

Effets de l'incorporation du fondu de déchets de sachets plastiques sur la consistance du bitume et la stabilité du béton bitumineux

Houénou KOWANOU, D. Adolphe TCHEHOUALI, Emile A. SANYA* et Antoine K. VIANOU

Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquées (LEMA), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), Université d'Abomey-Calavi (UAC), 01 BP 2009 COTONOU, Bénin

* Correspondance, courriel : easanyas@gmail.com

Résumé

Les quantités de déchets plastiques produites au Bénin sont importantes, avec plus de 50% de sachets d'emballages. Cette situation provoque un problème environnemental majeur, en raison du caractère non-biodégradable de ces derniers. Dans la perspective de leur recyclage à travers les procédés de construction, le présent article est consacré à l'analyse des caractéristiques requises du liant, la pénétrabilité, le point de ramollissement et l'adhésivité, formulé à base du bitume de référence 50/70 auquel est incorporée, à environ 170°C, de la poudre de sachets plastiques fondus, refroidis et finement broyés et la stabilité Marshall du béton bitumineux décollant.

Pour 2 à 20% en masse d'incorporation de poudre de sachets plastiques dans le bitume, les différentes valeurs enregistrées ont révélé que la pénétrabilité, mesurée suivant la norme EN1426, diminue quand la teneur en poudre de sachets augmente donnant naissance à des liants bitumineux appartenant aux classes respectives 50/70, 40/60, 35/50, 30/45 et 20/30 alors que le point de ramollissement augmente. L'adhésivité est positivement améliorée avec l'accroissement de la teneur en sachet plastique au même titre que la stabilité Marshall du béton bitumineux décollant.

Mots-clés : *sachets plastiques, pénétrabilité, ramollissement, adhésivité, bitume, construction routière.*

Abstract

Effects of incorporation of the molten of plastic bags' waste on consistency of bitumen and the resulting bituminous concrete stability

The amounts of waste plastics generated in Benin are higher, containing over 50 % of packaging bags. This situation causes a major environmental problem, due to the non-biodegradable nature of the latter. In view of recycling waste plastic bags through the construction process, this article is devoted to analysis of required characteristics, as penetrability, softening point, glueyness and stability of bituminous concrete formulated using reference bitumen 50/70 in which has been incorporated, at about 170 °C, obtained powder from molten, cooled and finely ground plastic bags and Marshall stability of resulting asphalt concrete.

For 2 to 20 % (weight basis) of plastic bags powder incorporation in bitumen, the recorded different values clearly showed that, measured penetrability reduction according to the EN1426 standard decreases when the powder content increases, giving rise to bituminous binders belonging to respective known classes of 50/70, 40/60, 35/50, 30/45 and 20/30 whilst their softening points increase. Glueyness of these binders is positively improved by increasing plastic bag contents as well as the Marshall stability of ensuing bituminous concrete.

Keywords : *plastic bags, penetrability, softening, glueyness, bitumen, road construction.*

1. Introduction

La survie des êtres vivants est de plus en plus menacée par la quantité de déchets qu'ils produisent polluant gravement le cadre environnemental [1-3]. En 2012, les décharges béninoises ont accueilli plus de 12.000 tonnes de déchets plastiques dont plus de 50% de sachets d'emballage dont 86% sont jetés dans la rue après usage, 5,50% incinérés pour faire place nette, 5,50% brûlés comme source d'énergie et 2,75% restants pour autres usages [4]. Un recyclage, utilisant des techniques modernes, s'impose donc aujourd'hui comme une des voies incontournables aux populations du Bénin ainsi qu'autres pays au sud du Sahara en vue de garantir un environnement sain et une certaine survie. Malheureusement, dans la majorité de ces pays, les moyens techniques et financiers sont quasiment inexistantes pour assurer un recyclage classique. Or, l'une des voies, les plus pertinentes pour valoriser de tels déchets, est l'utilisation dans les procédés de construction. Des déchets de sachets plastiques ont été incorporés aux bétons après les avoir convenablement conditionnés [5-7].

Les résultats ont montré que les résistances mécaniques de tels bétons sont réduites à mesure que les pourcentages de déchets plastiques incorporés ont augmenté. Par contre, le procédé a produit l'effet bénéfique consistant en la réduction de la dégradation du matériau en milieu agressif, avec notamment une diminution sensible de la perte de masse des mortiers lorsqu'ils sont conservés dans l'acide sulfurique. Par ailleurs, il a été mis en exergue la possibilité d'utiliser des sachets d'emballage et des pneus pour la réalisation de la couche de roulement d'une chaussée [8-11]. L'ajout au bitume, de déchets plastiques en hachis de 2,36 mm à 4,75 mm chauffés autour de 170°C et remués durant une trentaine de minutes, a permis une diminution des valeurs des paramètres de contrôle, pénétrabilité et ductilité, une augmentation des points de ramollissement, d'éclair et de feu, l'amélioration de la stabilité Marshall et de l'adhésivité. Cependant, le procédé présente des limites car, lorsque le plastic est incorporé au bitume à un taux pondéral dépassant 2%, il s'y produit une ségrégation au refroidissement du matériau.

Cette limitation a conduit au développement de méthodes alternatives orientées vers une utilisation plus abondante de déchets plastiques dans la réalisation de chaussées souples. On peut citer la méthode ayant consisté à chauffer les granulats à environ 170°C et à y introduire les morceaux de plastiques broyés à tailles variant entre 2,36 mm et 4,75 mm. Le plastic ramolli enveloppe les grains de granulats mélangés au bitume 60/70 ou 80/100 préalablement porté à 160°C. Les liants ainsi élaborés ont présenté des caractéristiques améliorées, notamment une meilleure adhésivité, un point de ramollissement plus élevé, une meilleure pénétrabilité et une résistance plus accrue vis-à-vis de la pénétration de l'eau. Le présent article est consacré à l'étude de l'influence de l'incorporation au bitume, de sachets plastiques fondus, refroidis et mis en poudre, sur la pénétrabilité, le point de ramollissement et l'adhésivité, dans la perspective de l'utilisation massive des déchets plastiques dans les procédés de construction de chaussées souples.

2. Matériels et Méthodes

2-1. Matériaux utilisés

Les matériaux sur lesquels ont porté les tests rapportés dans cet article sont catégorisés comme ils suivent.

- Pour les différents essais, respectivement de pénétrabilité et de ramollissement à bille et anneau : le bitume témoin 50/70 désigné M_0 d'une part, et le même bitume 50/70 additionné de poudre de sachets plastiques, à teneurs de 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 15%, 18% et 20% en masse du bitume (substitution partielle), d'autre part. Ces mélanges ont été identifiés respectivement par M_1, M_2, M_3 à M_9 , soient neuf variantes de mélanges-liants et le témoin M_0 .

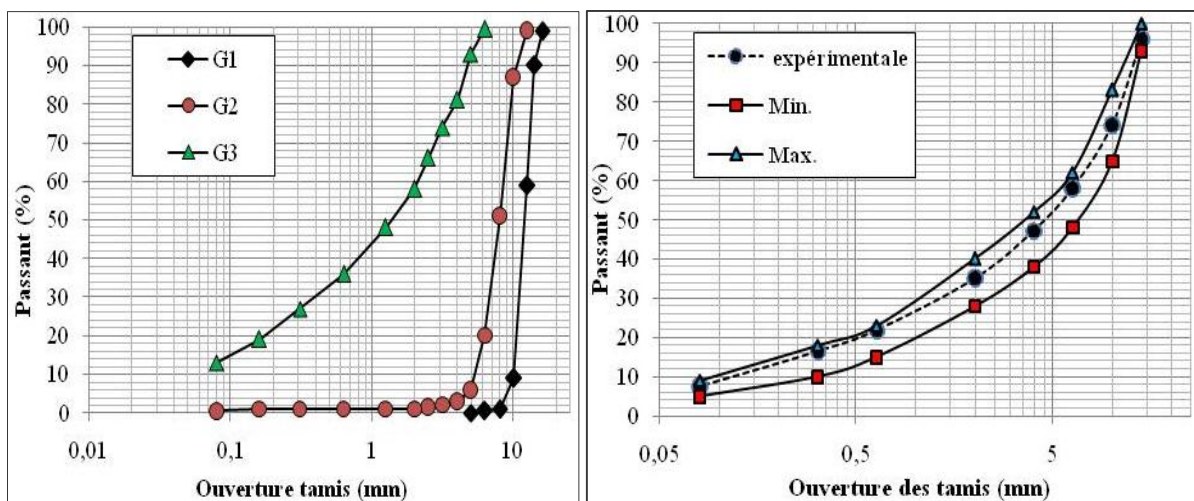
- Pour les essais d'adhésivité : les matériaux utilisés sont les mélanges-liants M_0 à M_5 précédents et les fines de granites concassés, de tailles comprises entre 0,2mm et 0,5mm, de masse volumique absolue 2690 kg/m³;

- Pour les essais Marshall: les matériaux impliqués sont issus du granite concassé et fractionné en trois classes granulaires G_1 (10/14), G_2 (6/10) et G_3 (0/6) présentés à la **Figure 1**.

Tableau 1 : Série de tamis utilisés et granulométrie optimale théorique

Ouverture tamis (mm)	16	14	12.5	10	8	6.3	5	4
Passants (%)	100	96.5	89.5	74	65.5	55	52.5	45
Ouverture tamis (mm)	3.15	2.5	2	1.25	0.63	0.315	0.16	0.08
Passants (%)	41	36.5	34	26.5	19	15	10.5	7

La série des tamis utilisés est celle de la norme AFNOR dont les ouvertures et les différents pourcentages de passants théoriquement attendus sont consignés dans le **Tableau 1**. Le granulat utilisé en définitive provient de la reconstitution des trois granulats G_1, G_2 et G_3 **Figure 1a**, reconstitution opérée en se basant sur le fuseau granulométrique recommandé par la norme P18-560 **Figure 1b**.



1a : Granulométries des granulats G_1, G_2, G_3

1b : Situation du mélange granulat utilisé

Figure 1: Granulométrie du mélange granulat utilisé et sa situation par rapport aux recommandations de la Norme Routière P 18-560, Version 1997: deux courbes extrêmes

On peut observer que la granulométrie du granulat résultant se retrouve effectivement bien intégrée à l'intérieur du fuseau normatif (*Figure 1b*). Ce granulat comporte, en proportions pondérales, 25% de granulat G_1 , 20% de granulat G_2 et 55% de granulat G_3 . La masse volumique moyenne de ces granulats est de 2690 kg/m^3 .

2-2. Méthodes

2-2-1. Elaboration du liant: poudre de sachets plastiques

L'élaboration du nouveau liant bitumineux a consisté à d'abord fondre, à environ 300°C , les sachets plastiques dans un récipient métallique approprié. Le liquide obtenu a ensuite été refroidi à l'air ambiant (température : $29\text{-}31^\circ\text{C}$, humidité relative : $67\text{-}73\%$), puis le solide découlant finement broyé en poudre passant le tamis $0,160 \text{ mm}$.

2-2-2. Réalisation des mélanges bitumineux

Neuf (09) différents mélanges bitumineux indexés $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8$ et M_9 ont été élaborés. Ils contiennent des pourcentages en masse de sachets plastiques fondus, refroidis et réduits en poudre, respectifs de 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 15%, 18% et 20%, en substitution partielle au bitume de référence 50/70, le témoin à 0% étant indexé M_0 . L'opération de mélange, de la poudre de sachets plastiques au bitume, est effectuée à chaud dans le récipient métallique à environ 170°C .

2-2-3. Mesure de la pénétrabilité des liants

L'essai de pénétrabilité est effectué conformément à la procédure de la norme NF EN-1426. Il consiste à lâcher, pendant 5 s, une aiguille normalisée de diamètre 1,0 mm, sous une charge de 100g et à ensuite mesurer, de combien de dixièmes de millimètre, elle s'enfonce dans le bitume refroidi se trouvant préalablement plongé dans de l'eau maintenue à la température de 25°C et sorti juste pour l'essai. Ce paramètre est celui qui permet de définir la classe du bitume [12]. Le bitume témoin, dont la classe déterminée a priori est de 50/70, a été d'abord soumis seul (pur) à l'essai en vue de valider le protocole. Les mêmes essais ont ensuite été effectués sur les neuf (09) matériaux issus des mélanges constitués à différentes teneurs en poudre de sachet.

Le matériel utilisé est celui prescrit par la norme NF-EN 1426 comportant en substance :

- un pénétromètre DOW, de marque ControLab, de portée 0 à 36 mm et ses accessoires ;
- un thermomètre à tige, de portée 0 à 200°C , pour le suivi de la température de la coupole témoin, en vue de son maintien à la valeur constante égale à 25°C ;
- un chronomètre, pour mesurer le temps de chargement des échantillons ;
- une balance sensible au centième de gramme, pour peser le bitume et les différentes proportions de la poudre de sachets ;
- une bassine d'eau servant de bain aux échantillons pendant les essais ;
- un réfrigérateur, pour se procurer de glaçons lors des vérifications du tarage des thermocouples ;
- une chambre climatisée, pour entretenir la température d'essais à 25°C .

2-2-4. Mesure du point de ramollissement à bille et anneau (Ring and Ball)

L'essai de détermination du point de ramollissement par Ring and Ball est réalisé selon la procédure de la norme NF EN-1427. Le principe réside dans la recherche de la température à laquelle un bitume parvient à une consistance déterminée conventionnellement.

Le point de ramollissement du bitume de référence, de la classe 50/70, étant connu (norme NF EN 1427), celui du bitume réel prélevé et traité, à titre de témoin, a d'abord été soumis à l'essai. Ensuite, on s'est intéressé à ceux des neuf (09) liants bitumineux constitués précédemment en fonction des différentes teneurs en poudre citées plus haut. Le matériel utilisé à cet effet est celui prescrit par la norme NF EN 1427.



Figure 2 : *Dispositif standard de mesure de ramollissement à bille et anneau*

La **Figure 2** présente une photographie du dispositif de mesures à bille et anneau.

Ce dispositif standard de mesure est constitué en outre:

- * d'une plaque de verre, pour polir, à la vaseline, les deux (02) faces des échantillons mis dans les anneaux;
- * d'un bain de sable offrant, sans contact direct du bocal de verre avec le feu, la chaleur requise pour que la température de l'eau abritant les anneaux, billes et échantillons, puisse s'élever progressivement sans dépasser 5°C par minute ;
- * d'un réchaud à gaz, pour la fusion du bitume en vue du remplissage des anneaux, d'une part, et l'entretien de la température du bain de sable, d'autre part.
- * d'un thermomètre à tige, de portée 0 à 200 °C, permettant le suivi permanent de l'évolution de la température;
- * d'un réfrigérateur utilisé à la production des glaçons permettant à chaque fois de ramener la température du dispositif à la cote de 5°C, température de départ d'essai;

2-2-5. Mesure de l'adhésivité Riedel et Weber

La mesure s'effectue sur des boulettes, de masse 0,50 g, formées à partir du liant bitumineux et d'un sable concassé très fin, de classe granulaire 0,2/0,5 mm. Ce matériau bitumineux est réalisé en mélangeant à

chaud 71 mL de granulats et 29 mL de bitume. Le matériel utilisé dans cette série d'essais est conforme à la norme NFT66-018 et comprend essentiellement:

- * une balance sensible au centième de gramme, pour peser les boulettes à soumettre aux essais, de masse environ égale à 0,50 g,
- * un réchaud à gaz, destiné à la fusion du bitume et le chauffage du granulats et un bec à gaz de Benson, pour amener à ébullition la solution portant l'échantillon ;
- * un tube à essais gradué, pour mesurer le volume des matériaux et un autre tube à essais gradué, aménagé pour permettre que l'échantillon, dans sa solution d'étape de 6 cm³, puisse être porté au bec de Benson à gaz, pendant le temps normal de 60 secondes, à partir du début d'ébullition;
- * un chronomètre, permettant de suivre le temps de latence fixé à 60 minutes et le temps d'essai de 60 secondes ;
- * de l'eau distillée et divers accessoires dont la pince de bois et des réactifs chimiques constitués de solutions aqueuses de carbonate de sodium (Na₂CO₃). Dix solutions de carbonate de sodium, sont préparées et indexées de S₀, S₁ à S₉ correspondant respectivement à des concentrations allant de 0 g/L d'eau distillée (témoin), 0,414 g/L, 0,828 g/L, 1,656 g/L, 3,312 g/L, 6,625 g/L, 13,25 g/L, 26,5 g/L, 53,0 g/L à 106,0 g/L.

L'essai de Riedel et Weber est celui correspondant à la procédure de la norme NFT 66-018. Il consiste à plonger, les boulettes précédemment réalisées, dans des solutions de carbonate de sodium, de concentrations croissantes, et en évaluer les degrés de séparation liant-grulats i.e. le désenrobage. Lorsque le désenrobage commence à une certaine concentration, sur une boulette donnée et devient total à une autre concentration avec une autre boulette, on retient, pour la valeur de sa cote, les valeurs combinant les deux côtes correspondant aux concentrations marquant le désenrobage partiel et le désenrobage total. Ainsi, par exemple, la cote 3-5 signifie que le désenrobage a commencé avec la solution S₃(1,656 g/L) et a été total avec la solution S₅(6,625 g/L). Selon les dispositions de la norme, les cotes finales de 1, 2, 3 et 4 indiquent que le liant possède une adhésivité suffisante, celles 5, 6, 7, 8, 9 et 10, une bonne et très bonne adhésivité [12]. Les cahiers des charges de chaque projet de bitumage précisent clairement la cote exigée. Le bitume témoin 50/70 a d'abord été testé, ensuite les différentes variantes de liants bitumineux issues de l'incorporation des teneurs en poudre de sachet citées.

2-2-6. Essais Marshall

L'essai Marshall consiste à compacter des éprouvettes, par damage, selon une procédure déterminée, puis à les soumettre à un essai de compression. Le matériel utilisé est conforme à celui prescrit par la norme NF P98-251-2 et comprend essentiellement: une presse Marshall de marque IGM, des moules Marshall et une dame Marshall, une balance de portée 500 g sensible au centième de gramme et une balance de portée 4000 g sensible au dixième de gramme, un thermomètre à tige de portée 200°C et un thermomètre à mercure de portée 150°C, une étuve de portée 250°C, un chronomètre, un réchaud à gaz et un bain thermostaté de 80 litres réglé à 60°C. Les proportions des différents constituants du mélange bitumineux ont été déterminées suite à une formulation faisant appel à une série d'essais permettant de satisfaire les critères de convergence en stabilité, en compacité et en fluage fixés par le cahier des charges rédigé par le maître d'œuvre et d'évaluer finalement le dosage optimal de chacun de ces constituants.

2-2-7. Formulation de béton bitumineux

2-2-7-1. Détermination des teneurs d'essais

La formulation du béton bitumineux, destiné à confectionner les échantillons d'essais Marshall, est effectuée sur la base des valeurs des paramètres pertinents classiques que sont le module de richesse en liant, la

surface spécifique et la masse volumique absolue des granulats. La surface spécifique est déterminée par la formule suivante [12]:

$$100 \cdot \beta = 0,25 \cdot g + 2,3 \cdot S + 12 \cdot s + 135 \cdot f \quad (1)$$

avec β la surface spécifique des grains, g le pourcentage des grains de diamètres supérieurs à 5mm, S le pourcentage des grains de diamètres compris entre 0,315mm et 5mm, s le pourcentage des grains de diamètres compris entre 0,08mm et 0,315mm et f le pourcentage des grains de diamètres inférieurs à 0,08mm [12].

Pour ce calcul, la surface spécifique est, dans le cas de la présente étude, de $\beta = 12,2645 \text{ m}^2/\text{kg}$. Le module de richesse en liant (m), sous le climat chaud, est compris entre 3,5 et 3,75 [12] et la teneur en liant à considérer en est fonction. En effet, les deux paramètres sont liés par la relation:

$$P = m \cdot \sqrt[3]{\beta} \quad (\%) \quad (2)$$

La teneur maximale en liant (P_{max}) est déduite de la **formule (2)** en y substituant la valeur maximale du module de richesse (m_{max}), soit $m_{max} = 3,75$. On obtient alors : $P_{max} = 6,2\%$.

La densité absolue standard des granulats (d_{ac}) étant de 2,65 et la densité absolue effective des granulats (d_{ef}) dans nos essais de 2,69, il s'impose alors une correction à appliquer au calcul de la teneur en liant. Le coefficient correcteur k , rapport de la densité absolue conventionnelle à la densité effective, est égal à : $k = d_{ac} / d_{ef} = 2,65 / 2,69 = 0,985$.

Ainsi, la teneur maximale en liant corrigée devient :

$$P_{max, corrigé} = 6,2 \cdot k = 6,2 \cdot 0,985 = 6,1\% \quad (3)$$

A partir de la valeur de la teneur en liant maximale corrigée ($P_{max, corrigé}$), les teneurs en liant à expérimenter effectivement ont été calculées. Pour ce faire, elles ont été considérées comme dérivant d'une suite arithmétique dégressive de raison 0,3. Ces valeurs sont alors au nombre de trois respectivement : 6,1 % ; $(6,1 - 0,3)\% = 5,8\%$ et $(5,8 - 0,3)\% = 5,5\%$.

2-2-7-2. Composition du béton bitumineux

La masse des constituants à introduire dans le moule Marshall, selon la norme NF P98-251-2 pour chaque gâchée, est de 1200 g. La masse des granulats (M) à considérer est déterminée en fonction de $P(\%)$ à partir de la formule :

$$M = (100 \cdot 1200) / (100 + P) \quad (4)$$

Son application conduit aux valeurs des différents constituants consignées dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Proportions des constituants des mélanges conduisant aux bétons bitumineux

Teneurs en liant (%)	6,1	5,8	5,5
Masse totale granulats (g)	1131	1134	1137
Masse granulat G_1 (g)	283	284	284
Masse granulat G_2 (g)	226	227	227
Masse granulat G_3 (g)	622	624	625
Masse de liant (g)	69	66	63
Masse totale (g)	1200	1200	1200

Les teneurs théoriques en liant ainsi estimées ont alors été exploitées pour confectionner les différentes éprouvettes de bétons bitumineux testés. Les paramètres de contrôle classiques, à savoir la stabilité Marshall, la densité apparente, la compacité et le fluage décollant des essais, ont permis de déterminer la teneur optimale en bitume.

3. Résultats et discussion

3-1. Résultats des mesures de la pénétrabilité du liant retenu

Les valeurs enregistrées lors des essais de pénétrabilité sont regroupées dans le **Tableau 4**. Elles montrent que l'introduction de la poudre issue des sachets plastiques fondus, refroidis et broyés, exerce une grande influence sur la pénétrabilité du liant. En effet, l'expression des valeurs obtenues et traduites en plages de valeurs, moyenne des valeurs et des classes d'appartenance, la plus pertinente choisie parmi les neuf classes de bitume définies par la norme EN 1426, a permis de catégoriser les différents mélanges effectués.

Ainsi, les mélanges indexés M_0 et M_1 , M_2 et M_3 , M_4 et M_5 , M_6 , puis M_7 et M_8 correspondent à des liants bitumineux de classes respectives 50/70, 40/60, 35/50, 30/45 et 20/30. La pénétrabilité obtenue avec la teneur en poudre de sachets de 20% a conduit à conclure que le mélange bitumineux correspondant M_9 sort des bitumes routiers classiques. Il entre dans les classes des bitumes spéciaux de pénétration 10/20 et 15/25 destinés à la mise au point de béton bitumineux à module élevé (BBME). Ces classes de bitumes, d'après les spécialistes du Groupement Professionnel Français du Bitume, apportent plutôt une réponse aux problèmes engendrés par l'accroissement imprévu du trafic lourd.

Tableau 4: Résultats des essais de pénétrabilité sur les mélanges bitumineux constitués

Mélanges bitumineux testés	Teneur en poudre de sachets plastiques (%)	Valeurs de pénétrabilité mesurées (10^{-1} mm)						Plage de valeurs obtenues (10^{-1} mm)	Valeur moyenne arrondie (10^{-1} mm)	Classes d'appartenance (10^{-1} mm)
		Série 1		Série 2						
M_0	0	64	56	61	62	56	65	56-65	61	50-70
M_1	2	59	54	60	59	55	54	54-60	57	50-70
M_2	4	51	53	55	55	52	51	51-55	53	40-60
M_3	6	49	46	47	47	50	48	46-50	48	40-60
M_4	8	44	45	42	46	43	44	42-46	44	35-50
M_5	10	37	40	41	39	39	41	37-41	40	35-50
M_6	12	33	35	32	32	34	35	32-35	34	30-45
M_7	15	27	28	26	25	27	26	25-28	27	20-30
M_8	18	23	21	22	22	23	22	21-23	22	20-30
M_9	20	20	19	19	19	19	20	19-20	19	Hors norme

3-2. Résultats de mesures du point de ramollissement des liants constitués

A l'analyse des valeurs enregistrées durant nos mesures et figurant dans le **Tableau 5**, on peut noter que, le point de ramollissement obtenu pour le bitume de référence à nous fourni comme étant celui 50/70 (36-37°C) est relativement faible par rapport aux prescriptions de la norme EN1427 d'après laquelle ces valeurs devraient se situer entre 46 et 54°C. Cette différence pourrait être attribuée à la qualité voire la source d'approvisionnement et aux conditions de stockage de ce matériau avant son entrée en laboratoire. Le bitume témoin utilisé n'est probablement pas celui normalisé mais de façon globale, les résultats montrent que le point de ramollissement s'accroît à mesure que la teneur en sachets dans le liant augmente. Nos résultats corroborent ceux publiés ailleurs où avait été observée une tendance similaire [8].

Tableau 5 : Résultats des mesures du point de ramollissement des différents mélanges

Billes d'essais (diamètre)	Mélanges bitumineux et valeurs de leurs points de ramollissement (°C)							
	M ₀	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇
Bille 1 (9,35 mm)	36	41	41	41	43	43	50	> 110
Bille 2 (9,35 mm)	37	42	43	43	44	45	51	> 110
Moyenne (°C)	36,5	41,5	42	42	43,5	44	50,5	> 110

Le liant contenant 15% en masse de sachets plastiques (M₇) présente des valeurs de points de ramollissement dépassant les limites classiques admissibles (> 94°C) au regard du dispositif expérimental (bain d'eau). Avec un bain de glycérol à 110°C, les deux billes ont chuté en perforant les échantillons, sans ramollissement du disque de bitume. L'expérience a été arrêtée à M₇ en raison du rapprochement du point éclair du glycérol qui est de 160°C.

3-3. Résultats de mesures d'adhésivité des liants

Les valeurs des cotes d'adhésivité enregistrées dans les mesures effectuées sont celles consignées dans le **Tableau 6**. L'analyse de ces résultats amène à conclure que l'introduction de la poudre de sachets dans le bitume influence, de manière positive, son aptitude à adhérer aux granulats. Cette conclusion est attestée par le fait que l'on ait obtenu une augmentation des valeurs des cotes d'adhésivité à mesure que s'accroît la teneur en poudre de sachets plastiques fondus introduite dans le liant bitumineux.

Tableau 6 : Valeurs des cotes d'adhésivité mesurées en fonction de la teneur en sachet

Mélanges bitumineux	M ₀	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
Cotes d'adhésivité	2-10	5-10	5-10	6-10	9-10	>10

La solution de concentration S₂ a engendré le démarrage du désenrobage du bitume témoin et, avec la solution S₉, le désenrobage obtenu n'a été que partiel. Tous les autres mélanges bitumineux ont opposé une résistance à l'arrachement avec les solutions allant des concentrées à très concentrées, au point où on n'observe un début de désenrobage qu'au-delà de la solution S₄. Le désenrobage total n'a pas été observé, même avec la solution la plus concentrée. Cependant, la boulette de liant réalisée et soumise à essais au terme desquels la cote 10 est atteinte pour le mélange M₀ a été sérieusement dégradée, alors que celles issues des mélanges M₄ et M₅ (> 10) n'ont subi aucune dégradation décelable suite à l'application de cette même solution S₉.

3-4. Résultats des essais Marshall

3-4-1. Résultats de détermination de la teneur optimale en liant

Les résultats des différents essais, en stabilité Marshall, de densité apparente et fluage, en fonction des teneurs en liant, dans la plage de 5,5% à 6,1% bornée par $P_{max}=5,8\%$ déterminée plus haut, sont portés sur les **Figures 3**. L'analyse des résultats de ces essais a permis de déterminer le taux optimal de dosage en liant qui s'est affiché égal à 5,8%.

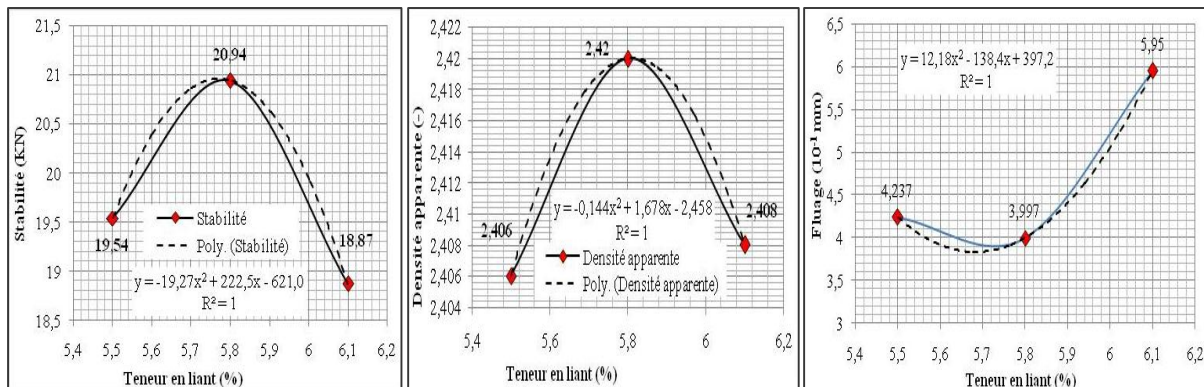


Figure 3 : Evolution de la stabilité Marshall, de la densité apparente et du fluage du béton bitumineux en fonction de la teneur en liant M_0 .

Les données déployées sur ces figures révèlent clairement qu'à la valeur de la teneur optimale en liant de 5,8 %, correspondent celles de la stabilité maximale de 20,94kN, de la densité maximale de 2,42 et de fluage minimal de 3,997x1/10mm. Cette dernière est située dans l'intervalle [2x1/10mm, 4x1/10mm] recommandé par l'Asphalt Institute pour les revêtements de chaussées à trafics lourds [13-14]. Après cette appréciation du comportement développé par ces différents paramètres caractéristiques pour le bitume témoin pur, la série de dosages entrepris avec du béton additionné de la poudre de sachets plastiques fondus (béton bitumineux) a fourni les résultats présentés et commentés dans les différents paragraphes suivants.

3-4-2. Résultats des essais réalisés sur du béton bitumineux dopé

Dans cette série d'expérimentations, on a adopté les teneurs en poudre de sachets plastiques fondus de 4%, 8%, 12% et 20% en masse correspondant, outre celui de M_0 , aux mélanges bitume-poudre de sachets respectifs M_2 , M_4 , M_6 et M_9 . Enfin, des essais ont également été réalisés sur le liant fait uniquement de poudre de sachets fondus, soit à teneur égale à 100%.

3-4-3. Effets de la teneur en poudre de sachets fondus sur la densité apparente

Les résultats enregistrés concernant le comportement de la densité apparente, suite à l'utilisation de la poudre de sachets plastiques fondus en mélange avec le bitume et les granulats pour constituer le béton bitumineux, sont présentés sur la **Figure 4**. On peut en effet y observer que la densité apparente du béton bitumineux décroît lorsque la teneur en poudre de sachets plastiques fondus dans le bitume augmente, même si la plage de variation de la densité paraît relativement faible $0,99\% = 100 \times (2,42 - 2,397) / 2,397 \approx 1\%$ contre une étendue de variation théorique de $0,58\% = 100 \times (2,42 - 2,406) / 2,406 \approx 0,6\%$ pour une plage de teneurs d'incorporation de poudre de sachets plastiques de 0 à 20%. Le modèle mathématique qui fixe, de manière adéquate, les données ainsi recueillies sur le comportement de la densité apparente (Y) en fonction

de la teneur en poudre de sachets plastiques fondus (X), peut être représenté par l'équation de la courbe de tendance :

$$Y = 100,9 X^4 - 39,84 X^3 + 5,213 X^2 - 0,376 X + 2,42 \quad (5)$$

avec une valeur du coefficient de régression quasi égale à : $R^2 = 1$.

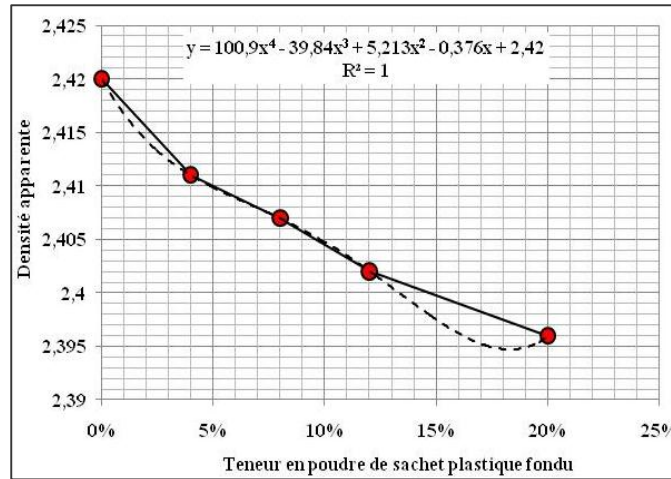


Figure 4 : Evolution de la densité apparente du béton bitumineux en fonction de la teneur en sachets plastiques

3-4-3. Effets de la teneur en poudre de sachets fondus sur la stabilité du béton bitumineux

Les résultats relatifs à l'évolution de la stabilité, suite à l'utilisation de la poudre de sachets plastiques fondus en mélange avec le bitume et les granulats pour constituer le béton, sont présentés à la **Figure 5**. On peut affirmer que la stabilité du béton bitumineux s'accroît avec l'augmentation de la teneur en poudre de sachets plastiques fondus. Il est à remarquer que le taux de variation de la stabilité Marshall est d'environ 5,03% contre un taux de variation théorique de 9,89% pour une plage de teneurs d'incorporation de sachet plastique de 0 à 20%. Le modèle mathématique qui fixe, de manière adéquate les données ainsi recueillies sur le comportement de la stabilité (Y) en fonction de la teneur en poudre de sachets plastiques fondus (X), peut être représenté par l'équation de la courbe de tendance :

$$Y = 390,6 X^3 - 120,9 X^2 + 14,14 X + 20,93 \quad (6)$$

avec une valeur du coefficient de régression quasi égale à : $R^2 = 0,997$.

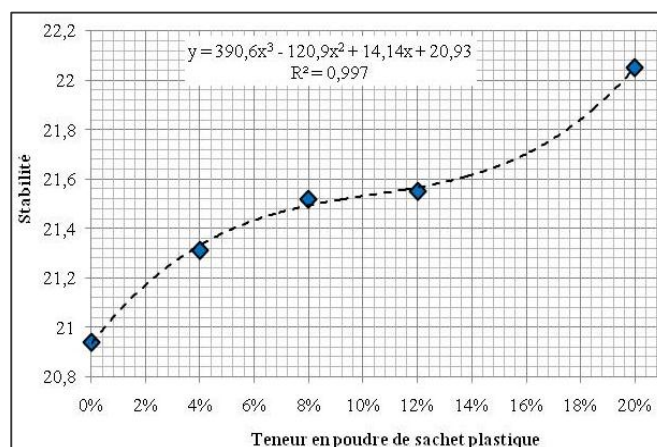


Figure 5 : Evolution de la stabilité Marshall du béton bitumineux en fonction de la teneur en sachets plastiques

3-4-5. Effets de la teneur en poudre de sachets fondus sur le fluage du béton bitumineux

Les résultats enregistrés suite aux essais de fluage sur les éprouvettes de béton bitumineux confectionnés en utilisant de la poudre issue du fondu de déchets de sachets plastiques en mélange avec le bitume et les granulats, sont présentés sous la forme de la **Figure 6**. Les données ainsi représentées montrent clairement que le fluage du béton bitumineux diminue, de manière significative, à mesure qu'augmente la teneur en poudre de sachets plastiques fondus.

En effet, le taux de variation du fluage, calculé par la différence entre les valeurs extrêmes fois cent rapportée à c est d'environ 32,77% contre un taux de variation théorique de 32,82% pour une plage de teneurs en sachets plastiques incorporés de 0 à 20%, soit quasiment le même ordre de grandeur. Le modèle mathématique qui fixe, de manière adéquate, les données ainsi recueillies sur le comportement du fluage (Y) en fonction de la teneur en poudre de sachets plastiques fondus (X), peut être représenté par l'équation de la courbe de tendance :

$$Y = -242,7 X^3 + 91,94 X^2 - 15,24 X + 4 \quad (7)$$

avec une valeur du coefficient de régression égale à : $R^2 = 0,999$.

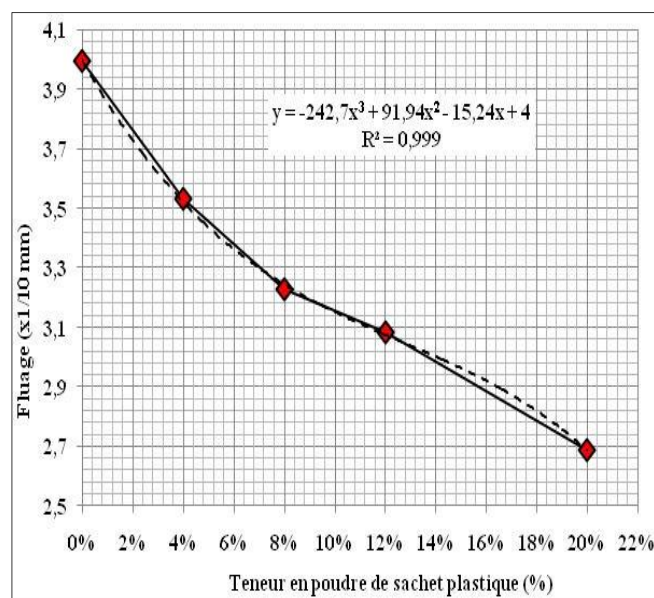


Figure 6: Evolution du fluage du béton bitumineux en fonction de la teneur en sachets plastiques

Le **Tableau 7** donne les résultats obtenus pour des essais Marshall sur la poudre de sachet plastique utilisée seule (100%) comme le liant à la place du bitume.

Les résultats consignés dans ce tableau ont montré que les paramètres caractéristiques enregistrés sur des éprouvettes réalisés en utilisant le liant à 100% de sachets plastiques, tels que la masse volumique apparente, la compacité, le fluage, sont relativement faibles, respectivement 2,354 g/cm³, 95,21% et 1,93 (x1/10 mm), comparés à ceux obtenus avec le bitume de référence 50/70 (2,42 g/cm³, 97,87 % et 3,997x1/10 mm). Par contre, la valeur de leur stabilité Marshall est plus élevée (37,74 kN) que celle du béton issu du bitume 50/70 (20,94 kN).

Tableau 7 : Exemple de fiche de résultats d'essais Marshall pour bitume 0% et sachet 100%

FICHE DE RESULTATS D'ESSAI MARSHALL					
Taux Liant/Agrégats	5,8	Bitume = 0% et sachet = 100%		Taux Liant/Mélange	5,5
Numéro d'éprouvettes	2	4	6	Moy.	
Masse volumique réelle des agrégats (g/cm ³)				2,69	
Masse volumique apparente des éprouvettes (g/cm³)	2,368	2,358	2,335	2,354	
Masse volumique réelle du mélange (g/cm ³)				2,472	
Volume de bitume (%)	12,56	12,51	12,39	12,49	
Volume des agrégats (%)	83,22	82,89	82,07	82,73	
Volume de vides résiduels (%)	4,22	4,60	5,54	4,79	
Compacité (%)	95,78	95,40	94,46	95,21	
Masse volumique des agrégats (g/cm ³)	2,238	2,229	2,207	2,225	
Vides des agrégats (%)	16,80	17,13	17,95	17,29	
Vides comblés (%)	74,89	73,12	69,11	72,37	
Valeur de Fluage (1/10 mm)	1,7	1,1	2,99	1,930	
Stabilité (kN)	36,41	38,63	38,18	37,74	

Tous les résultats qui viennent d'être exposés et commentés ont montré que la forme poudreuse adoptée permet d'utiliser la poudre de sachets plastiques fondus, même à elle seule, comme un liant à la place du bitume. En comparaison avec le bitume, la stabilité du béton obtenu suite au mélange de la poudre de sachets plastiques avec les granulats, est plus forte, et celle-ci à plus de 80%=[100x(37,74-20,94)/20,94=80,23], alors que la masse volumique, la compacité et le fluage ont subi des réductions respectives 2,73%, 2,72% et 51,71x1/10 mm.

4. Conclusion

Les investigations menées dans ce travail visant à identifier une solution pertinente de recyclage des sachets plastiques dans les procédés de construction ont consisté à déterminer les caractéristiques essentielles de liants bitumineux élaborés en substituant partiellement, au bitume 50/70, la poudre issue des sachets plastiques fondus finement broyés. Les essais effectués, sur dix variantes de mélanges correspondant respectivement aux teneurs de 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 15%, 18% et 20% en masse de poudre de sachets plastiques, ont eu pour effet de déclasser progressivement le liant bitumineux vers les titres de bitumes les plus durs 40/60, 35/50 et même 20/30 pour le M₈. Les résultats des mesures d'adhésivité de ces différents liants ont amené à conclure que le liant contenant la poudre de sachets plastiques adhère mieux aux granulats dans le béton bitumineux. La stabilité Marshall du béton bitumineux a affiché une évolution croissante d'environ 5% avec l'augmentation de la teneur en poudre de sachet plastique. Une faible tendance à la décroissance a été enregistrée concernant la densité apparente du béton bitumineux : 0,1%. Une valeur de décroissance beaucoup plus significative a été obtenue pour le fluage prédit à partir des mesures de déformations : environ 33%. Enfin, ces travaux ont permis de constater que la poudre de sachets plastiques, bien que n'ayant pas les caractéristiques du bitume classique, pourrait jouer, à elle seule, le rôle de liant dans la confection du béton bitumineux. Des études

complémentaires méritent d'être effectuées pour améliorer certains de ses paramètres. Toutefois, les résultats des essais Marshall réalisés en utilisant la poudre de sachets seule ont montré que, la stabilité du béton bitumineux obtenu est plus forte, de plus de 80%, que celle du bitume 50/70.

Références

- [1] - MEHU, (Ministère de l'Environnement, de l'Habitat et de l'Urbanisme du Bénin) : *Etude de faisabilité pour la valorisation des déchets plastiques au Bénin*. Cotonou (2002).
- [2] - V. LAWSON, N. LIADY, G. BOGLO, *Valorisation des déchets solides ménagers (DSM) au Benin: atouts et limites*. Rapport d'étude pour DCAM-BETHESDA. Cotonou, (2008), 63p.
- [3] - A.V. GBEDO, *Problématique de la valorisation des déchets plastiques à Cotonou*. Thèse de Doctorat Université d'Abomey-Calavi, Faculté des Lettres Arts et Sciences Humaines. (2009), 237p.
- [4] - RNCR, Réseau National des Centres de Ressources. *Etude sur la gestion des déchets plastiques dans l'espace UEMOA: cas du Bénin*. Rapport final. Cotonou, Nov. (2011) 59p.
- [5] - Y. GHERNOUTI and B. RABEHIDE. *Récupération et Valorisation des déchets de sacs en plastique dans le domaine de construction*. In "Proceedings of 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries". Edition ENSET Oran (Algeria), 12-14 October, (2009) 93-100.
- [6] - O. YAZOGHLI-MARZOUK, R.M. DHEILLY and M. QUENEUDEC, *Valorisation des déchets d'emballages plastiques dans les matériaux de construction*. Récent Progrès en Génie des Procédés, n° 92-2005. Editions SFGP, Paris (France). ISBN 2-910239-66-7.
- [7] - S. KAPIL and K.K. PUNJABI, *Improving the Performance of Bituminous Concrete Mix by Waste Plastic*. Int. Journal of Engineering Research and Applications, 3(5) (2013) 863-868. www.ijera.com ISSN: 2248-9622.
- [8] - R.N.S.K.VASUDEVAN, R.VELKENEDY, A. RAMALINGA CHANDRA SEKARI and B. SUNDARAKANNAN, *Utilization of Waste Polymers for Flexible Pavement and Easy Disposal of Waste Polymers*. In "Proceedings of International Conference on Sustainable Solid Waste Management", 5-7 September" Chennai, India. (2007) 105-111.
- [9] - Y. HUANG, N.R. BIRD and O. HEIDRICH, *A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements*. Resources, Conservation and Recycling. (Elsevier), 52(2007), 58-73.
- [10] - S.S. VERMA, *Roads from Plastic Waste*. The Indian Concrete Journal, (2008) 43-44.
- [11] - D.S.V. PRASAD, G.V.R PRASADA-RAJU and A. KUMAR, *Utilization of Industrial Waste inn Flexible Pavement Construction*, EJGE Journal, 13(D) (2009) 1-12.
- [12] - M. DURIEZ et J. ARRAMBIDE, *Liants routiers et enrobés*; Editions Dunod et Editions du Moniteur des Travaux Publics, Paris, (1959). 553 p.
- [13] - G. JEUFFROY, *Conception et construction des chaussées*. Tome 2; Editions Eyrolles, Paris (1978). 431p.
- [14] - C. BINDU and K.S. BEENA, *Waste plastics as a stabilizing additive in Stone Mastic Asphalt*. Int. Journal of Engineering and Technol., 2(6) (2010) 379-387.