fillers Calcaires, Fillers de Basalte et de Ciment sur un Béton Bitumineux Semi-grenu (BBSG)

Mababa Diagne

*Institut des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques
Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Laboratoire de des Géomatériaux
BP 5396 Dakar-Fann, Sénégal
E-mail: mababa.diagne@ucad.edu.sn
Tél.: +(221) 33 825 25 30*

Pape Ousmane Diédhiou

*Institut des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques
Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Laboratoire de des Géomatériaux
BP 5396 Dakar-Fann, Sénégal
E-mail: mababa.diagne@ucad.edu.sn
Tél.: +(221) 33 825 25 30*

Dominique Benoit Diouf

*Responsable Service Géotechnique Eiffage Sénégal
Avenue Félix Éboué x Route des Brasseries, BP 737 – Dakar
E-mail: dominique.diouf@eiffage.com
Tél: + (221) 338397339; Fax: +(221) 33 8327152*

Résumé

L'étude comparative de l'effet d'ajout de fillers sur un béton bitumineux semi-grenu (BBSG) de classe 0/14 a servi de support pour cette étude. Les fillers calcaires, les fillers de basalte et le ciment ont été utilisés. Ils sont ajoutés au mélange bitumineux à des doses régulières, ensuite les caractéristiques mécaniques de ce dernier sont déterminées par les essais Marshall et Duriez. L'étude Marshall, réalisée sur le mélange sans ajout de fillers, nous a permis de déterminer un teneur en liant optimale de 5,2%. L'essai Duriez effectué sur le mélange à la teneur en liant optimale de 5,2% montre que la tenue à l'eau ($r/R = 0,87$) est supérieure à la valeur minimale exigée de 0,75. De même, sa compacité égale à 92,8% est comprise dans l'intervalle de valeurs exigées, 92 - 96%.

Les résultats des essais Marshall et Duriez, réalisés sur les mélanges incorporés de fillers, montrent une amélioration des performances. Les meilleures performances sont obtenues avec les fillers calcaires. Il apparaît, par rapport au mélange sans fillers, qu'à 3% de fillers calcaires et 5,2% de bitume, des augmentations de 12,6% de la stabilité (2212 à 2494 kg), 2% de la compacité Marshall (95,02 à 97,01%) et une baisse de 0,03 mm du fluage. Aussi, la tenue à l'eau est améliorée de 4,6% (0,87 à 0,91) et la compacité augmente de 1%.

Ces dosages correspondent à un rapport fines/bitume dans le mélange compris entre 1,55 et 1,7 et une teneur en fines dans le mélange compris entre 8,1 et 8,7 %.

L'étude montre également que l'ajout de fillers de calcaires et de basalte permet de diminuer la teneur en liant tout en maintenant des performances acceptables. Cependant, un surdosage en fillers (> 5%) entraîne une baisse de performances. Par contre, l'ajout de ciment baisse les stabilités Marshall des mélanges.

Motsclés: Formulation, Béton Bitumineux, Fillers, Calcaire, Basalte, Marshall, Duriez

Abstract

The comparative study of the effect of the addition of fillers on a bituminous concrete (BBSG) of class 0/14 mm served as support for this research. Limestone fillers, basalt fillers and cement were used. They are added to the mixture with regular mixing rates, and then the mixture's characteristics are determined by Marshall and Duriez tests. The Marshall study carried out without the addition of fillers enabled us to determine the optimal binder content of 5.2%.

The Duriez test carried out on the mixture with an optimum binder content of 5.2% shows its strength in water ($r/R = 0.87$) greater than the minimum value required of 0.75, and its compactness of 92.8% between 92 and 96%, the values required by the standard.

The results of Marshall and Duriez tests carried out on the incorporated fillers mixtures show an improvement of the performance. The best one is obtained with limestone fillers. Indeed, it appears, with respect to the mixture without fillers, with only 3% of limestone fillers and 5.2% bitumen, increases of 12.6% of the stability (2212 to 2494 kg) and 2% of Marshall compactness (95.02 to 97.01%) and a decrease of 0.03 mm in creep. Also, the water strength is improved by 4.6% (0.87 to 0.91) and the compactness increases by 1%.

These mixing rates correspond to a ratio of fines over bitumen in the mixture between 1.55 and 1.7, and a fines content of the mixture between 8.1 and 8.7%. The study also shows that adding limestone fillers and basalt fillers reduces the binder content while maintaining acceptable performance. However, an overdose of fillers (> 5%) leads to a decrease of the performances. The addition of cement reduces the Marshall stability values of the mixtures.

Keywords: Formulation, Bituminous Concrete, Fillers, Limestone, Basalte, Marshall, Duriez

1. Introduction

La route constitue une voie de communication très utilisée et sa conception reste une tâche assez délicate en fonction du changement des matériaux utilisés. L'amélioration de la durabilité des chaussées routières de même que la réduction des coûts de leur réalisation demeurent un grand défi pour les entreprises tant lors de la conception de chaussées neuves que lors de la restauration d'anciennes chaussées. La mise en œuvre des couches de surface, en particulier la couche de roulement, la couche la plus exposée aux agressions du climat et du trafic, reste une étape très importante pour l'obtention de chaussées durables. La couche de roulement est élaborée à partir d'enrobés ou matériaux hydrocarbonés parmi lesquels le béton bitumineux est le plus utilisé. Cette couche doit présenter des qualités d'usage précises pour le contact pneumatique / chaussée, à savoir

une forte adhérence, une bonne imperméabilité, un bon niveau d'uni et une réduction du bruit de roulement des véhicules (USIRF, 2001).

Dans les enrobés bitumineux, l'évaporation des fractions volatiles du bitume est retardée par la présence de fines qui les retiennent. Ces dernières, provenant des fillers, participent au remplissage des vides inter-granulaires pour l'amélioration de la compacité. Elles participent ainsi à l'imperméabilisation et au ralentissement du vieillissement de la couche de surface. Cependant, l'effet de ces fillers, leur dosage optimal et leur nature minérale ou chimique sur les performances restent parfois mal connus si le matériau habituel change. Cette étude comparative porte sur l'effet de l'ajout de fillers de calcaires, fillers de basalte et de ciment sur les performances des bétons bitumineux.

Le filler est un granulat composé d'éléments fins dont le diamètre maximal des particules est inférieur ou égal à 2 mm et le pourcentage de passants à 0,063 mm est supérieur à 70%). Les fillers d'apport peuvent être issus de roches massives comme le calcaire. On rencontre également d'autres matériaux qui peuvent être utilisés à savoir le ciment, la chaux vive, le filler activé (mélange de fines calcaires et de chaux éteinte), la chaux éteinte, les cendres volantes et les fillers de cimenterie (LCPC, 2007). Grimaux et Hiernaux (1977) et Brown et Pell (1974) ont montré que lors de l'utilisation d'une granulométrie continue, le remplissage des vides (11 à 17%) entre les granulats grossiers s'effectue plus facilement par la présence de particules fines. Ceci confère au mélange une meilleure compacité, stabilité, rigidité et résistance aux déformations permanentes. Par contre, un surdosage en particules fines crée l'effet inverse. En desserrant les grains grossiers et en favorisant les translations et les rotations des granulats, il accélère ainsi l'apparition d'ornières, d'où l'importance d'un bon dosage des composants du béton bitumineux.

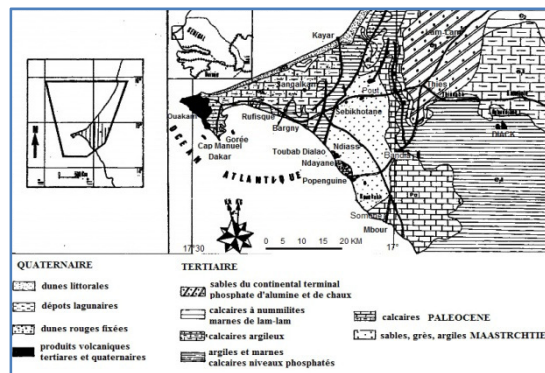
2. Matériaux Utilisés

2.1 Caractéristiques Physico-Mécaniques des Granulats

Les granulats utilisés proviennent des roches basaltiques de la carrière de Diack. Cette carrière est constituée de deux pitons de basalte (figure 1) datés du volcanisme du Miocène (Dia, 1982).

La masse volumique réelle des granulats est déterminée conformément à la norme **NF EN 1097-6**. L'essai permet de déterminer en même temps le coefficient d'absorption d'eau des granulats. Ce dernier est déterminé uniquement sur les gravillons. L'essai de détermination de la masse volumique apparente est effectué conformément à la norme **NF P 98-250-5**. La masse volumique apparente est définie par le rapport de la masse de l'échantillon rapportée à son volume, en tenant compte des vides inter-granulaires.

Figure 1: Carte géologique de la presqu'île du Cap-Vert et du Plateau de Thiès (Dia, 1982)



La résistance à la fragmentation par choc est déterminée par l'essai Los Angeles et codifié par la norme **NF 1097-2**. Elle est effectuée sur les granulats de classes 3/8 et 8/14 pour une prise d'essai M_0 égale à 5000 g. Le coefficient Los Angeles (L_A) est calculé à partir de l'équation (1).

$$L_A = (M_0 - m)/M_0 \quad (1)$$

m est la masse de matériau en gramme, retenue au tamis 1,6 mm après lavage et séchage.

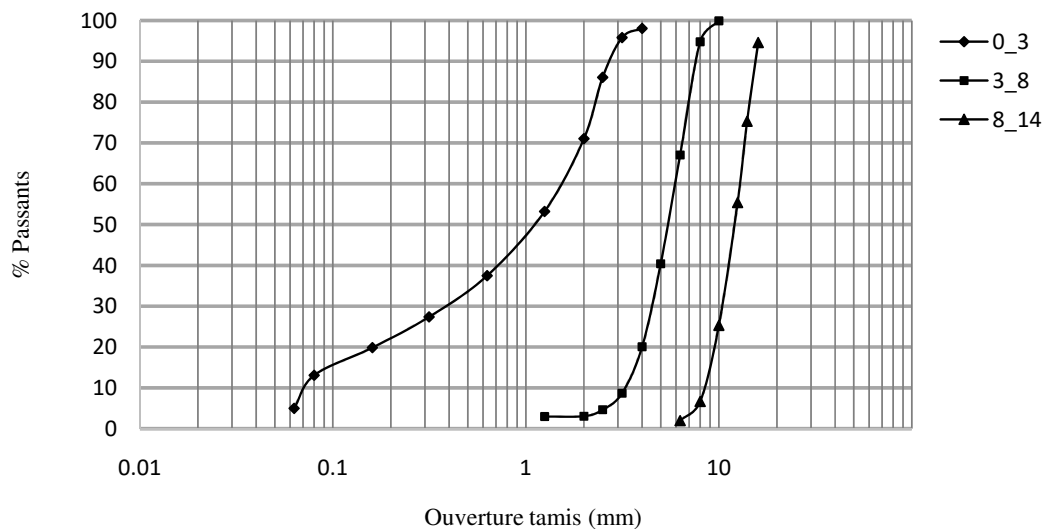
Le coefficient d'usure par attrition des granulats est déterminé par l'essai micro-Deval en présence d'eau. Cet essai est réalisé suivant la norme **NF EN 1097-1** sur les granulats de classe 3/8 et 8/14. L'essai consiste à mesurer l'usure produite par le frottement entre une masse initiale $M_0 = 500$ g de granulats et une charge abrasive constituée par des billes dans un cylindre rotatif dans des conditions bien définies. Lorsque la rotation est terminée, la masse m (g) refusée sur un tamis de 1,6 mm et séchée est utilisée pour calculer le coefficient micro-Deval (MDE) donné par l'équation (2).

$$MDE = (500 - m)/500 \tag{2}$$

La granularité est définie par tamisage (**NF EN 933-1**). Les courbes granulométriques des classes 0/3, 3/8 et 8/14 sont représentées sur la figure 2.

Le coefficient d'aplatissement (A) d'un ensemble de granulats représente le pourcentage pondéral des éléments plats. Il vérifie la relation $G/E > 1,58$ (G : grosseur et E : épaisseur). Cette valeur s'obtient par une double analyse granulométrique par voie sèche, en utilisant successivement et pour le même échantillon de granulats une série de tamis normalisés à mailles carrées et une série de grilles à fentes parallèles de largeurs normalisées. Plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans la route ou dans les bétons est facile et plus ils sont fragiles. Il est donc important de contrôler ce coefficient d'aplatissement pour chaque classe granulométrique.

Figure 2: Courbe granulométrique des échantillons de basalte



La propreté superficielle est définie par la norme **NF-P 18 591** comme étant le pourcentage pondéral de particules de diamètre inférieur à 0,5 mm (ou 1,6 mm pour les ballasts) mélangées ou adhérentes à la surface des granulats de diamètre supérieur à 2 mm. La présence de ces éléments sur la surface des granulats a un effet néfaste sur leur adhésivité avec le bitume.

Les gravillons sont propres lorsque la quantité d'éléments fins est inférieure à 5%.

Les résultats obtenus sur les caractéristiques physico-mécaniques, comparés aux spécifications techniques, montrent une baisse des performances mécaniques des granulats de basalte de la carrière de Diack (Tableau 1). En effet, leurs coefficients micro-Deval doublent (21 et 20 respectivement pour la classe 3/8 et la classe 8/14) par rapport aux résultats d'études antérieures obtenues une dizaine d'années auparavant (10 et 11) sur des matériaux de la même carrière. Ceci traduit l'exploitation du faciès de basalte à grains grossiers moins résistant au niveau de la carrière et soulève en même temps la diminution de matériaux de bonne qualité dans cette carrière pour les revêtements routiers au Sénégal mais également pour la qualité du béton réalisé.

La valeur du coefficient d'aplatissement de la classe 3/8 est très limite, ce qui fait que son pourcentage dans le mélange devra être limité.

2.2 Choix de la Composition Granulaire

La composition granulaire est choisie à partir des résultats d'analyses granulométriques sur les différentes classes de granulats utilisées et du fuseau de spécification. Le mélange granulaire est élaboré à partir de 40% de la classe 0/3, 30% de la classe 3/8 et 30% de la classe 8/14. Le fuseau de spécification ainsi que les courbes des mélanges théorique et pratique sont présentés sur la figure 3. Ces deux dernières s'insèrent parfaitement dans le fuseau granulaire. Une bonne superposition des courbes des mélanges théorique et pratique est obtenue.

Figure 3: Fuseau granulaire et courbes théorique et pratique du mélange granulaire

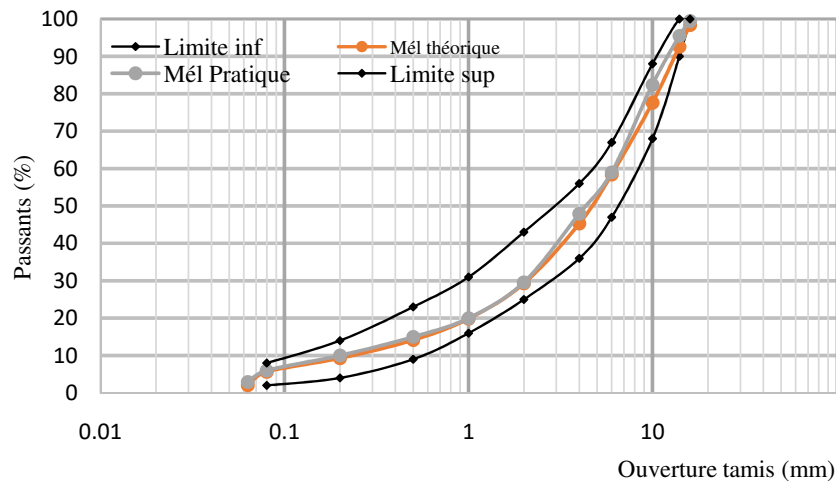


Tableau II: Caractéristiques mécaniques des granulats utilisés

Caractéristiques physico-mécaniques	Classes granulaires			Spécifications techniques
	0/3	3/8	8/14	
Masse volumique réelle (g/cm^3)	2,961	2,983	2,981	
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,62	1,63	1,76	
Coefficient d'aplatissement- A(%)	-	25	12	< 15
Propreté superficielle (%)	-	3,5	0,8	≤ 5
Coefficient Los Angeles(%)	-	12	15	> 25
Coefficient micro-Deval(%)	-	21	20	< 20
Equivalent de Sable moyen (%)	56			(0/2, 0/4) > 45

2.3 Caractéristiques du Bitume

Un bitume 35/50 est utilisé. Les essais de pénétrabilité à l'aiguille, de détermination du point de ramollissement bille et anneau, de détermination de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air méthode-RTFOT (ou essai de vieillissement), de mesure de la masse volumique et de la densité à 25°C ont été réalisés.

L'essai de pénétrabilité à l'aiguille permet de déterminer la consistance des bitumes et des liants bitumineux. Il est codifié par la norme **NF EN 1426**. La consistance d'un bitume est déterminée par la mesure de la profondeur de pénétration en son sein, au bout de 5 secondes, d'une aiguille dont le poids et son support exercent une charge additionnelle de 100g sur le bitume.

Trois mesures de la pénétration sont effectuées, avec une aiguille montée sur un pénétromètre, sur différents points de la surface de l'échantillon.

La pénétration finale est la moyenne des trois valeurs déterminées (Tableau II).

Tableau II: Résultats de l'essai de pénétrabilité du bitume 35/50 par rapport aux spécifications

Bitume 35/50	Valeurs de pénétrabilités			Pénétrabilité requise à 25°C
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	
Lecture à t = 0	0	0	0	30-50
Lecture à t = 5s	41	40	39	
Pénétration (1/10 mm)	41	40	39	
Pénétration Moyenne(1/10 mm)	40			

L'essai du point de ramollissement température bille et anneau (TBA) est exécuté conformément à la norme **NF EN 1427**. Il permet la détermination du point de ramollissement des bitumes et des liants bitumineux, dans la plage de température de 28°C à 150°C. Le point de ramollissement désigne la température à laquelle le matériau, dans les conditions de référence, atteint une consistance précise. Les résultats obtenus sur le bitume sont consignés dans le tableau III.

Tableau II: Résultats de l'essai bille et anneau sur le bitume 35/50 par rapport aux spécifications

Echantillon	TBA °C	Spécifications sur TBA °C
Anneau 1	51,6	50-58 °C
Anneau 2	52,1	
Moyenne	52	

La résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air ou méthode RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test: Test en Etuve d'un Film Mince Tournant) permet de simuler l'évolution d'un bitume pendant la fabrication et la mise en place d'un enrobé. L'essai est codifié par la norme NF EN 12607-1.

On soumet le bitume en film mince dans un cylindre tournant horizontalement à un courant d'air à 163°C pendant 75 minutes. On mesure ensuite la variation du poids de l'échantillon et la pénétrabilité restante. Les résultats de l'essai de résistance au durcissement sont donnés par le tableau IV.

Tableau IV: Résultats de l'essai RTFOT sur le bitume 35/50

Mesure du vieillissement - Essai RTFOT	Valeurs requises
Variation de masse (%)	≤ 0,5%
Pénétration restante (1/10 ^{ème} mm)	≥ 53

L'essai, codifié par la norme NF EN 15326+A1, permet de déterminer la densité et la masse volumique des liants bitumineux à (25,0 ± 0,2) °C suivant la méthode du pycnomètre à bouchon capillaire. La densité et la masse volumique à 25°C du bitume sont respectivement de 1,025 et 1,022 g/cm³. Les résultats des essais d'identification des granulats comme du bitume montrent que les caractéristiques sont bien conformes aux spécifications d'usage.

3. Détermination de la Teneur Optimale en Liant

Des éprouvettes sont confectionnées dans des moules cylindriques de diamètre 101,6 ± 0,1 mm. Le mélange bitumineux est formé par 1200 g de granulats et une masse de bitume correspondant à la teneur en liant, en pourcentage de la masse sèche des granulats. L'échantillon est ensuite compacté dans une éprouvette par la dame Marshall maintenue perpendiculaire au moule. Le mélange est compacté en lui appliquant 50 coups d'une dame de 4,536 kg tombant en chute libre sur une hauteur de 45,7 cm pendant en 55 ± 5 secondes sur ses deux faces. Les éprouvettes sont ensuite démoulées, après passage pendant 15 minutes sous un jet circulaire d'eau froide et conservation à température ambiante pendant environ une heure. Une fois démoulées, les masses, les hauteurs et les diamètres des éprouvettes sont

mesurés. La hauteur de l'éprouvette correspond à la moyenne de quatre mesures. L'une des éprouvettes est utilisée pour déterminer la masse volumique apparente du mélange et les trois autres sont conservées à température ambiante pendant 5 heures puis immergées, avec la mâchoire d'écrasement, dans un bain thermostatique à 60°C pendant 30 minutes.

La masse volumique apparente du mélange est déterminée par pesée hydrostatique suivant la norme **NF EN 12697-6**. Les éprouvettes sont pesées, d'abord à l'air libre (P1), ensuite après paraffinage (P2) puis dans l'eau après paraffinage (P3). La masse volumique apparente du mélange est calculée en faisant le rapport de sa masse sur son volume à partir de P1, P2, P3 et la densité de la paraffine (0,9).

Les éprouvettes sont écrasées à la vitesse de 0,85 mm/s \pm 0,1 mm/s. A sa sortie du bain, l'éprouvette est placée dans la mâchoire d'écrasement puis écrasée dans les 40 secondes après sa sortie. La machine fournit après écrasement les valeurs de stabilité en kN et de fluage en mm. La compacité (%) du mélange est déterminée par le rapport de sa densité apparente (D_A) sur sa densité théorique (D_{th}).

La densité théorique du mélange est calculée par l'équation 3.

$$D_{th} = \frac{100 + T_{Lext}}{\frac{\%G_1}{\rho G_1} + \frac{\%G_2}{\rho G_2} + \frac{\%G_3}{\rho G_3} + \frac{T_{Lext}}{\rho b}} \quad (3)$$

$\%G_1$ = pourcentage de granulats de la classe 0/3

$\%G_2$ = pourcentage de granulats de la classe 3/8

$\%G_3$ = pourcentage de granulats de la classe 8/14

Le pourcentage de vides ($v\%$) est calculé à partir de la compacité ($C\%$) trouvée. Il est donné par l'équation 4.

$$v\% = 100 - C\% \quad (4)$$

Le pourcentage de vides occupé par l'air dans le squelette minéral (VAM) est calculé par l'équation 5.

$$VAM (\%) = 100 - \frac{100 \times (MVR \times (100 - v))}{\rho g (100 + T_{Lext})} \quad (5)$$

MVR est la masse volumique réelle calculée du mélange ou encore sa densité théorique. Le pourcentage des vides comblés par le bitume VCB est calculé à partir de l'équation 6.

$$VCB (\%) = 100 \times (VAM - v) / VAM \quad (6)$$

Les résultats de l'étude Marshall sont résumés dans le tableau V.

L'observation de la figure 4 montre que la stabilité maximale, égale à 2220 kg, est obtenue avec 5,21% de bitume. La courbe de variation du fluage en fonction de la teneur en bitume montre que ce dernier augmente avec la teneur en liant du mélange. Le fluage à la teneur en liant de 5,2% est de 3,01 mm (figure 5).

Tableau V: Résultats de l'essai Marshall

% Bitume	5	5,1	5,2	5,3	5,4
Stabilité (kg)	1656	1755	2212	2045	1626
Fluage (mm)	2,75	2,84	3,01	3,27	3,51
MVA (g/cm ³)	2,515	2,540	2,583	2,571	2,548
MVR (g/cm ³)	2,727	2,722	2,718	2,714	2,710
Compacité (%)	92,24	93,32	95,02	94,72	94,03
Vides (%)	7,76	6,68	4,98	5,28	5,97
VAM (%)	19,44	18,71	17,43	17,90	18,70
VCB (%)	60,10	64,28	71,45	70,50	68,10
Rapport Fines/Bitume	1,20	1,18	1,15	1,13	1,11
Module de richesse - K	3,54	3,61	3,68	3,75	3,82
Passants 80µm	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00

Figure 4: Courbe de variation de la stabilité en fonction de la teneur en bitume

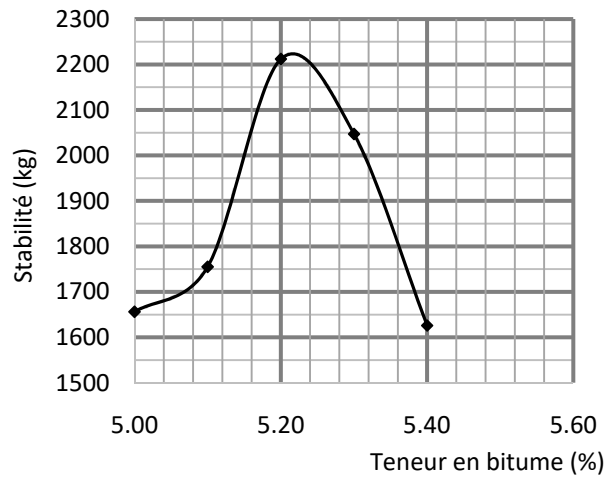


Figure 5: Courbe de variation du fluage en fonction de la teneur en bitume

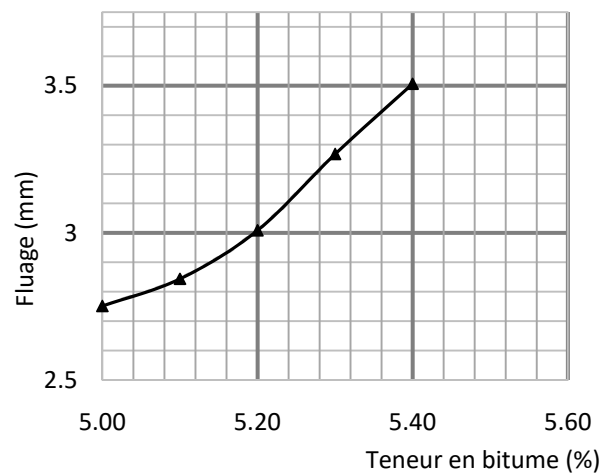


Figure 6: Courbe de variation de la compacité en fonction de la teneur en bitume

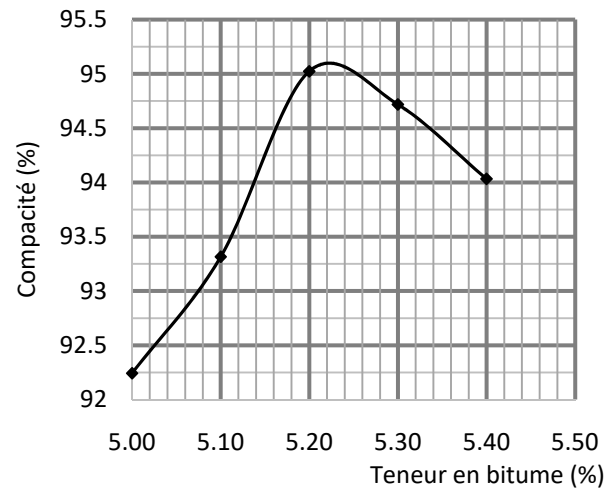
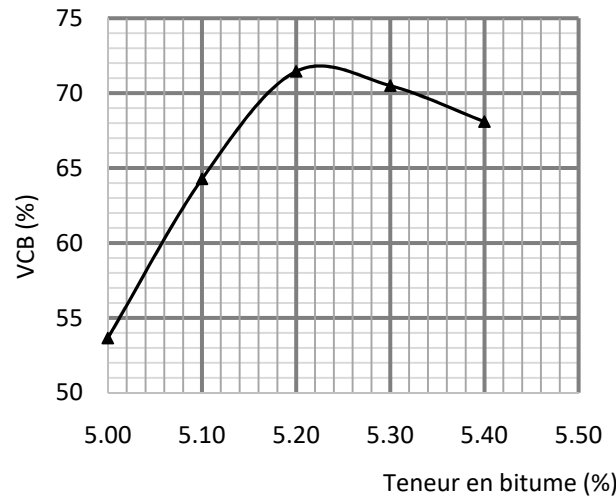


Figure 7: Courbe de variation du VCB en fonction de la teneur en bitume

L'observation de la figure 6 montre que la compacité atteint une valeur maximale de 95,02% autour de 5,22% de bitume. La courbe de variation du VCB en fonction de la teneur en bitume présente la même allure que celle de la compacité. La valeur de VCB maximale (74%) est obtenue également autour de 5,22% de bitume (figure 7). Ces résultats montrent l'étroite relation qui existe entre la compacité et le VCB. A partir des valeurs maximales de stabilité, de compacité, de VCB et de fluage obtenues, la teneur en bitume optimale retenue pour le mélange est de 5,2%.

4. Formulation de Béton Bitumineux Semi-Grenu Avec Ajout de Fillers de Calcaires, Fillers de Basalte et de Ciment

4.1 Caractéristiques des Fillers Utilisés

Les caractéristiques des fillers utilisés dans la formulation des enrobés sont consignées dans le tableau VI.

Tableau VI: Caractéristiques des fillers utilisés

Nature du matériau	Masse volumique réelle (g/cm ³)	VBS (%)	ΔTBA °C	Tamis (mm)	Filler Calcaire	Filler Basalte
Filler calcaire	2,68	0,90	12	2	100	100
Filler basalte	2,97	1	12,4	0,125	91	89
Ciment	3,10		13,1	0,063	73	72
Spécifications techniques		≤ 10	8-16			

Les résultats montrent que le ciment est le plus dense des trois matériaux. Le calcaire, étant le moins dense, présente plus de pores et absorberait plus de bitume en raison de sa nature. Il donnerait la meilleure compacité. Les valeurs de bleu varient entre 0,9 et 1, traduisent une bonne propreté des fillers vis-à-vis de la présence d'argiles donc traduiraient une nocivité assez faible. Des trois fillers utilisés, le ciment présente l'effet rigidifiant le plus élevé. A cet effet, il confère au mélange une résistance à l'orniérage par fluage la plus élevée.

4.2 Résultats de L'étude Marshall

La teneur en liant fixée à 5,2%, les fillers sont ajoutés au mélange à des doses régulières variant entre 1% et 8%. Ils sont d'abord ajoutés aux granulats, ensuite la quantité de bitume correspondant à 5,2% de la masse des granulats (le filler y compris), est ajouté aux granulats puis l'ensemble est enrobé à la

température d'enrobage du bitume utilisé. L'essai Duriez a été réalisé avec les pourcentages de fillers donnant les meilleures caractéristiques Marshall au mélange.

La stabilité, le fluage, la compacité et le VCB sont illustrés respectivement par les figures 8, 9, 10 et 11.

Figure 8: Variation de la stabilité en fonction du pourcentage et du type de filler

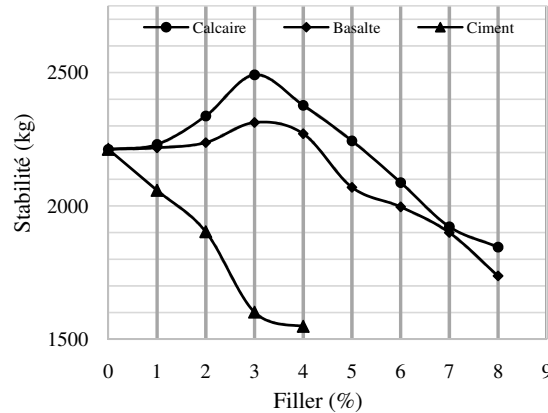


Figure 9: Variation du fluage en fonction du pourcentage et du type de filler

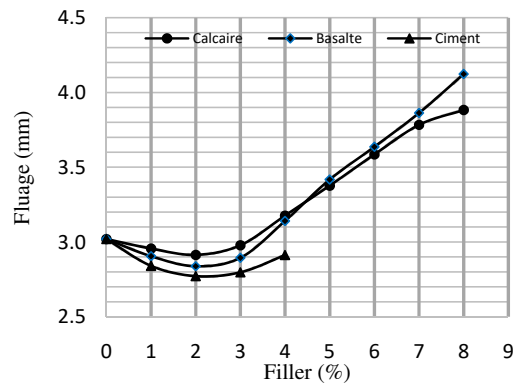


Figure 10: Variation de la compacité en fonction du pourcentage et du type de filler

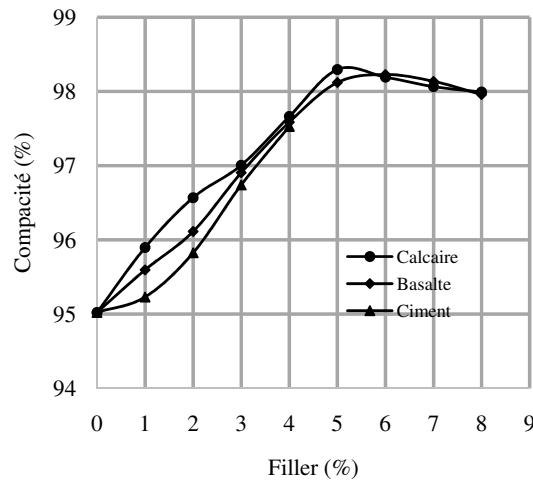
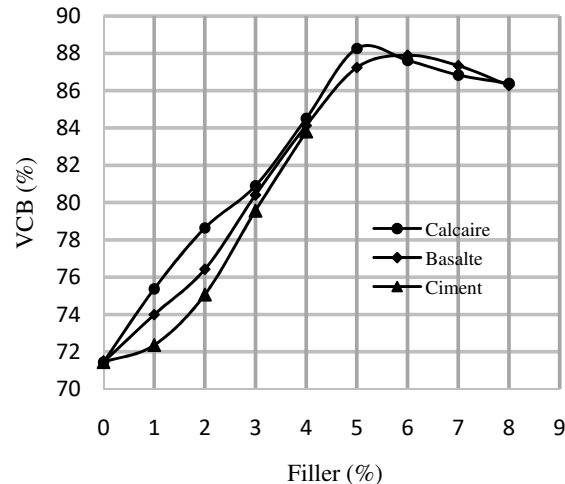


Figure 11: Variation du VCB en fonction du pourcentage et du type de filler

La figure 11 montre que l'ajout de fillers de calcaires et de basaltes dans le béton bitumineux améliore la stabilité du mélange contrairement au ciment. Dans le cas du calcaire, la stabilité augmente de 12,6% à une dose de 3% (2492 kg). Au-delà de cette valeur, elle diminue. Pour le basalte, la stabilité augmente également de 4,55% avec une valeur maximale obtenue à 3% (2313 kg), ensuite sa valeur reste sensiblement constante jusqu'à une dose de 4% et baisse au-delà de ce pourcentage. Pour le ciment, la stabilité du mélange connaît une baisse au fur et à mesure que le dosage augmente.

L'observation de la figure 12 montre une légère baisse du fluage lorsque les fillers sont dosés jusqu'à 2%. A partir d'une dose de 3%, nous remarquons une hausse des valeurs de fluage quoique toujours inférieures à celles obtenues dans le mélange sans filler. Les mélanges dans lesquels le basalte et le ciment ont été incorporés présentent les plus faibles valeurs de fluage à faibles doses, surtout pour le ciment, respectivement 2,89 mm et 2,80 mm à une dose de 3% alors que les fillers de calcaires donnent, pour la même dose, un fluage de 2,96 mm.

Au-delà d'une dose de 5% de fillers, le fluage des mélanges élaborés à partir de fillers de basaltes devient supérieur à celui des mélanges préparés à partir de fillers de calcaires. Les valeurs de fluage restent inférieures à 4 mm jusqu'à une dose de 7%. Les fillers de calcaires donnant une meilleure stabilité au mélange présente un bon comportement vis-à-vis du fluage.

L'analyse de la figure 13 permet de constater que la compacité des mélanges augmente avec le dosage en filler pour diminuer à partir d'une certaine dose. Les courbes de compacité des mélanges obtenus avec les différents fillers présentent globalement la même allure.

Avec les fillers de calcaires, la compacité atteint une valeur maximale avec 5% de fillers (98,29%) et diminue au-delà de ce pourcentage. La compacité atteinte à 3% de fillers est intéressante et égale à 97,01% soit 3% d'augmentation par rapport à la valeur sans fillers.

Avec les fillers de basalte, la compacité connaît sa valeur maximale avec 6% de fillers pour commencer à chuter au-delà. La compacité obtenue avec 3% de fillers demeure égale à 96,91% (2,9% d'augmentation), légèrement inférieure à celle obtenue avec les fillers de calcaires pour le même dosage.

Avec le ciment, la même tendance s'observe sauf que les compacités sont moins importantes que celles des mélanges obtenus avec le calcaire et le basalte pour le même pourcentage.

Les courbes de la figure 14 montrent que le VCB présente la même évolution que la compacité, il connaît également une hausse avec l'incorporation de fillers et commence à chuter au-delà de 5%.

L'analyse des résultats de l'essai Marshall fait apparaître que pour un dosage en fillers inférieur à 4%, les mélanges élaborés à partir des fillers de calcaire et de basalte présentent de bonnes performances à l'essai Marshall. Parmi les fillers, le calcaire donne les meilleures performances au mélange à une dose de 3% (12,6% et 3% d'augmentation respectivement de stabilité et de compacité), sauf pour le fluage, dont les plus faibles valeurs sont obtenues avec le basalte et le ciment.

Au-delà du dosage de 6%, la compacité et le VCB sont meilleurs avec les fillers de basalte. A ce niveau, le mélange est saturé en bitume, ce qui fait que l'ajout de bitume, de faible densité, diminue sa compacité. Le filler de calcaire, plus poreux, absorbe donc plus de bitume et retarde mieux la saturation en bitume du mélange par rapport aux autres fillers.

Donnant les meilleures compacités, le filler de calcaire donne également les plus fortes valeurs de stabilité.

Le ciment présente un effet néfaste sur la stabilité du mélange même si les compacités, les valeurs de VCB et de fluages demeurent acceptables, à une dose de 3%.

4.3 Résultats de L'étude Marshall

L'étude Duriez a été effectuée avec le pourcentage de fillers donnant les meilleures performances au mélange (3%). Le pourcentage de bitume est pris égal à 5,2%. La masse des granulats, fillers compris et du bitume est égale à 1000 g ± 2g. Les résultats de l'étude Duriez sont consignés dans le tableau VII.

Tableau VII: Résultats de l'essai Marshall avec la teneur en liant de 5,2%

% Bitume		5,2								
% filler		0	1	2	3	4	5	6	7	8
Stabilité (kg)	Calcaire	2212	2231	2337	2492	2377	2244	2087	1922	1846
	Basalte	2212	2218	2237	2313	2271	2069	1996	1900	1737
	Ciment	2212	2058	1903	1601	1548				
Fluage (mm)	Calcaire	3,01	2,96	2,91	2,98	3,18	3,38	3,59	3,78	3,88
	Basalte	3,01	2,90	2,84	2,89	3,14	3,42	3,64	3,86	4,12
	Ciment	3,01	2,84	2,77	2,80	2,91				
Compacité (%)	Calcaire	95,02	95,90	96,57	97,01	97,66	98,29	98,19	98,06	97,99
	Basalte	95,02	95,60	96,11	96,91	97,59	98,12	98,23	98,14	97,96
	Ciment	95,02	95,23	95,83	96,74	97,53				
VCB (%)	Calcaire	71,45	75,38	78,64	80,90	84,51	88,26	87,62	86,84	86,39
	Basalte	71,45	74,00	76,43	80,41	84,13	87,24	87,90	87,34	86,27
	Ciment	71,45	72,36	75,07	79,57	83,81				
Module de richesse K	Calcaire									
	Basalte	3,68	3,61	3,54	3,49	3,44	3,40	3,35	3,31	3,28
Fines/bitume	Calcaire									
	Basalte	1,15	1,29	1,43	1,56	1,69	1,81	1,94	2,06	2,18

L'analyse des résultats de l'étude Duriez sur les mélanges montre que les fillers améliorent leurs caractéristiques. En effet, la tenue à l'eau est améliorée avec tous les types de fillers. Elle est meilleure avec le filler de basalte (0,93) alors qu'elle est égale à 0,91 et 0,88 respectivement pour le filler de calcaire et le ciment. Cependant, les fillers de calcaire et le ciment donnent les meilleures valeurs de résistances à la compression après conservation à 18°C, aussi bien à l'air qu'en immersion.

La compacité et le pourcentage d'imbibition sont également améliorés. Les meilleures valeurs de compacité sont obtenues avec le filler de calcaire (93,8%) et le ciment (93,55%) alors que le filler de basalte donne une valeur de 93,27%. Il est aussi vérifié que ce sont les mélanges présentant les meilleures compacités qui absorbent le moins d'eau.

Au terme de cette étude Duriez, la pertinence de l'utilisation du filler calcaire au détriment des autres fillers est réelle. En effet, ce dernier confère au mélange les meilleures stabilités, fluages et compacités tout en gardant une bonne tenue à l'eau. Le filler de basalte, quoique moins performant que le filler de calcaire reste une bonne alternative contrairement au ciment qui a un effet néfaste sur la stabilité même s'il permet d'obtenir de bonnes compacités et une bonne tenue à l'eau. Le dosage optimal en fillers se situe autour de 3 et 4% et la teneur en liant optimale pour ce mélange granulaire

est égale à 5,2% environ ce qui se traduit par un rapport fines/bitume compris entre 1,56 et 1,66. Le module de richesse correspondant à ce dosage optimal en fillers est égal à 3,49.

5. Conclusion

La pertinence de l'ajout de fillers dans le béton bitumineux est bien mise en évidence par l'étude expérimentale. En effet, les mélanges préparés sans fillers bien que présentant de bonnes caractéristiques Marshall et Duriez, ont vu leur performance augmenter après ajout en de fillers calcaires, fillers de basalte et de ciment. Les fillers de calcaires et de basalte confèrent au mélange les meilleures caractéristiques Marshall et Duriez.

Il ressort de l'étude que la teneur en liant optimale donnant les meilleures caractéristiques Marshall et Duriez avec le mélange granulaire, sans ajout de fillers, est égale à 5,2% du bitume 35/50. Les meilleures performances à l'essai Marshall sont obtenues à faibles doses de fillers (3 à 4%) pour des teneurs en liant de 5,1 à 5,2%. Les résultats des essais Marshall et Duriez sur les mélanges auxquels le ciment a été ajouté montrent une diminution de leur stabilité malgré une amélioration des compacités, des fluages et des tenues à l'eau.

Un dosage en fillers de 3% donne les meilleures stabilités et fluage même si la compacité maximale est obtenue à un dosage qui tourne autour de 6% pour les fillers de calcaires et 5% pour les fillers de basalte. Ce dosage en fillers permet également d'augmenter la tenue à l'eau des mélanges ainsi que leur compacité Duriez. En définitive, les fillers de calcaires donnent les meilleures performances avec des augmentations de 12,6% de la stabilité, 3% de la compacité Marshall, 2% de la compacité Duriez et une amélioration de la tenue à l'eau de 4,6%.

Par contre, un surdosage en fillers (à plus de 5%) diminue les performances des mélanges. La teneur en fines donnant les meilleures performances se situe entre 8,1 et 8,7% et correspond à un rapport fines/bitume variant entre 1,57 et 1,7.

L'étude montre également que les fillers permettent de baisser la teneur en bitume tout en maintenant les performances Marshall du mélange.

Références Bibliographiques

- [1] **Brown, S.F., Pell, P.S., (1974).** Repeated loading of bituminous materials, CAPSA 74. National Institute for Road Research, Republic of South Africa, Durban.
- [2] **Dia A. (1982).** Contribution à l'étude des caractéristiques pétrographiques pétrochimiques et géotechniques des granulats basaltiques de la Presqu'île du Cap-Vert et du Plateau de Thiès (carrière de Diack - Sénégal), Thèse de Doctorat, Université de Dakar, Sénégal, 190p.
- [2] **Grimaux J.-P., Hiernaux R. (1977).** Utilisation de l'ornièreur type LPC. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Décembre Spécial V, pp 165-172.
- [3] **Laboratoire Central des ponts et Chaussées – LCPC. (2007).** Manuel LCPC Formulation du béton bitumineux, 201p.
- [4] **NF EN 1097-1. (2011).** Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval).
- [5] **NF EN 1097-2. (2010).** Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques de granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation.
- [6] **NF EN 1097-6. (2014).** Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.
- [7] **NF EN 12607-1. (2014).** Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air - Partie 1 : Méthode RTFOT.
- [8] **NF EN 12697-6. (2012).** Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 6 : détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses.

- [9] **NF EN 1426. (2007).** Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille.
- [10] **NF EN 1427 (2007).** Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de ramollissement - Méthode Bille et Anneau.
- [11] **NF EN 15326+A1. (2009).** Bitumes et liants bitumineux - Mesure de la masse volumique et de la densité - Méthode du pycnomètre à bouchon capillaire.
- [12] **NF EN 933-1 (2012).** Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage.
- [13] **NF P18-591. (1990).** Granulats - Détermination de la propreté superficielle.
- [14] **NF P98-250-5. (1993).** Essais relatifs aux chaussées - Préparation des mélanges hydrocarbonés - Partie 5 : mesure en laboratoire de la masse volumique apparente d'un corps d'épreuve au banc gammadensimétrique.
- [15] **Union des syndicats de l'industrie routière française – USIRF. (2001).** Les enrobés bitumineux Tome 1, RGRA, 229 p.

Remerciements

Les auteurs remercient Eiffage Sénégal pour avoir soutenu ce travail.