
Étude de l'apport de l'ajout du sable de dune et du fraisât routier sur le comportement du béton bitumineux

Ahmed Siala^{1,2}, Saloua El Euch Khay², Jamel Neji²

1. Académie militaire Fondouk Jedid, département génie civil,
8012 Nabeul, Tunisie
ahmed.siala@planet.tn

2. Laboratoire de matériaux d'optimisation et d'énergie pour la durabilité
(LRMOED), École nationale d'ingénieurs de Tunis, université Tunis El Manar,
BP 37, Le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisie
eleuchsaloua@yahoo.fr, jamel.neji@enit.rnu.tn

RÉSUMÉ. Les ressources en matériaux pour la construction routière deviennent de plus en plus rares et de plus en plus coûteuses. Trouver des solutions pour substituer une partie de ces matériaux par des produits de recyclage ou des matériaux abondants et peu coûteux devient donc une nécessité. D'où l'idée d'utiliser les déchets de la réhabilitation routière (les fraisâts d'enrobés) ainsi que le sable de dune, deux matériaux très peu utilisés en construction routière en Tunisie. Différentes formulations ont été testées avec l'ajout de plusieurs pourcentages de fraisât seul dans un premier temps et de fraisât et de sable de dune ensuite. Les résultats trouvés montrent la possibilité de l'introduction du fraisât dans la formulation du béton bitumineux avec un dosage maximal de 40 %. De plus, l'ajout de 10 % de sable de dune permet d'améliorer considérablement les résistances et les fluages Marshall, la résistance à l'eau et le comportement au compactage des mélanges bitumineux obtenus. Les résultats trouvés rappellent ceux des enrobés à modules élevés.

ABSTRACT. Materials resources for road construction are becoming increasingly scarce and expensive. Finding solutions to substitute some of these materials with inexpensive and/or recycled materials is becoming a necessity. Hence the idea of reusing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), a waste from road rehabilitation projects, and dune sand, a cheap and abundant material, both for road construction projects in Tunisia. Different mixes were tested with the addition of several percentages of RAP alone at first and then both RAP and dune sand. The obtained results show the possibility of introducing RAP, at a maximum content of 40%, in the formulation of bituminous concrete. The addition of 10% dune sand makes it possible to considerably improve Marshall stability and flow, water resistance, and compaction behavior of the obtained bituminous mixtures. The results showed that the performance of the designed mixes is similar to that of high-modulus asphaltic concrete.

MOTS CLÉS : béton bitumineux, recyclage, fraisât d'enrobés, sable de dune, caractéristiques mécaniques.

KEYWORDS: bituminous concrete, reuse, RAP, dune sand, mechanical properties.

DOI: 10.3166/rcma.2017.00014 © 2017 Lavoisier

Extended abstract

Materials resources for road construction are becoming increasingly scarce in quantity and quality resulting in a rapid and important increase in construction costs. Thinking about reusing waste or inexpensive materials has become a necessity and not an option. Hence the idea of incorporating Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), considered as solid waste material in Tunisia, in the formulation of new hot-mix asphalt mixtures.

In addition to replacing a portion of natural aggregates, RAP also provides a quantity of residual bitumen. Even though this latter is aged, its till saves on the quantity of the new bitumen added to the mix. Previous studies carried out to investigate the effectiveness of using RAP in bituminous mixtures have shown that not only these additions improve the mechanical strength, but also result in significant financial savings.

The use of fine materials such as dune sand makes it possible to obtain mixtures with high mechanical strengths, which could approach those of high-modulus asphaltic concrete. Indeed, dune sand, which is abundant in Tunisia and still unused in road construction, presents, due to its mineralogical structure, a certain contribution both on the gradation and on the mechanical behavior despite its rounded nature, which requires special attention.

The problem is therefore to determine the optimum quantity of RAP and fine materials (dune sand) to achieve or even exceed the mechanical performances of conventional mixes while respecting the requirements of applicable standards to guarantee the handling and the efficiency of the new obtained materials.

In order to achieve this objective, various mixes were tested with several percentages of RAP and different percentages of new bitumen, taking into account RAP residual bitumen. The optimum content of RAP and bitumen could thus be determined.

Different percentages of dune sand were then added to the optimum mixture. The complex mixtures thus obtained were tested by measuring their Marshall stability and flow, the air and water resistance using the Duriez test, and by measuring the percentage change in voids during the gyratory compaction.

The results show the possibility of introducing RAP in the formulation of bituminous concrete with a maximum content of 40%. Above this level, the aged bitumen becomes in excess and acts negatively on the mechanical characteristics of the mixture. It has also been established that the optimum percentage of total bitumen is 5%, or only an addition of 3,3% of new bitumen.

Also, the addition of 10% dunes makes it possible to considerably improve Marshall stability and flow, water resistance, and compaction behavior of the bituminous mixtures. Beyond this rate, the rounded nature of dune sand alters the adhesiveness of bitumen and aggregates and adversely affects the mechanical characteristics of the mixtures.

In short, the results confirmed that a mixture made with 40% RAP, 5% total bitumen, and 10% dune sand has a performance similar to that obtained with high-modulus asphaltic concrete.

1. Introduction

Les fraisâts routiers sont des déchets très peu valorisés en Tunisie. Pourtant les quantités produites chaque année sont en continuelle augmentation sans qu'il y ait une vraie stratégie de valorisation de ces déchets. De plus, ces fraisâts contiennent un bitume résiduel, certes vieilli mais toujours utile, ainsi que des agrégats. Le gain financier et l'impact environnemental d'une valorisation des fraisâts routiers pourraient être très intéressants.

Des travaux antérieurs en Tunisie ont étudié l'opportunité d'utiliser le fraisât dans les graves ciments (El Euch Khay *et al.*, 2014) ainsi que dans les mélanges bitumineux (Siala *et al.*, 2014) et les résultats trouvés ont été très encourageants. Ce dernier travail a permis d'intégrer et de réutiliser le matériau fraisât d'enrobé bitumineux en formulant un béton bitumineux neuf avec différents pourcentages d'ajout de ce déchet jusqu'à l'obtention d'un mélange ayant des qualités comparables à celles d'un enrobé neuf. L'ajout du sable de dune du désert tunisien au mélange bitumineux avec ajout de fraisât a également été étudié. Le désert tunisien représente environ le tiers de la surface du pays et le sable de dune est un matériau dont regorge cette partie de la Tunisie. Il est, comme le fraisât, totalement inexploité en construction routière malgré ses qualités minéralogiques intrinsèques.

La valorisation du sable de dune dans la formulation d'un béton bitumineux classique (Siala *et al.*, 2015) et dans la construction routière (El Euch Khay *et al.*, 2011) a déjà été testée et a donné de très bons résultats.

L'objectif du présent travail est de trouver et de valider dans un premier temps le pourcentage optimal de fraisât à incorporer dans le béton bitumineux en vue de formuler un nouveau matériau présentant des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'un enrobé classique. Le taux optimal de bitume du béton bitumineux avec ajout de fraisât sera également étudié. Partant des taux optimaux de fraisât et de bitume trouvés, plusieurs formulations avec ajout de différents pourcentages de sable de dune seront étudiées pour trouver et valider le pourcentage de sable de dune optimal permettant d'aboutir à un matériau de meilleures caractéristiques mécaniques que celles d'un enrobé classique.

2. Identification des matériaux

2.1. Les granulats neufs

Les granulats neufs utilisés sont de classes granulaires : 0/3,4/7, et 7/14 et proviennent de la carrière de Djebel Ouest-SOMATRA située au Nord-Ouest de la

Tableau 1. Caractéristiques des granulats utilisés

Granulats Essais	0/3	4/7	7/14	Spécifications normatives (NF EN 13043)
Poids spécifique (t/cm ³)	2,71	2,63	2,64	2,5 à 3
Los Angeles	-	-	24	< 25
Micro-Deval	-	16	16	< 20
Équivalent de sable ES (%)	70	-	-	≥ 60
% de fines	15,5	1,1	0,8	-

Tunisie. Le but de cette identification est de vérifier que les granulats utilisés sont conformes aux spécifications normatives. Le poids spécifique, la dureté des éléments, la forme des granulats et leur propreté sont résumés dans le tableau 1. Toutes les caractéristiques trouvées sont conformes aux normes en vigueur.

2.2. Le bitume

Le bitume neuf utilisé est de classe 35/50. Sa densité spécifique est de 1,03 t/m³. Les essais de pénétrabilité et de point de ramollissement donnent les résultats présentés au tableau 2. Les résultats des essais d'identification montrent que les caractéristiques du bitume utilisé sont toutes conformes aux spécifications normatives.

2.3. Le fraisât

Le fraisât utilisé dans le présent travail provient du fraisage de l'autoroute A1 reliant Tunis à Hammamet. Deux échantillons de deux piles différentes ont été utilisés pour s'assurer de l'homogénéité du matériau utilisé. Ces deux échantillons de fraisât ont été caractérisés par des analyses granulométriques. Les courbes granulométriques des deux échantillons étudiés sont présentées sur la figure 1.

Les fraisâts ont également subi des essais d'extraction de liants (figure 2) afin de déterminer avec précision la quantité du bitume résiduel présent dans le matériau utilisé. Une analyse granulométrique a été réalisée sur les fraisâts après extraction du bitume. Les courbes granulométriques après extraction de bitume sont présentées sur la figure 3.

Les résultats de l'analyse granulométrique avant et après extraction ainsi que les teneurs en bitume résiduels sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 2. Résultats des essais sur bitume

Essai	Résultat de l'essai	Référence et exigence normative
Pénétrabilité avant RTFOT (1/10 mm)	39	35 à 50 (EN 1426)
Point de ramollissement avant RTFOT (°C)	53	50 à 58 (EN 1427)
Pénétrabilité après RTFOT (1/10 mm)	65	> 53 (EN 12607)
Point de ramollissement après RTFOT (°C)	57	> 52 (EN 1427)
Point d'éclair (°C)	260	> 240 (EN 22529)

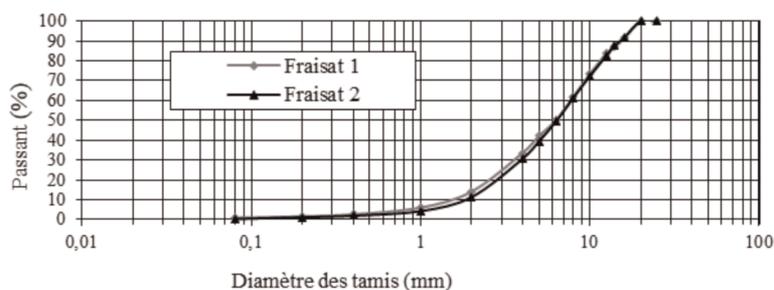


Figure 1. Courbe granulométrique des fraisâts utilisés



a) Prise d'essai pour l'extraction



b) Appareil d'extraction

Figure 2. Essai d'extraction du bitume

L'analyse granulométrique a permis de constater que la fraction 4/7 représente environ 30 %, ce qui permettra d'éliminer cette fraction dans le mélange bitumineux avec un taux de fraisât élevé.

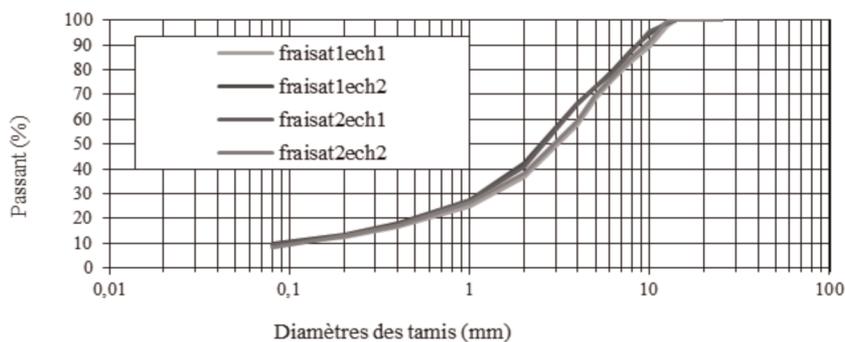


Figure 3. Courbes granulométriques des échantillons de fraisât après extraction de bitume

Tableau 3. Caractéristiques physiques des fraisâts utilisés

Caractéristique de fraisât	Fraisât 1		Fraisât 2	
	Ech1	Ech2	Ech1	Ech2
Granularité (mm)	de 0 à 14 mm :			
% des fines avant extraction	0,84		0,25	
Masse volumique réelle (t/m ³)	2,394		2,476	
Teneur en liant (%)	4,21	4,7	5,55	5,42
Moyenne	4,46		5,5	
% des fines après extraction	9,6	9,9	8,1	9,2
Moyenne	9,75		8,65	

Dans la suite de l'étude, le fraisât 1 qui présente une teneur en liant de 4,46 % et un pourcentage de fine de 9,75 % a été utilisé.

2.4. Le sable de dune

Deux sables de dune ont été utilisés. L'un provenant de Tataouine et le deuxième de Rjim Maatoug, deux villes du Sud tunisien. Des échantillons de ces sables sont présentés sur la figure 4.



a) *Sable de dune provenant de Rjim Maatoug*

b) *sable de dune provenant de Tataouine*

Figure 4. Sables de dunes utilisées

Tableau 4. Caractéristiques physiques des sables de dune

Essai	SD Tataouine	SD Rjim Matoug
Granulométrie	0-2 mm	
Pourcentage de fines	2	2,5
Masse volumique réelle (t/m^3)	2,63	2,54
Équivalent de sable (%)	81	67
Teneur en silice (%)	97,7	87,7
Teneur en sels (%)	0,22	0,33
Teneur en gypse (%)	0,13	0,15

Les caractéristiques physiques et chimiques des deux sables de dune ont été étudiées et sont présentées dans le tableau 4.

Le sable de dune retenu pour être utilisé dans cette étude est celui de Tataouine présentant de meilleures caractéristiques physiques que celui de Rjim Maatoug. Il présente un équivalent de sable et une teneur en silice meilleurs que ceux du sable de Rjim Maatoug. Il s'agit d'un sable fin. Sa nature minéralogique est le quartz dont la dureté est élevée.

Tableau 5. Compositions des différentes formulations étudiées avec ajout de fraisât

Composants	BB0F	BB20F	BB40F	BB50F
Sable 0/3 (%)	48	44	43	39
Gravier 4/7 (%)	17	6	0	0
Gravier 7/12 (%)	35	30	17	11
Fraisât (%)	0	20	40	50
Bitume pur ajouté 35/50 (%)	4,7/5,0/5,3	3,9/4,2/4,5	3,0/3,3/3,6	2,6/2,9/3,2
Bitume total (%)	4,7/5,0/5,3			

3. Effets de l'ajout du fraisât sur les caractéristiques du béton bitumineux

Trois formules de béton bitumineux avec différents pourcentages de fraisât (20 %, 40 % et 50 %) ont été mises au point. Une formulation de référence de béton bitumineux classique a également été étudiée. Pour chaque formule, trois séries de mélange ont été préparées en utilisant différents teneurs de bitume : 4,7 %, 5 % et 5,3 %. Le bitume contenu dans le fraisât est pris en considération dans la formulation. Un calcul a été fait pour déterminer les différents dosages en bitume neuf de sorte à compléter la quantité de bitume résiduel présent dans le fraisât. La composition massique des différentes formulations étudiées est présentée dans le tableau 5.

Pour chaque mélange, les granulats neufs, le fraisât et le nouveau bitume ont été mis séparément dans un four à 155 °C, puis, le mélange granulats neufs et fraisât chauds ont été introduits dans le mélangeur pendant 2 minutes, ensuite le bitume a été ajouté et le tout a été mélangé pendant 3 minutes.

Pour chaque composition d'enrobé réalisée et correspondant à un taux de fraisât défini, une série d'essais a été effectuée en vue d'identifier au mieux l'enrobé étudié. L'objectif étant d'obtenir une composition granulométrique et un dosage en liant optimaux. Les essais réalisés sont (figure 5) :

- analyse granulométrique (mélange à blanc) ;
- essai Duriez : pourcentage de vide, résistance à la compression, tenue à l'eau (AFNOR, 2002) ;
- essai Marshal : stabilité et fluage (AFNOR, 2012) ;
- essai PCG : compactibilité de l'enrobé (AFNOR, 1999).

Les essais réalisés ont permis de déterminer dans un premier temps le taux optimal de bitume et ensuite de déterminer le taux de fraisât permettant d'aboutir aux meilleures performances.

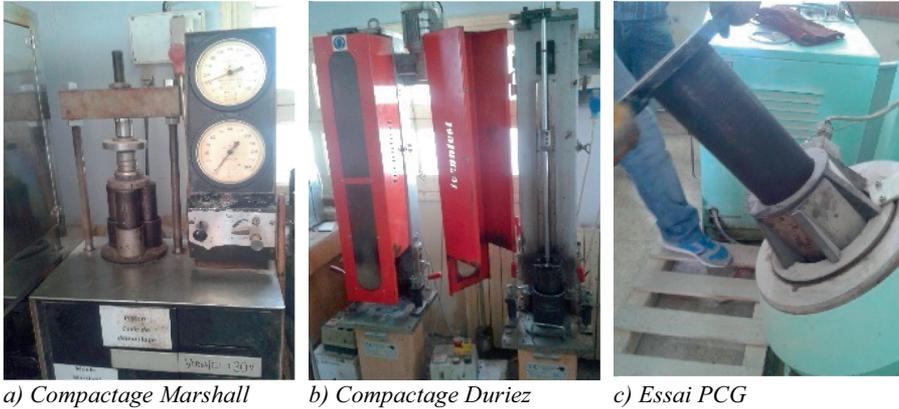


Figure 5. Essais effectués sur les enrobés

3.1. Détermination du taux optimal de bitume

Les résultats des essais pour les trois formulations avec ajout de fraisât ainsi que celle du béton bitumineux témoin sans ajout sont synthétisés sur la figure 6. En variant le taux de bitume de 4,7 % à 5 %, la stabilité Marshall du béton bitumineux avec ajout de fraisât augmente (figure 6a). Ceci s'explique par le fait que le liant a atteint son taux optimal et a comblé les vides du mélange. Au-delà de 5 %, le bitume devient en excès et le mélange devient plus visqueux, la compacité augmente et devient proche de 100 % puisque les vides ont été comblés par l'excès de bitume. Ceci explique la baisse de la stabilité (figure 6a). Le fluage augmente chaque fois qu'on a augmenté la teneur en bitume (figure 6b) et c'est un résultat attendu et logique puisque la composante visqueuse du mélange a augmenté. Il est toutefois important de préciser que tous les résultats trouvés restent conformes aux exigences normatives. L'augmentation de la teneur en bitume engendre également une augmentation de la résistance à la compression dans l'eau et dans l'air (figure 6c et d). En effet, le pourcentage des vides diminue, ce qui permet de minimiser la vulnérabilité à l'eau du mélange bitumineux. Le taux de bitume optimal est donc de 5 %. Ce taux sera retenu pour le reste des essais de ce travail.

3.2. Détermination du taux optimal de fraisât

La figure 7 synthétise l'évolution des caractéristiques mécaniques des différents mélanges en fonction du pourcentage de fraisât. Il est à préciser que ces courbes représentent les résultats des mélanges avec 5 % de bitume, considéré comme étant le taux optimal de liant. La lecture des résultats obtenus permet de constater que le taux optimale fraisât à retenir est de 40 %. En effet, avec ce taux, la stabilité Marshall s'améliore (et continue à s'améliorer au-delà de 40 %) à cause du fait d'ajouter un

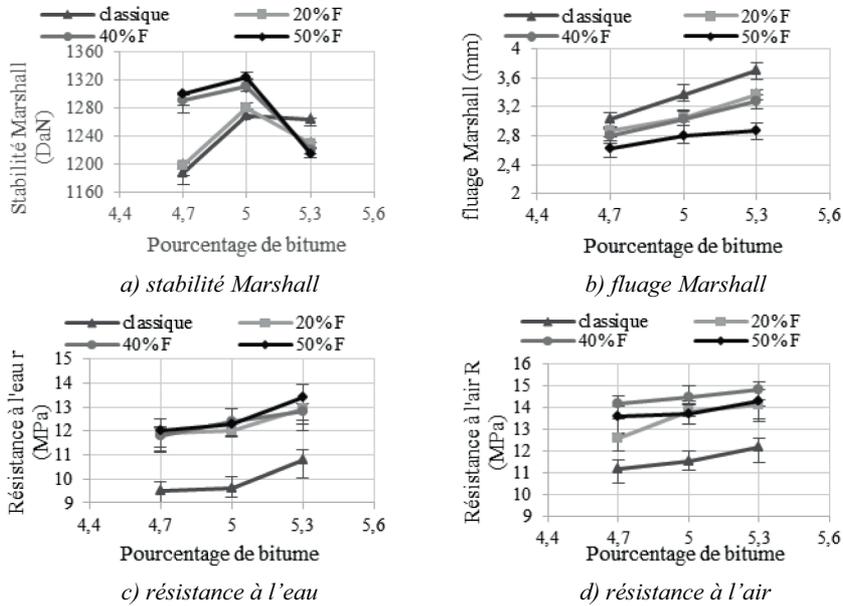


Figure 6. Variation des différentes caractéristiques en fonction de la teneur en bitume

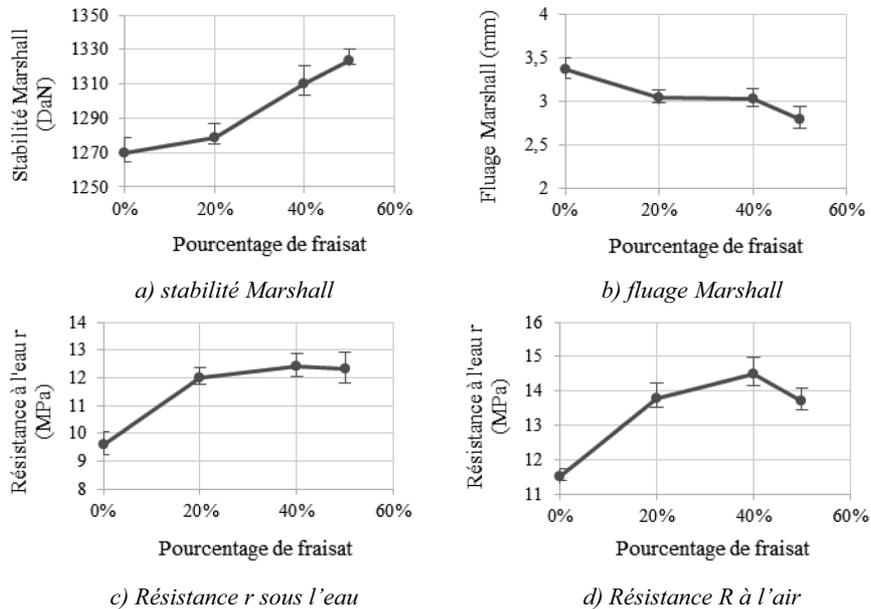


Figure 7. Variation des différentes caractéristiques en fonction du taux de fraisât

matériau contenant un bitume dur et vieilli. Il en est de même pour le fluage Marshall qui diminue avec l'augmentation du pourcentage de fraisât pour les mêmes raisons présentées précédemment. Ces résultats peuvent être expliqués par la présence dans le mélange d'un pourcentage de plus en plus élevé du bitume contenu dans le fraisât, considéré comme matériaux durs, et également par un éventuel léger excès de bitume d'apport puisque le bitume résiduel est estimé avec un taux minimum.

Les résistances à l'air et à l'eau présentent un optimum au niveau d'un taux de 40 % de fraisât (figure 7c et d). Au-delà de ce taux, les résistances diminuent, principalement à cause de l'excès de bitume vieilli et la diminution de l'apport de bitume neuf. Le bitume vieilli apporté par le fraisât est un matériau moins visqueux que le bitume neuf et comble donc moins bien les vides du mélange. Il pourra ainsi causer, s'il se trouve en excès, une diminution des caractéristiques mécaniques et notamment une plus grande vulnérabilité à l'eau d'où la diminution de la résistance à l'eau (figure 7c). Le pourcentage de 40 % de fraisât sera ainsi retenu pour la suite du travail.

3.3. Vérification de la compactibilité du mélange retenu

L'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) a été effectué suivant les directives de la norme NF P 98-252 (AFNOR, 1999) pour la formulation présentant une teneur en bitume optimal de 5 % et 40 % de fraisât. L'objectif de cet essai est de vérifier la compactibilité du matériau (son comportement au compactage) et de valider le mélange optimal obtenu. Les résultats des essais sont présentés sur la figure 8. Le tableau 6 présente les résultats qui peuvent être tirés des courbes de la figure 8. Ces résultats sont relatifs à :

- C_{10} : compacité à 10 girations ;
- V_{10} : pourcentage des vides correspondant ;
- C_{10e} : compacité à 10e girations, e étant l'épaisseur de mise en œuvre en cm. 10e est pris généralement égal à 60 pour un BB 0/14.

La courbe représentative du béton bitumineux avec ajout de 40 % de fraisât et 5 % de bitume s'insère bien par rapport aux valeurs normatives, ce qui prouve que le mélange proposé est un mélange acceptable qui présente des améliorations par rapport à un enrobé classique. En effet, la résistance au compactage (assimilée au compactage lors de la mise en œuvre) du mélange avec ajout de fraisât est meilleure que celle du béton bitumineux classique. Le pourcentage des vides du mélange avec fraisât est plus faible pour un même nombre de girations (tableau 6). Il en résulterait une meilleure résistance aux déformations sous trafic, ce qui est un effet recherché. Par ailleurs, la maniabilité de l'enrobé lors de sa mise en œuvre reste correcte puisque les spécifications normatives sont respectées.

Il est à préciser que la courbe PCG de ce mélange se place au-dessus de celle du béton bitumineux classique et se rapproche de celle des enrobés à module élevé, non encore utilisés en Tunisie.

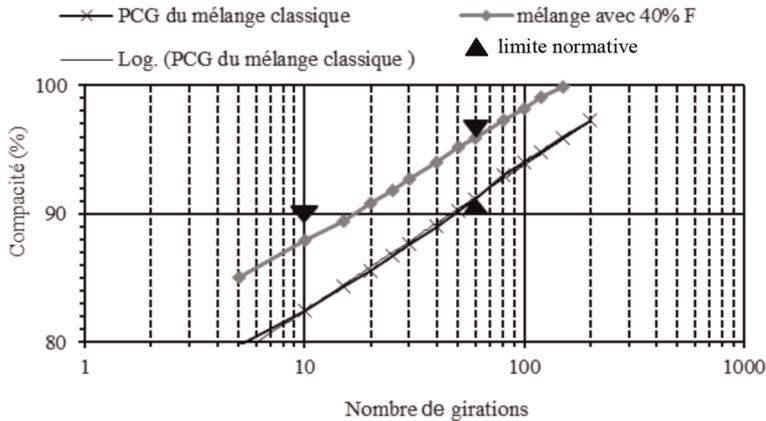


Figure 8. Courbe représentative de l'essai PCG pour les mélanges de béton bitumineux classique et avec 40 % de fraisât

Tableau 6. Résultats de l'essai PCG pour l'enrobé classique et l'enrobé avec fraisât

Référence	Enrobé avec 40 % de fraisât	Enrobé classique	Spécification normative
C ₁₀ (%)	87,9	82,5	≤ 89
V ₁₀ (%)	12,1	17,5	≥ 11
C _{10e} (%)	95,9	91,1	92-96
% des vides	4,1	8,9	4-8

4. Étude expérimentale de la valorisation du sable de dune dans la formulation de béton bitumineux

Quatre pourcentages de sable de dune, allant de 5 % à 12 %, ont été retenus pour étudier l'effet et l'influence de ce dernier sur les caractéristiques de l'enrobé avec ajout de 40 % de fraisât. Quatre formulations ont ainsi été élaborées. Des corrections granulaires ont été effectuées à chaque fois pour que les courbes granulométriques ne s'écartent pas trop du fuseau granulaire exigé par les spécifications normatives. Pour chacun de ces mélanges, trois dosages de bitume ont été également étudiés. Le tableau 7 récapitule les formulations étudiées ainsi que leurs caractéristiques.

4.1. Détermination du taux optimal de bitume

En vue de déterminer le pourcentage optimal de bitume ainsi que le pourcentage optimal de sable de dune à utiliser, les mêmes essais utilisés pour caractériser les

Tableau 7. Formulations étudiées pour le béton bitumineux avec ajout de fraisât et de différents pourcentages de sable de dune et leurs caractéristiques

Composants	BB40F5SD	BB40F7SD	BB40F10SD	BB40F12SD
Sable 0/3 (%)	32	31	31	30
Gravier 4/7 (%)	0	0	0	0
Gravier 7/12 (%)	23	22	19	18
Fraisât (%)	40	40	40	40
Sable de dune (%)	5	7	10	12
Bitume pur ajouté 35/50 (%)	3,1/3,4/3,7	3,1/3,4/3,7	3,1/3,4/3,7	3,1/3,4/3,7
Bitume totale (%)	4,8/5,1/5,4	4,8/5,1/5,4	4,8/5,1/5,4	4,8/5,1/5,4
Masse volumique réelle (t/m ³)	2,55	2,53	2,65	2,76
Pourcentage des fines	5,2	8,3	9,6	10,3
Surface spécifique (Σ)	9,04	9,03	13,5	14,14
Module de richesse	2,92/3,10/3,29	2,95/3,11/3,28	2,86/3,10/3,15	2,78/2,96/3,14

formulations à base de fraisât ont été reconduits et ont permis de dresser les courbes présentées sur la figure 9.

Le sable de dune présente, comparativement au sable de concassage, une fraction granulaire 0/2 plus importante et un squelette plus dur. Cet apport permet d'améliorer le comportement mécanique du mélange granulaire.

Les résultats présentés sur la figure 9 ont permis de constater que les caractéristiques mécaniques se sont améliorées avec l'augmentation du taux de bitume. Le liant permet en effet une meilleure cohésion des mélanges bitumineux. Il n'existe toutefois pas un optimum franc du taux de bitume pour les différents mélanges bitumineux étudiés. L'apport du sable de dune, de squelette dur, compense l'excès de bitume sensé faire diminuer les caractéristiques mécaniques au-delà d'un certain taux. Le fluage par contre augmente (figure 9b) à cause de l'excès de bitume qui est un matériau visqueux et mou.

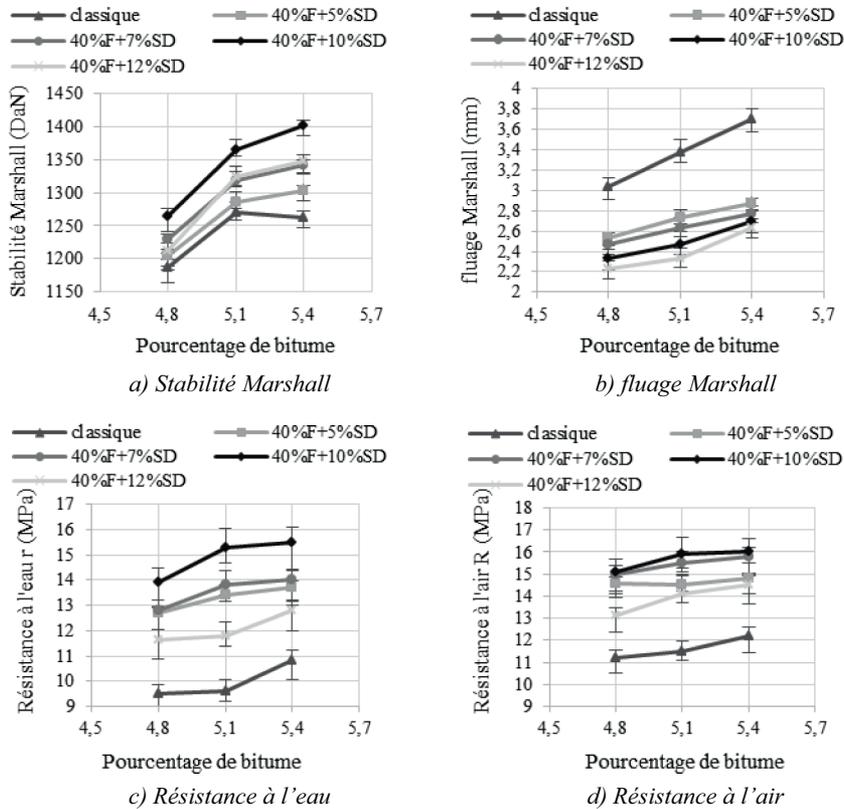


Figure 9. Variation des différentes caractéristiques des bétons bitumineux avec ajout de fraisât et de sable de dune en fonction du taux de bitume

Il est à préciser qu'avec 4,8 % de bitume, les résultats obtenus sont comparables avec ceux obtenus pour un béton bitumineux classique avec 5 % de bitume. Un taux de bitume de 4,8 % pourrait donc être retenu. Toutefois, et vu que le taux retenu pour l'ajout de 40 % de fraisât a été de 5 %, ce taux sera également retenu pour la détermination du taux optimal de sable de dune.

4.2. Détermination du taux optimal de sable de dune

La figure 11 permet de visualiser l'évolution des différentes caractéristiques mécaniques étudiées en fonction du taux de sable de dune tout en gardant un taux de fraisât constant de 40 % et un taux global de bitume de 5 %. L'interprétation des résultats obtenus permet de constater que le taux optimal de sable de dune à retenir est de 10 %. En effet, au-delà de ce taux, la stabilité diminue (figure 11a) ainsi que les résistances à l'air et à l'eau (figures 10 et 11c-d).

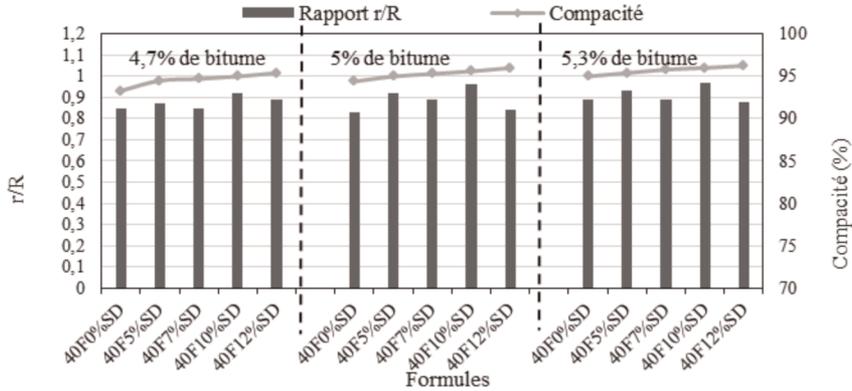
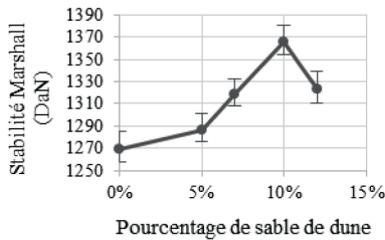
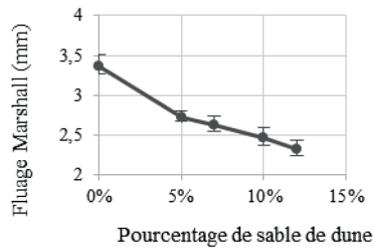


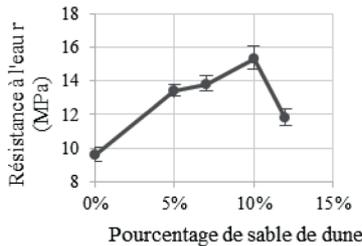
Figure 10. Évolution de la compacité et de la sensibilité à l'eau en fonction du pourcentage de sable de dune et du taux de bitume



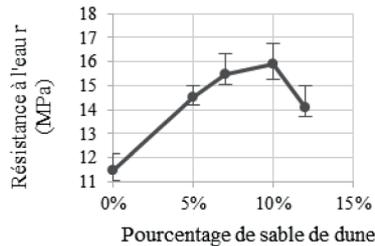
a) Stabilité Marshall



b) fluage Marshall



c) Résistance à l'eau



d) Résistance à l'air

Figure 11. Variation des différentes caractéristiques des bétons bitumineux avec ajout de fraisât et de sable de dune en fonction du taux de sable de dune

L'ajout du sable de dune, matériau ayant un squelette dur et une fraction granulaire 0/2 assez importante, a un double avantage : d'abord, une diminution du pourcentage des vides, d'où l'augmentation de la compacité (figure 10). Ensuite, une amélioration des résistances mécaniques (Marshall et Duriez) et une diminution du fluage dû à l'apport d'un matériau présentant un squelette dur (figure 11b).

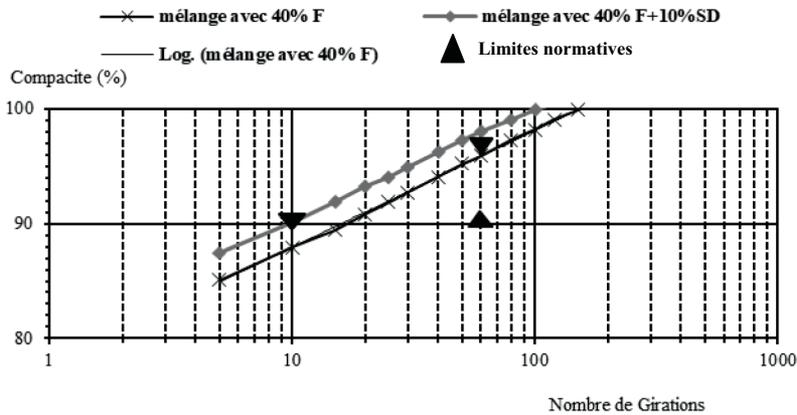


Figure 12. Comparaison entre les courbes d'évolution de PCG en fonction de nombre de girations

Toutefois, un excès de sable de dune entraîne une diminution des caractéristiques mécaniques du mélange bitumineux (figures 10 et 11). En effet, le sable de dune présente des granulats roulés ayant une faible adhésivité au bitume, ce qui entraîne, en cas de dépassement d'un certain seuil, une diminution de la stabilité Marshall et de la résistance Duriez.

4.3. Vérification de la compactibilité du mélange retenu (essai PCG)

L'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) a été effectué sur la formule comprenant 10 % de sable de dune, 40 % de fraisât et une teneur en bitume optimale de 5 %. L'objectif de cet essai est de vérifier la compactibilité du matériau et de valider le mélange optimal obtenu. Les résultats sont portés sur la figure 12.

La compactibilité du matériau, pour la formule testée, est ainsi vérifiée selon les critères de la norme NF P 98-138 (BB 0/14 classe 1).

On peut tirer de la courbe de la variation de la compacité en fonction du nombre de girations les résultats présentés dans le tableau 8.

Les résultats trouvés sont meilleurs que ceux d'un béton bitumineux classique ou d'un enrobé avec 40 % de fraisât sans sable de dune. Ils s'approchent davantage de ceux d'un enrobé à module élevé puisque le pourcentage des vides est encore plus faible que celui constaté pour les deux premiers mélanges. Les résultats obtenus prouvent que le nouveau mélange a des caractéristiques qui sont certes à la limite des exigences normatives mais présente des résistances mécaniques permettant de mieux résister aux charges du trafic routier.

Tableau 8. Comparaison des résultats de l'essai PCG entre enrobé classique et enrobé avec fraisât

Référence	Enrobé classique	Enrobé avec 40 % de fraisât	Enrobé avec 40 % de fraisât et 10 % de SD	Spécification normative
C ₁₀ (%)	82,5	87,9	89,5	≤ 89
V ₁₀ (%)	17,5	12,1	10,5	≥ 11
C _{10e} (%)	91,1	95,9	97,1	92-96
% des vides	8,9	4,1	2,9	4-8

5. Conclusion

Cette étude a permis de déterminer les taux optimaux de fraisât et de sable de dune à ajouter dans la formulation d'un béton bitumineux en vue d'obtenir un nouveau matériau présentant des caractéristiques comparables, voire meilleures, que celle d'un enrobé bitumineux classique.

Le taux de fraisât optimal retenu par cette étude est de 40 %. Au-delà de ce taux, le bitume résiduel devient en excès et tend donc à diminuer les caractéristiques mécaniques du mélange bitumineux. L'apport du fraisât, comportant un bitume résiduel dur permet également d'améliorer le fluage et donc le comportement à l'orniérage du matériau.

Avec ce taux optimal de fraisât, le taux de sable de dune optimal à ajoutera également été étudié. Le taux retenu est de 10 %. Avec ce taux, les résistances mécaniques obtenues s'approchent de celles d'un enrobé à module élevé. Au-delà de ce taux, toutes les caractéristiques mécaniques enregistrent une baisse due au caractère roulé des grains de sable de dune qui deviennent en excès et qui présentent un problème d'adhésivité au bitume.

L'étude a également permis de constater qu'il est possible d'agir sur le taux de bitume. En effet, malgré le fait qu'un taux de 5 % de bitume a été retenu, les résultats obtenus avec 4,7 % de bitume, 40 % de fraisât et 10 % de sable de dune sont meilleurs que ceux d'un béton bitumineux classique.

Il reste qu'il est possible de compléter cette étude en validant les résultats par la réalisation d'essais de module complexe qui permettraient de mieux étudier le comportement mécanique du mélange et donc de voir l'apport réel en termes de dimensionnement des chaussées.

Bibliographie

- AFNOR. (1999). Détermination du comportement au compactage des mélanges hydrocarbonés – Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire. *Essais relatifs aux chaussées*, NF P 98-252.

- AFNOR. (2002). Essai Duriez sur mélanges hydrocarbonés à chaud. *Essais relatifs aux chaussées – Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés*, partie 1, NF P98-251-1.
- AFNOR. (2012). *Essai Marshall. Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud*, partie 34, NF EN 12697-34.
- El Euch Khay S., Neji J., Loulizi A. (2011). Compacted dune sand concrete for pavement applications. *Inst. Civil Eng. Proc. Constr. Mater.*, vol. 164, n° CM2.
- El Euch Khay S., El Euch Ben Said S., Loulizi A., Neji J. (2014). Laboratory investigation of cement-treated reclaimed asphalt pavement material. *J. Mater. Civil Eng.*, vol. 27, n° 6.
- Siala A., El Euch Khay S., Neji J. (2014). Étude expérimentale de recyclage des fraisâts d'enrobés dans le béton bitumineux. *Journées scientifiques franco-maghrébine 2014*, Hammamet, Tunisie.
- Siala A., El Euch Khay S., Neji J. (2015). Étude expérimentale de la valorisation du sable de dune dans la formulation de béton bitumineux. *Ann. BTP*, vol. 67, n° 2, p. 25-31.