



Matériaux de construction alternatifs

ÉTUDE EXPÉIMENTALE DE LA VALORISATION DU SABLE DE DUNE DANS LA FORMULATION DE BÉTON BITUMINEUX

EXPERIMENTAL STUDY OF DUNE SAND VALORIZATION IN THE FORMULATION OF ASPHALT CONCRETE

Ahmed SIALA¹, Saloua EL EUCH KHAY², Jamel NEJI³

¹ Maître assistant à l'Académie Militaire Fondouk Jedid, Tunisie

² Maître technologue à l'Institut Supérieur des Études Technologiques de Radès

³ Professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis

1. INTRODUCTION

Les enrobés bitumineux sont des matériaux nobles dont la composition influe considérablement sur le comportement et sur les pathologies éventuelles qui affectent les chaussées qui les incluent. Ils sont généralement constitués d'un mélange de granulats et d'un liant hydrocarboné. Le mélange granulaire doit respecter le fuseau de la norme NF EN 12697-2 avec généralement un ajout de filler ou d'un apport de fines pour optimiser le comportement du mélange.

Le coût excessif des enrobés bitumineux ainsi que les pathologies des chaussées souples de plus en plus fréquentes ont poussé à étudier la possibilité du remplacement

de certaines composantes du mélange par des matériaux locaux disponibles et non chers sans altérer son comportement mécanique. D'où l'idée d'utiliser le sable de dune en substitution éventuelle des fines d'apport. En effet, le sable de dune est un matériau qui se trouve en quantité inépuisable dans le sud du pays au niveau du Sahara. Il s'étale sur environ le tiers de la surface de la Tunisie et fait partie du grand erg oriental.

Ces dernières années, des travaux de recherche ont été entamés en Tunisie et avaient pour objectif la valorisation du sable de dune qui est un matériau disponible et accessible mais non utilisé dans le secteur des BTP. Une partie de ces travaux s'est intéressée à l'utilisation du sable de dune pour formuler un béton hydraulique fin utilisé pour le



corps de la chaussée et a donné de très bons résultats [1-5]. Une deuxième partie, objet de cet article, s'est intéressée à l'utilisation du sable de dune dans la formulation du béton bitumineux.

Le but de ce travail est de répertorier et d'étudier l'influence de l'ajout du sable de dune en différents pourcentages sur les différentes caractéristiques mécaniques du béton bitumineux afin d'en déduire une composition optimale de ce dernier, permettant d'améliorer sa résistance et de réduire les coûts de construction.

2. IDENTIFICATION DES MATERIAUX

Les granulats utilisés lors de cette étude sont de nature calcaire et de classes granulaires : 0/3, 4/7, et 7/12 provenant de la carrière de Djebel Ressas au nord du pays. Le poids spécifique, la dureté des éléments et leurs propriétés sont résumés dans le tableau 1. Toutes les caractéristiques sont conformes à la norme NF EN 13043.

Le sable de dune, utilisé dans cette étude comme additif au béton bitumineux a été également identifié. Il s'agit d'un sable fin. Sa nature minéralogique est le quartz dont la dureté est élevée. La figure 1 montre sa courbe granulométrique. Il présente une granulométrie assez fine 0-0,4 mm. Son module de finesse est faible, de l'ordre de 0,65. Sa courbe granulométrique est presque verticale ce qui témoigne une granularité serrée. Il est riche en fines. Le pourcentage de fines, son poids spécifique et son équivalent de sable ont été déterminés et montrés dans le tableau 2.

Essais	Sable de dune
Pourcentage de fines	45%
Poids spécifique (t/m ³)	2,64
Equivalent de sable (%)	50,4

Tableau 2 : Caractéristiques du sable de dune.

Granulats	0/3	4/7	7/12	Spécifications Normatives (NF EN 13043)
Poids spécifique (t/m ³)	2.71	2.71	2.6	2.5 à 3
Los Angeles	-	13.17	12.21	<22
Micro-Deval	-	11.58	11.58	<15
Equivalent Sable ES (%)	73.5	-	-	≥50

Tableau 1 : Caractéristiques des granulats neufs.

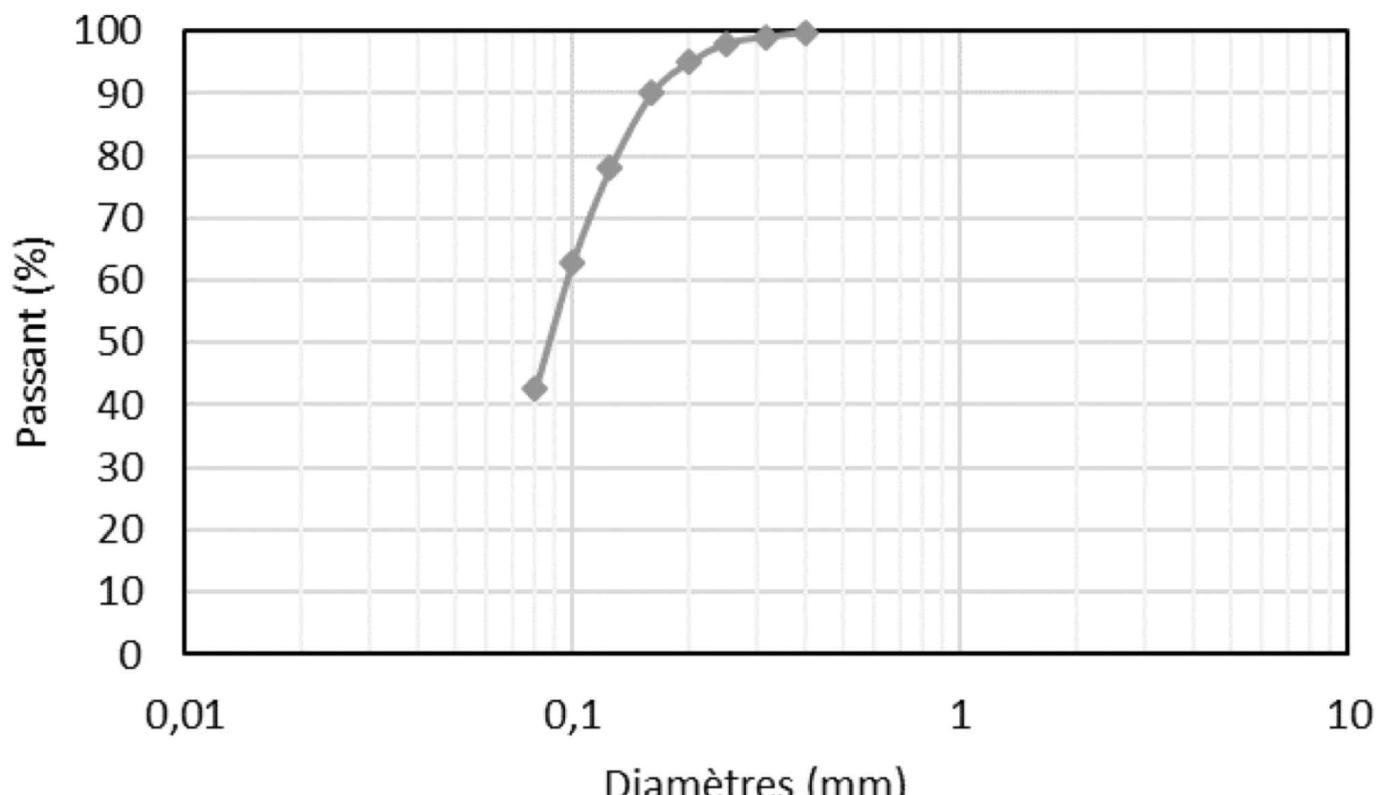


Figure 1 : Courbe granulométrique du sable de dune.



Essai		Résultat	Exigences normatives
Pénétrabilité avant RTFOT	(1/10mm)	38	35 à 50
Point de ramollissement avant RTFOT	(°C)	53.5	50 à 58
Pénétrabilité après RTFOT	(1/10mm)	66	>53
Point de ramollissement après RTFOT	(°C)	58	>52
Point d'éclair	(°C)	262	>240

Tableau 3 : Résultats des essais sur bitume.

Le bitume utilisé est de classe 35/50, sa densité spécifique est de 1.04 t/m³. Des essais de pénétrabilité et du point de ramollissement ont été réalisés selon les normes en vigueur avant et après RTFOT. Les résultats sont donnés dans le tableau 3.

Pour chaque formule, trois séries de mélanges ont été préparées en utilisant différentes teneurs en bitume à savoir 4.7%, 5% et 5.3% afin de déterminer le dosage optimal de ce dernier. En effet, la teneur en bitume couramment utilisée en Tunisie étant comprise entre 4,7 et 5,3%.

3. FORMULES TESTÉES

Cinq formules de béton bitumineux à granulométrie continue avec différents pourcentages de sable de dune, à savoir 0%, 5%, 7%, 10 et 12% ont été mises au point. Elles sont désignées respectivement par BB0SD, BB5SD, BB7SD, BB10SD et BB12SD. La formule BB0SD étant une formule témoin sans sable de dune. Le tableau 5 donne le % de chaque constituant pour les différentes formules testées. Le mélange granulaire de la formule témoin présente les caractéristiques physiques suivantes, synthétisées dans le tableau 4.

Désignation	Valeur
Masse volumique réelle (t/m ³)	2,67
Pourcentage de fines (%)	7,0
Surface spécifique (Σ) (m ² /kg)	11,16
$\sqrt[5]{\Sigma}$	1,620

Tableau 4 : Caractéristiques physiques du mélange granulaire.

4. ESSAIS RÉALISÉS

Pour chaque composition d'enrobé réalisée et correspondant à un taux de sable de dune défini, une série d'essais a été effectuée en vue d'identifier au mieux l'enrobé étudié. L'objectif étant de tester tout d'abord la composition granulométrique (courbe granulométrique du mélange granulaire dans le fuseau ou non) et le dosage en liant optimal, et d'étudier ensuite l'influence de l'introduction du sable de dune sur les différentes caractéristiques du béton bitumineux.

Ainsi, pour chaque formule, les essais réalisés sont : l'analyse granulométrique du mélange granulaire, l'essai Duriez (pourcentage de vide, résistance à la compression et stabilité à l'eau) [6] et l'essai Marshall (stabilité et fluage) [7] sur des éprouvettes cylindriques de béton bitumineux de 101,6 mm de diamètre et de 63,5 mm de hauteur.

Pour chaque teneur en bitume, trois éprouvettes sont testées pour retenir une valeur moyenne.

Pour chaque mélange, les granulats, le sable de dune et le bitume ont été mis séparément dans un four à 155 °C. Ensuite, les mélanges de granulats et de sable de dune ont été introduits dans le mélangeur pendant 2 minutes. Enfin, le bitume est ajouté et le tout est mélangé pendant 3 minutes.

Composants	BB0SD	BB5SD	BB7SD	BB10SD	BB12SD
Sable 0/3 (%)	50	45	43	40	38
Gravier 4/7 (%)	13	13	13	13	13
Gravier 7/12 (%)	37	37	37	37	37
Sable de dune (%)	0	5	7	10	12
Bitume (%)	4,7/ 5/ 5,3	4,7/ 5/ 5,3	4,7/ 5/ 5,3	4,7/ 5/ 5,3	4,7/ 5/ 5,3
Module de richesse	2,93/3,11/3,30	2,90/3,09/3,27	2,89/3,07/3,26	2,82/3,00/3,18	2,78/2,96/3,14

Tableau 5 : Formules testées.



5. RÉSULTATS DES ESSAIS ET INTERPRÉTATIONS

L'analyse granulométrique du mélange granulaire pour chaque formule a été réalisée. Les courbes granulométriques sont montrées dans la figure 2. Celles des formules contenant 0%, 5% et 7% de sable de dune s'insèrent parfaitement dans le fuseau normatif des enrobés bitumineux tandis que les courbes granulométriques des formules contenant 10% et 12% de sable de dune sortent légèrement du fuseau.

Les résultats des essais réalisés pour les quatre formules à différents pourcentages de sable de dune ainsi que les résultats relatifs à la formule témoin (sans sable de dune) sont donnés dans les figures 3, 4, 5 et 6.

Pour les quatre formules à différents taux de sable de dune, la stabilité a augmenté avec l'augmentation du

taux de bitume de 4.7% à 5.3%. En effet, une majoration de la teneur en bitume a pour effet immédiat d'accroître la compacité de l'enrobé par augmentation de l'effet de lubrification des granulats et par le remplissage des vides.

La teneur en bitume a été limitée à 5.3%, au vu des bonnes résistances atteintes et également au vu des habitudes tunisiennes en termes de teneur en bitume maximale.

Le flUAGE par contre, augmente avec l'augmentation du taux de bitume (figure 4). En effet, la composante visqueuse est en train d'augmenter dans le béton bitumineux qui est un mélange viscoélastique.

Il est toutefois à signaler que toutes les valeurs de flUAGE restent conformes aux normes et donc elles sont toutes acceptables et ne dépassent pas les 4 mm qui est la valeur maximum exigée par la norme française NF P98-251-2.

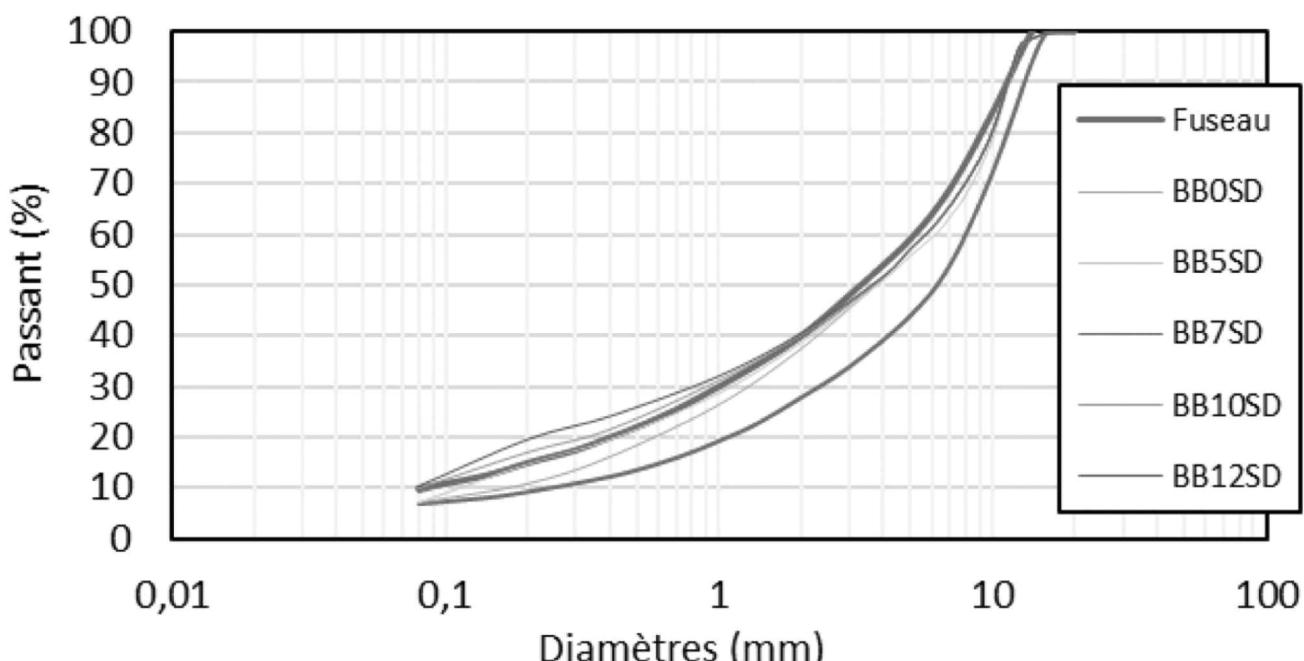


Figure 2 : Courbes granulométriques des mélanges granulaires avec 0%, 5%, 7%, 10% et 12% de sable de dune.

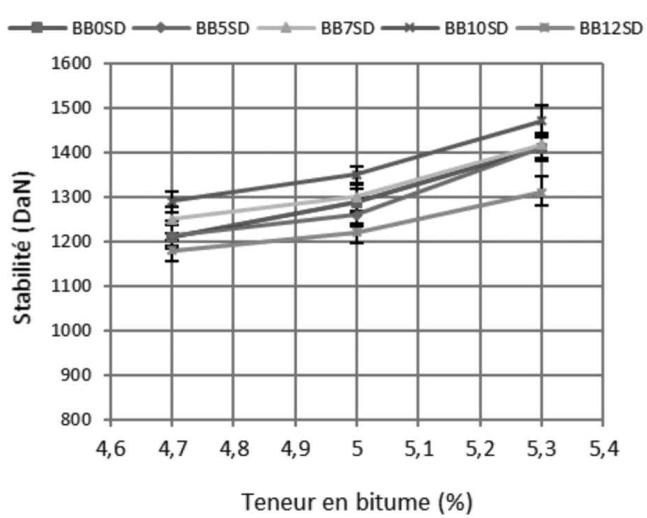


Figure 3 : Variation de la stabilité en fonction de la teneur en bitume.

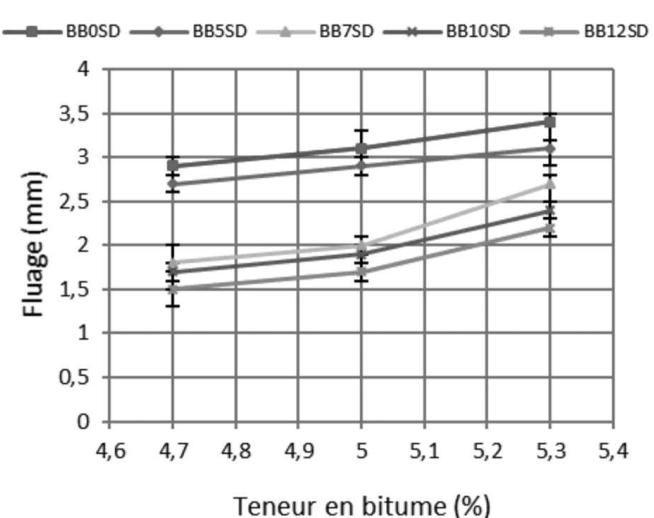
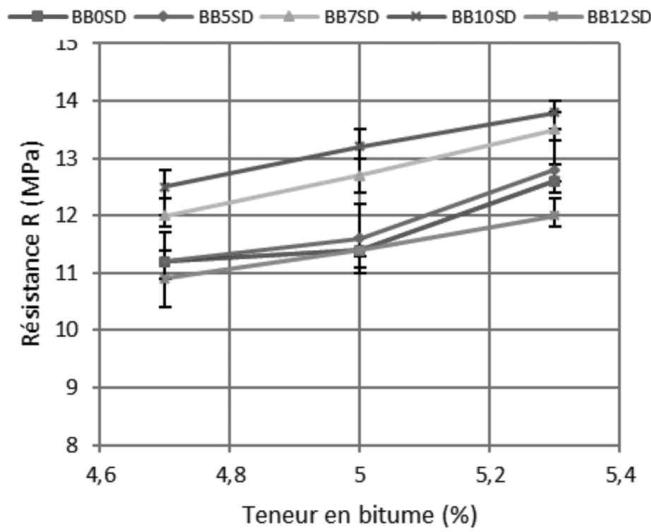
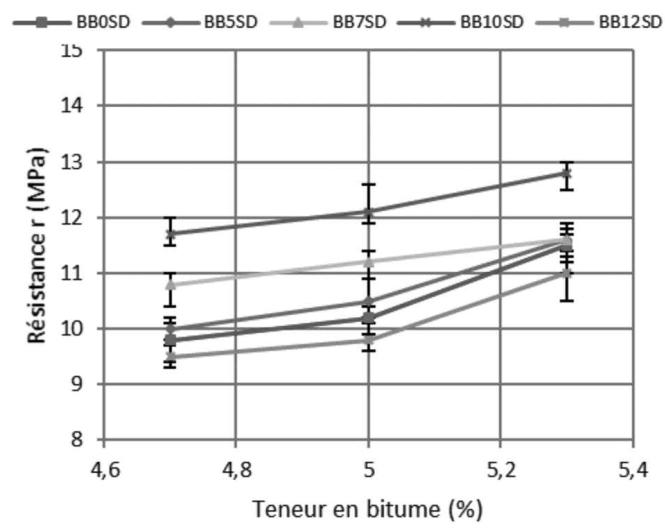


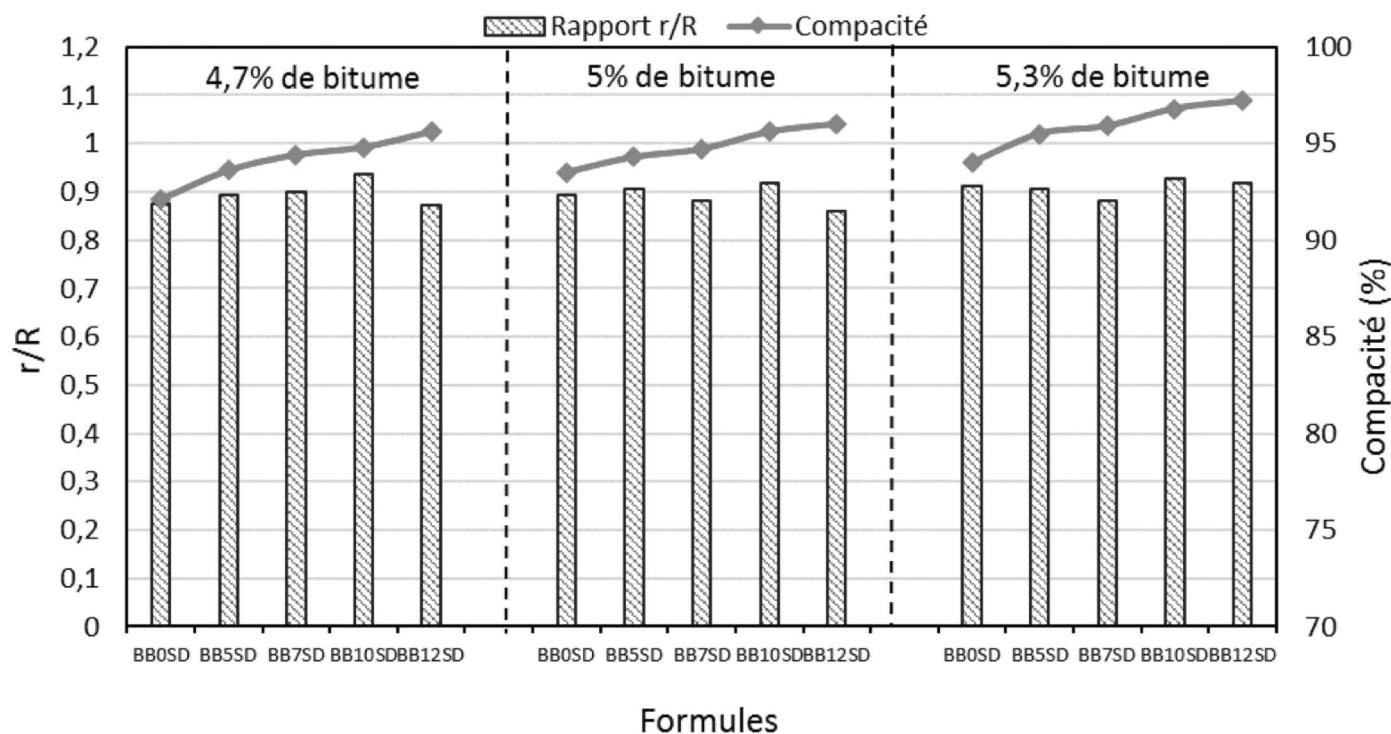
Figure 4 : Variation du fluege en fonction de la teneur en bitume.

**a) A l'air****b) Par immersion sous l'eau****Figure 5 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en bitume.**

Les résistances à la compression dans l'air et dans l'eau ont augmenté avec l'augmentation de la teneur en bitume. D'autre part, le rapport r/R des 4 formules de béton bitumineux à base de sable de dune représentant la stabilité à l'eau, c'est-à-dire la différence de comportement du matériau dans l'air et dans l'eau, varie entre 87% et 93% comme le montre la figure 6. Pour un même pourcentage de sable de dune, le rapport r/R augmente ou au pire reste stable avec l'augmentation du pourcentage de bitume. En effet, pour un même pourcentage de sable de dune, le bitume en excès permet de colmater les

vides et donc la résistance à l'eau ne peut que s'améliorer.

Bien que l'augmentation de la teneur en bitume de 4,7% à 5,3% a permis d'améliorer la plupart des caractéristiques étudiées à savoir la stabilité Marshall, la résistance à l'eau et la compacité, il est inutile d'aller au-delà de 4,7% puisque les résultats obtenus avec cette teneur sont conformes aux exigences normatives pour les différentes formules testées. Cette teneur sera retenue par la suite pour étudier l'influence de l'ajout des différents pourcentages de sable de dune sur les caractéristiques du béton bitumineux.

**Figure 6 : Rapport r/R et compacité des différentes formules testées.**



6. INFLUENCE DU POURCENTAGE DE SABLE DE DUNE SUR LES CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON BITUMINEUX

La figure 7a montre l'évolution de la stabilité et du fluage Marshall en fonction du pourcentage de sable de dune. La comparaison des résultats des essais Marshall réalisés sur les mélanges à différents pourcentages de sable de dune montre que la stabilité augmente avec l'augmentation du taux de sable de dune pour atteindre une valeur optimale avec un pourcentage de 10% de sable de dune.

Ce comportement s'explique par le fait que le sable de dune présente, comparé au sable de concassage, un pourcentage de fines plus important et un squelette plus dur (rappelons que la nature minéralogique du sable de dune est le quartz). L'ajout du sable de dune permet donc d'améliorer le comportement du mélange granulaire. L'augmentation du pourcentage de fines permet ainsi d'augmenter la compacité.

On note également qu'avec 4,7% de bitume et 10% de sable de dune, on obtient des valeurs de stabilité Marshall intéressantes, voisines de celles obtenues pour un béton bitumineux classique avec 5% de bitume (sans ajout de sable de dune).

Par ailleurs, le squelette permet de donner au matériau plus de résistance ce qui a permis de faire diminuer le fluage pour tous les pourcentages étudiés. En effet, l'ajout du sable de dune a permis l'augmentation du pourcentage des fines tout en améliorant le squelette du mélange en apportant également un plus grand pourcentage de matériaux légèrement plus grossiers. Cet apport a un double avantage : d'abord une diminution du pourcentage des vides par l'apport d'une plus grande quantité de fines, ensuite l'apport d'un matériau granulaire de bonne résistance mécanique.

La figure 7b montre l'évolution des résistances R et r ainsi que l'évolution du rapport r/R, en fonction du pour-

centage de sable de dune. Les résultats des essais Duriez confirment les résultats de l'essai Marshall. En effet, les résistances à l'air et dans l'eau et leurs rapports sont améliorés suite à l'ajout du sable de dune. Le maximum de résistance est atteint pour un pourcentage de 10% de ce dernier.

On note également que le mélange avec 4,7% de bitume et 10% de sable de dune présente des résistances r et R ainsi qu'une résistance à l'eau comparables à celles obtenues pour un béton bitumineux classique sans ajout de sable de dune et avec taux maximal de bitume de 5,3%.

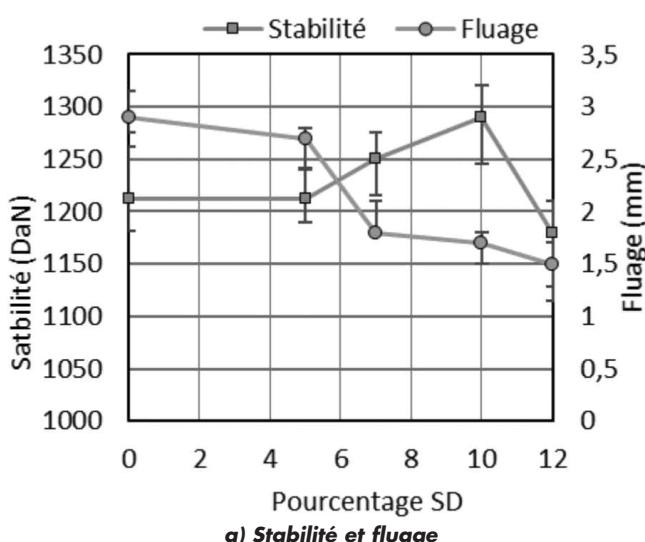
Tous les résultats des essais concordent pour conclure que le pourcentage optimal de sable de dune permettant d'améliorer le comportement mécanique, d'améliorer le fluage ainsi que la résistance à l'eau de l'enrobé est de 10%.

La figure 8 présente la variation des différents résultats des essais Duriez de la formule optimale BB10SD à 10% de sable de dune par rapport à la formule témoin BB0SD. Ces variations permettent de conclure que le fluage et les résistances à l'air et dans l'eau ont été en particulier bien améliorés. En effet, le fluage a diminué d'environ 41% alors que les résistances à l'eau et à l'air ont augmenté respectivement de 19% et de 11,6%. Ces évolutions traduisent des comportements recherchés pour pallier aux problèmes de dégradation de la chaussée.

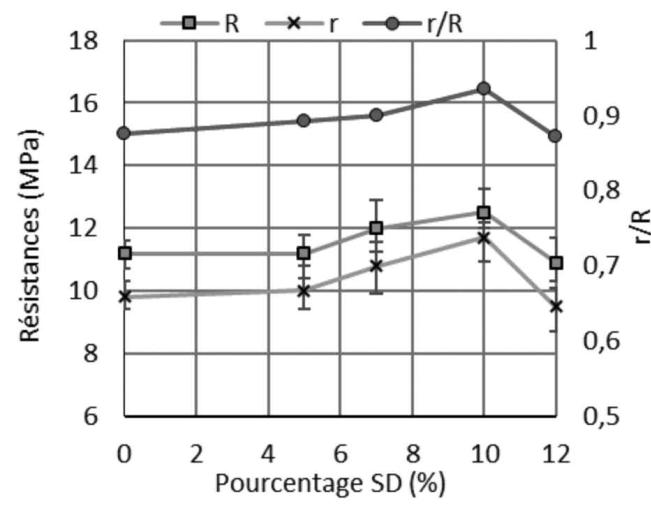
7. CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'optimiser la formulation des enrobés classiques par l'ajout de sable de dune et d'étudier son influence sur le comportement mécanique du mélange.

L'objectif principal était d'agir sur la fraction granulaire fine 0/3 en vue d'améliorer la compacité du mélange et par suite les caractéristiques mécaniques. Cet effet recherché a donné des résultats satisfaisants avec le sable de dune présentant une fraction fine importante.



a) Stabilité et fluage



b) résistances R et r et le rapport r/R

Figure 7 : Évolution des différentes caractéristiques du béton bitumineux en fonction du pourcentage de sable de dune pour une teneur en bitume de 4,7%.

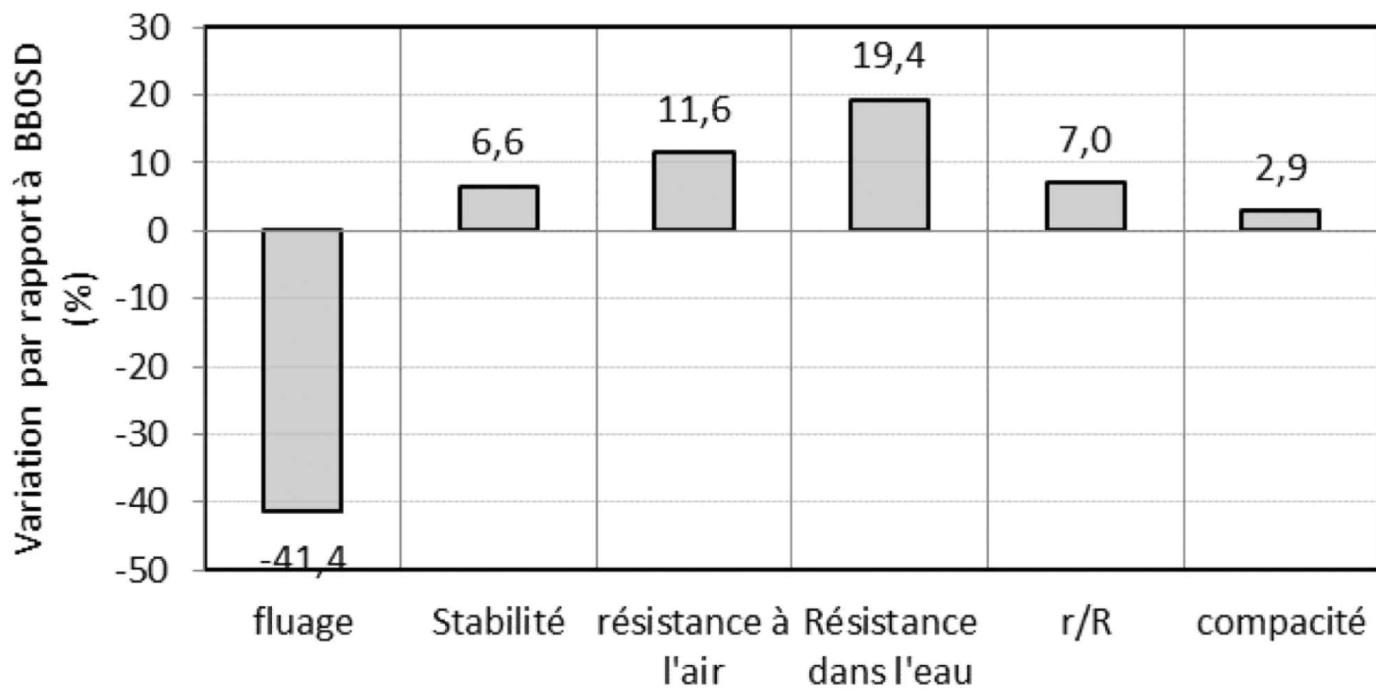


Figure 8 : Variation des résultats des essais Marshall et Duriez de la formule optimale BB10SD par rapport à la formule témoin.

L'étude a permis de prouver, dans un premier temps, que même si l'augmentation de la teneur en bitume avait un effet positif sur le comportement mécanique du mélange, la teneur minimale testée de 4,7%, permettait d'avoir des valeurs de stabilité Marshall, de fluage, de compacité et de résistance à l'eau très acceptables au vu des exigences normatives.

Dans un deuxième temps, les essais mécaniques réalisés ont permis de constater que le pourcentage optimal de sable de dune à ajouter au mélange est de 10%. Cet ajout permet d'améliorer les différents caractéristiques et en particulier le fluage Marshall et les résistances dans l'eau et à l'air.

Le coût de chaque mélange a été calculé en vue d'estimer les économies possibles. Une diminution de 0,6% de bitume (de 5,3% à 4,7%) et l'ajout d'un pourcentage optimisé de sable de dune ont permis d'obtenir des gains intéressants d'environ 15% du coût de construction tout en conservant des caractéristiques mécaniques acceptables au vu des exigences normatives.

Cette étude de formulation devrait être complétée par l'investigation des performances du mélange optimal retenu et notamment l'étude du module complexe et de fatigue qui permettrait de donner une description technique complète du matériau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] El EuchKhay S, Neji J, Loulizi A. "Compacted sand concrete in pavement construction: an economical and environmental solution," American Concrete Institute (ACI) - Materials journal, March-April 2010; Volume 107, N°2.
- [2] El EuchKhay S, Neji J, Loulizi A. "Shrinkage properties of compacted sand concrete used in pavements" ELSEVIER, Construction and Building Materials, September 2010; 1795:1790-9.
- [3] El Euch Khay S, Neji J, Loulizi A. "Compacted Dune Sand Concrete for Pavement Applications," Institution of Civil Engineers (ICE)/ proceedings – Construction Materials, Volume 164, Issue CM2, Avril 2011.
- [4] El Euch Khay S, Neji J, Loulizi A. "Proposition d'un nouveau matériau pour les chaussées en Tunisie : le béton de sable compacté" Annales du Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire, Mars 2010.
- [5] Neji, J., Smaoui, H. et Gandouz, W., "Proposal of New Materials for Road Foundation: A Saharan Sand Treated with Slag and a Compacted Sand Concrete" International Journal of Pavements, V. 5, No. 1, 2006, pp. 1-12.
- [6] AFNOR, Essais relatifs aux chaussées – Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés – Partie 1 : essai DURIEZ sur mélanges hydrocarbonés à chaud, NF P98-251-1 (2002).
- [7] AFNOR, Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 34 : essai Marshall, NF EN 12697-34 (2012).