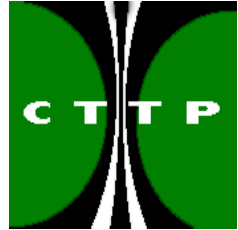


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique
Département génie civil



Mémoire de fin d'étude
En vue d'obtention du diplôme
d'INGENIEUR D'ETAT
EN GENIE CIVIL
THEME

*Effets de l'incorporation de la
poudrette de caoutchouc sur
les performances Marshall
d'un Enrobé Recyclé*

Réalisé par :

- BELAISSAOUI Mouatez Billah
- HALOUANE Mohamed Oussama

Proposé par et dirigé par :

Dr M.MORSLI
Co-encadré par: S. SADOON

Promotion Juin 2013

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu Dieu Tout Puissant et Miséricordieux de nous avoir donné la force, la volonté et la patience pour accomplir ce modeste travail.

Nous remercions également notre directeur de mémoire Dr MORSLI Meriem, Maître de Conférences à l'ENP, pour le choix du thème, ses précieux conseils, son aide et son soutien pendant toute la période de préparation de ce mémoire.

Nous tenons aussi à remercier Monsieur MAGRAMENE, chef de service produits Noirs à l'Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics (CTTP), pour ses conseils et orientations.

Nous remercions également M^{elle} SADOUN Souhila, Doctorante à l'ENP, pour son soutien et son apport très enrichissant.

Nos remerciements s'adressent au personnel du laboratoire de CTTP qui a contribué à la réalisation de la partie expérimentale et qui nous a facilité l'intégration parmi eux ; nous citerons en particulier :

M. Mustapha Azouz, M. Hichem CHENNOUF, M. Hichem JIDA, M^{me} Ryma, M. Ramdane

Nous n'oublierons pas M. HATTAK. Samir chef de chantier de l'Entreprise Publique de Travaux Publics à ROUIBA, M^{me} TOUAHRIA, Responsable d'environnement de l'entreprise Michelin, M. SANHAJI chef de service des produits noirs du Laboratoire Centrale des Travaux Publics, la Société Nationale d'Elastomères «SAEL», ainsi que tout le personnel qui nous a apporté leur aide.

Que Mesdames et Messieurs les membres du jury trouvent ici, l'expression de nos vifs remerciements d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous n'oublieront pas de remercier nos familles respectives ainsi que tous les amis pour leur soutien moral durant toute cette période.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents,

Mes frères,

Mes sœurs,

Mes nièces et mes neveux,

Toute la famille BELAISSAOUI et TOUATI,

Tous mes amis spécialement Salim.

Mouatez Billah

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents,

Mon frère,

Mes sœurs,

Ma nièce et mon neveu,

Toute la famille HALOUANE, MAHDJER,

Tous mes amis.

Mohamed Oussama

المخلص: في هذا المشروع ، قمنا بتحليل تطور الميزات Marshall للأسفلت شبه الخشن (BBSG0/14) الذي يحتوي على 50٪ من مجاميع الأسفلت و ذلك اعتمادا على معدل وطبيعة مسحوق المطاط الذي يتم دمجها في الهيكل الحبيبي. الهدف من هذا العمل هو تحديد مستوى ونوع مسحوق المطاط الذي من شأنه أن يعطي خصائص للأسفلت المعاد تدويره (بما في ذلك المرونة) مماثلة للأسفلت الجديد، دون الحاجة إلى تغيير درجة الموثق الجديد.

تم اختبارا نوعين من مسحوق المطاط: الأول ناتج عن طحن باطن الأحذية و الآخر ناتج عن طحن الإطارات المستعملة. مستوى الإضافة هو : 1٪ و 2٪ و 3٪ من الوزن الكلي لمجموع الحصى.

أظهرت النتائج أن مسحوق المطاط الناتج عن طحن باطن الأحذية يميل إلى زيادة استقرار Marshall والحد من تدفق Marshall، و هذا عكس النتائج المرجوة. بينما مسحوق المطاط الناتج عن طحن الإطارات المستعملة، فإنه يقلل استقرار Marshall ويزيد من تدفق Marshall: المستوى الأنسب في دراستنا في ما يخص إضافة مسحوق المطاط الخاص بالعجلات المستعملة هو ما بين 2 و 3٪، وخصائص مارشال متوافقة مع تلك المنصوص عليها في معايير التصنيف BBSG0/14

كلمات البحث: مسحوق المطاط، الهيكل الحبيبي، المرونة، الموثق، تفريز، معايير التصنيف.

Résumé : Dans ce mémoire, nous avons analysé l'évolution des caractéristiques Marshall d'un enrobés bitumineux semi-grenu (BBSG0/14) contenant 50% d'Agrégats d'Enrobé, en fonction du taux et de la nature de la poudrette de caoutchouc incorporée au squelette granulaire. L'objectif de ce travail est d'identifier le taux et le type de poudrette qui confèreraient à l'enrobé recyclé des caractéristiques (notamment la souplesse) comparables à celles de l'enrobé neuf sans avoir à changer le grade du liant d'apport.

Deux poudrettes sont ont été testées : l'une est issue du broyage des semelles des chaussures et l'autre du broyage des pneus usagés. Le taux d'incorporation est de 1%, 2% et 3% du poids total des granulats.

Les résultats ont montré que la poudrette des semelles de chaussures a tendance à augmenter la stabilité Marshall et réduire le fluage Marshall, ce qui est à l'inverse du but recherché. Quant à la poudrette de Pneus, elle diminue la stabilité et augment le fluage : le taux favorable à notre recherche se situe entre 2 et 3% ; dans cet intervalle, les caractéristiques Marshall sont conformes à celles exigées d'un BBSG0/14.

Mots clés : souplesse, poudrette de caoutchouc, fraisage, agrégats d'enrobés, enrobé recyclé.

Abstract: In this memory, we analyzed the evolution of Marshall features of a semi-coarse asphalt (BBSG0/14) containing 50% of asphalt aggregates, depending on the rate and nature of the crumb rubber incorporated into the granular skeleton. The objective of this work is to identify the level and type of crumb that would give the recycled asphalt characteristics (including flexibility) comparable to the new asphalt without having to change the grade of binder intake.

Two kind of crumb were tested: one formed by grinding the soles of shoes and the other by grinding used tires. The incorporation rate is 1%, 2% and 3% of the total weight of the aggregate. The results showed that the crumb of shoes tends to increase the Marshall stability and reduce the flow, which is the inverse of the purpose of this work. When the crumb tires, it decreases stability and increases the flow: supports our research rate is between 2 and 3% in this period, Marshall Characteristics are consistent with those required of a BBSG0/14.

Keywords: asphalt aggregates, crumb rubber, recycled asphalt, flexibility, milling.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
CHAPITRE.I. Les enrobes bitumineux	
I.1. Introduction	3
I.2. Les principaux constituants de l'enrobé bitumineux	3
I.2.1. Le bitume	3
I.2.1.1. Définition	3
I.2.1.2. Origine du bitume	3
I.2.1.3. Structures chimiques d'un bitume	4
I.2.1.4. Classification des bitumes	6
I.2.1.5. Identification des bitumes	7
I.2.2. Les granulats	9
I.2.2.1. Définition	9
I.2.2.2. Caractéristiques des granulats	9
I.2.2.2.1. Caractéristiques intrinsèques	9
I.2.2.2.2. Caractéristiques de fabrication	10
I.3. Etude de formulation en laboratoire	12
I.3.1. Composition granulométrique	13
I.3.1.1. Fuseau granulométrique	13
I.3.1.2. Quelques exemples de fuseaux de spécification pour enrobés	14
I.3.1.3. Teneur en Fillers	15
I.3.2. Teneur en liant	16
I.4. Essais sur enrobes bitumineux	17
I.4.1. Essai Marshall	17
I.4.2. Tenue à l'eau	18
I.4.2.1. Adaptation de l'essai Marshall à la tenue à l'eau (sensibilité à l'eau)	18
I.4.2.2. Essai Duriez (Essai de compression simple type LCPC)	18
I.4.3. Essai d'orniérage LPC	19
I.4.4. Essai de Fatigue	19
I.5. Les facteurs influençant le béton bitumineux	20
I.5.1. Influence des granulats	20
I.5.2. Influence du bitume	21

I.5.3.	Influence de la compacité	22
I.6.	Fabrication des enrobés bitumineux à chaud	22
I.7.	Conclusion	23

CHAPITRE.II. *Les enrobés bitumineux recyclés*

II.1.	Introduction	24
II.2.	Préparation au recyclage des déchets bitumineux résultants de l'entretien du réseau routier	24
II.2.1.	Traitement des déchets bitumineux contenant du goudron de houille	24
II.2.2.	Transformation des déchets bitumineux en matériau recyclable	25
II.3.	Les Agrégats d'Enrobés	26
II.3.1.	Définition / Stockage	26
II.3.2.	Caractéristiques des agrégats d'enrobés	26
II.3.3.	Caractéristiques du liant des agrégats	27
II.4.	Les pratiques existantes pour la réutilisation des agrégats d'enrobés	28
II.4.1.	Selon l'endroit où est effectué le mélange	28
II.4.1.1.	En place	28
II.4.1.2.	En centrale	28
II.4.2.	Selon la température du procédé	28
II.4.2.1.	A froid	28
II.4.2.2.	A chaud	29
II.4.3.	Selon les caractéristiques du matériau à recycler	29
II.4.4.	Selon le type de liant	29
II.4.4.1.	Bitume	29
II.4.4.2.	Émulsion de bitume	29
II.4.4.3.	Mousse de bitume	29
II.4.4.4.	Ciment	29
II.5.	Différents types de centrales d'enrobage	31
II.5.1.	Centrale discontinue sans tambour de chauffage séparé	31
II.5.2.	Centrale discontinue avec un tambour de chauffage séparé	32
II.6.	Composition d'un enrobé contenant des agrégats d'enrobé	33
II.6.1.	Calcul des quantités et détermination des caractéristiques du liant d'apport	34
II.6.1.1.	Caractéristiques du liant d'apport	34
II.6.1.2.	Indétermination du degré de remobilisation	36
II.7.	Influence du taux de recyclage sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé final	37

II.8.	Conclusion	39
-------	------------------	----

CHAPITRE.III. *Poudrette de caoutchouc*

III.1.	Introduction	40
III.2.	Fabrication de la poudrette de caoutchouc	40
III.3.	L'utilisation de la poudrette de caoutchouc dans les enrobés bitumineux	40
III.3.1.	Les avantages	41
III.3.2.	Les procédés d'utilisation	41
III.3.3.	Incorporation de la poudrette de caoutchouc par voie sèche	42
III.4.	Conclusion	46

CHAPITRE.IV. *Etude expérimentale*

IV.1.	Problématique et méthodologie	47
IV.2.	Identification des matériaux	49
IV.2.1.	Les Granulats d'apports	49
IV.2.1.1.	Origine des granulats	49
IV.2.1.2.	Les caractéristiques des granulats	50
IV.2.1.2.1.	Caractéristiques intrinsèques des granulats	50
IV.2.1.2.2.	Caractéristiques de fabrications des granulats	54
IV.2.1.3.	Récapitulatif des caractéristiques des granulats	57
IV.2.1.4.	Conclusion	58
IV.2.2.	Le Bitume	58
IV.2.3.	Les Agrégats d'Enrobés ou Fraisâts	61
IV.2.3.1.	Etude granulométrique des fraisâts avant extraction du liant	61
IV.2.3.2.	Etude granulométrique du fraisats après extraction du liant	62
IV.2.3.3.	Détermination de la teneur en liant	64
IV.2.3.4.	Essais de caractérisation du liant (Pénétrabilité, TBA)	65
IV.2.4.	L'additif (poudrette de caoutchouc)	65
IV.2.5.	Conclusion	67
IV.3.	Formulation des enrobés bitumineux	67
IV.3.1.	Formulation d'enrobé classique	68
IV.3.1.1.	Choix du mélange granulaire	68
IV.3.1.2.	Détermination des teneurs en bitume	70
IV.3.1.3.	Détermination du mélange optimal	71

IV.3.2.	Formulation de l'enrobé recyclé modifié à la poudrette de caoutchouc	73
IV.3.2.1.	Correction de la granulométrie des agrégats d'enrobé par ajout de granulats d'apport.....	73
IV.3.2.2.	Correction des caractéristiques du liant d'agrégats d'enrobé par l'ajustement des caractéristiques du liant d'apport.....	74
IV.3.2.2.1.	Quantité de liant d'apport.....	74
IV.3.2.2.2.	Caractéristiques du liant d'apport	74
IV.3.2.3.	Différentes formulations d'enrobés recyclés avec l'introduction de la poudrette de caoutchouc.....	75
IV.3.2.3.1.	Formulation de référence (0 % de poudrette).....	75
IV.3.2.4.	Poudrette de caoutchouc issue de broyage des semelles de chaussures.....	76
IV.3.2.4.1.	Formulation d'un enrobé recyclé avec 1 % de poudrette de caoutchouc issue de broyage des semelles de chaussures.....	76
IV.3.2.4.2.	Formulation d'un enrobé recyclé à 2 % de poudrette de caoutchouc de semelles de chaussures.....	77
IV.3.2.4.3.	Formulation d'un enrobé recyclé à 3 % de poudrette de caoutchouc des semelles de chaussures.....	78
IV.3.2.4.4.	Poudrette de caoutchouc issue de broyage des pneus	78
IV.4.	Interprétation des résultats	81
IV.4.1.	Influence du taux de poudrette sur la stabilité Marshall	81
IV.4.2.	Influence du taux de poudrette sur le fluage Marshall.....	83
IV.4.3.	Influence de taux de poudrette sur la compacité Marshall.....	85
IV.4.4.	Influence de taux de poudrette de caoutchouc sur le Quotient Marshall	86
IV.4.5.	Influence de taux de poudrette sur la tenue à l'eau	87
IV.5.	Conclusions.....	89
	Conclusions et perspectives	91
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	92
	ANNEXE.I.....	96
	ANNEXE.II.....	109
	ANNEXE.III.....	113
	ANNEXE.IV.....	116

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.I.1.	Le nombre des boulets correspondantes aux classes granulaires pour l'LA	9
Tableau.I.2.	La charge abrasive correspondants aux classes granulaires pour l'MDE.....	10
Tableau.I.3.	Les caractéristiques exigées pour les granulats routiers	11
Tableau.I.4.	Quelques exemples de courbes modèles.....	13
Tableau.I.5.	Fuseaux de référence pour la granularité des bétons bitumineux semi grenus.....	14
Tableau.I.6.	Fuseaux de spécification de granularité pour enrobés de surface de chaussées souples à faible trafic	14
Tableau.I.7.	Fuseaux de spécification de la granularité pour Bétons bitumineux clouté.....	15
Tableau.II.1.	Ordres de grandeurs des caractéristiques des liants anciens	27
Tableau.III.1.	Tenue à l'eau (granulats + poudre de pneus).....	43
Tableau.III.2.	Résultats Marshall et tenue à l'eau : Granulats basaltiques + poudre de semelles de chaussées.....	43
Tableau.III.3.	Résultats Marshall et tenue à l'eau : Granulats calcaires + poudre de semelles de chaussées.....	43
Tableau.IV.1.	Origine des granulats utilisés.....	49
Tableau.IV.2.	Essai de masse volumique réelle	51
Tableau.IV.3.	Essai micro-Deval.....	52
Tableau.IV.4.	Critères de qualité pour l'attrition	53
Tableau.IV.5.	Essai LOS ANGELES	53
Tableau.IV.6.	Critères de qualité pour la dureté.....	54
Tableau.IV.7.	Coefficient d'aplatissement des granulats	56
Tableau.IV.8.	Résultats de l'essai d'équivalent de sable.....	56
Tableau.IV.9.	Valeur au bleu de méthylène	57
Tableau.IV.10.	Caractéristiques intrinsèques des granulats	57
Tableau.IV.11.	Caractéristiques de fabrication des granulats	58
Tableau.IV.12.	Résultats d'identification du bitume.....	61
Tableau.IV.13.	Spécifications et résultats des fraisats avant extraction du liant.....	62
Tableau.IV.14.	Spécifications et résultats des fraisats après extraction du liant.....	63
Tableau.IV.15.	Caractéristiques de liant après désenrobage	64
Tableau.IV.16.	Caractéristique du liant vieilli.....	65
Tableau.IV.17.	Fuseau de référence d'un béton bitumineux semi grenu 0/14	68
Tableau.IV.18.	Composition granulaire du mélange.....	69
Tableau.IV.19.	Calcul de la surface spécifique	70
Tableau.IV.20.	Les teneurs en liant	71
Tableau.IV.21.	Résultats des essais MARSHALL	71
Tableau.IV.22.	Résultats des essais de la tenue à l'eau	72
Tableau.IV.23.	Tableau récapitulatif.....	72

Tableau.IV.24.	Composition du mélange granulométrique avec 50 % de fraisats.....	73
Tableau.IV.25.	Essais Marshall pour l'AE avec 0 % d'ajout.....	75
Tableau.IV.26.	Essais de la tenue à l'eau pour l'AE avec 0 % d'ajout.....	76
Tableau.IV.27.	Tableau récapitulatif.....	76
Tableau.IV.28.	Essais Marshall pour l'AE avec 1 % de PSC.....	76
Tableau.IV.29.	Essais de la tenue à l'eau pour l'AE avec 1 % de PSC.....	77
Tableau.IV.30.	Essais Marshall pour l'AE avec 2 % de PSC.....	77
Tableau.IV.31.	Essais de la tenue à l'eau pour l'AE avec 2 % de PSC.....	77
Tableau.IV.32.	Essais Marshall pour l'AE avec 3 % de PSC.....	78
Tableau.IV.33.	Essais de la tenue à l'eau pour l'AE avec 3 % de PSC.....	78
Tableau.IV.34.	Essais Marshall pour l'AE avec 1 % de PP.....	79
Tableau.IV.35.	Essais de la tenue à l'eau pour l'AE avec 1 % de PP.....	79
Tableau.IV.36.	Résultats des essais Marshall pour l'AE avec 2 % de PP.....	79
Tableau.IV.37.	Essais de la tenue à l'eau pour l'AE avec 2 % de PP.....	80
Tableau.IV.38.	Essais Marshall pour l'AE avec 3% de PP.....	80
Tableau.IV.39.	Essais de la tenue à l'eau pour l'AE avec 3 % de PP.....	80
Tableau.IV.40.	Résultats de la stabilité MARSHALL en fonction de % de la poudrette.....	81
Tableau.IV.41.	Résultats de fluage MARSHALL en fonction de % de poudrette.....	83
Tableau.IV.42.	Influence de % de poudrette sur la compacité.....	85
Tableau.IV.43.	Influence de taux de poudrette sur le Quotient MARSHALL.....	86
Tableau.IV.44.	Influence de la poudrette de caoutchouc sur la tenue à l'eau.....	87

LISTE DES FIGURES

Figure.I.1.	Définition des fractions d'un bitume	5
Figure.I.2.	Composition du bitume	6
Figure.I.3.	Principe de l'essai TBA	7
Figure.I.4.	Principe de l'essai MARSHALL	17
Figure.I.5.	Orniéreur LPC	19
Figure.II.1.	Origine des agrégats d'enrobé	25
Figure.II.2.	Réutilisation des agrégats d'enrobés.....	30
Figure.II.3.	Addition discontinue des agrégats d'enrobés froids et les granulats	31
d'apports	31
Figure.II.4.	Addition discontinue, réchauffage des agrégats d'enrobés dans le tambour sécheur des granulats d'apports	32
Figure.II.5.	Centrale discontinue avec tambour de chauffage séparé	33
Figure.II.6.	Composition d'un enrobé recyclé et répartition de la participation des agrégats d'enrobé au liant et aux granulats de l'enrobé recyclé	34
Figure.III.1.	Procédé sec.....	41
Figure.III.2.	Procédé humide.....	42
Figure.III.3.	Influence de taux de poudrette sur la stabilité MARSHALL	44
Figure.III.4.	Influence de taux de poudrette sur le fluage MARSHALL	45
Figure.III.5.	Influence de taux de poudrette sur la compacité.....	45
Figure.III.6.	Influence de taux de poudrette sur la tenue à l'eau.....	46
Figure.IV.1.	schéma présente la démarche expérimentale	48
Figure.IV.2.	Les différentes fractions de granulats	50
Figure.IV.3.	Essai de la masse volumique.....	51
Figure.IV.4.	Jarre micro Deval.....	52
Figure.IV.5.	Machine micro Deval.....	52
Figure.IV.6.	Machine LOS ANGELES.....	53
Figure.IV.7.	Série de tamis (0,08-16mm).....	54
Figure.IV.8.	Courbes granulométriques des fractions granulaires	55
Figure.IV.9.	Série des grilles.....	55
Figure.IV.10.	L'essai d'équivalent de sable	56
Figure.IV.11.	Appareil de l'essai de bleu de méthylène	57
Figure.IV.12.	Pénétrromètre.....	59
Figure.IV.13.	Les tares de bitumes	59
Figure.IV.14.	Appareil de l'essai Bille-Anneau	60
Figure.IV.15.	Les anneaux de bitume.....	60
Figure.IV.16.	Essai de ductilité.....	60
Figure.IV.17.	Echantillon du fraisât	61
Figure.IV.18.	Courbe granulométrique des fraisâts avant extraction du bitume	62

Figure.IV.19.	Courbe granulométrique des fraisats après extraction de bitume	63
Figure.IV.20.	Fraisât après désenrobage.....	63
Figure.IV.21.	Appareil KUMAGAWA	64
Figure.IV.22.	Mélange (bitume + diluant).....	65
Figure.IV.23.	Poudrette des semelles de chaussures	66
Figure.IV.24.	Poudrette des pneus.....	66
Figure.IV.25.	Analyse granulométrique de poudrette des pneus et de poudrette des semelles de chaussures.....	67
Figure.IV.26.	Courbe granulométrique du mélange 0/14	69
Figure.IV.27.	Courbe granulométrique du mélange granulaire avec 50 % de fraisâts	74
Figure.IV.28.	Influence du taux de la poudrette sur la Stabilité MARSHALL	82
Figure.IV.29.	Influence de taux de poudrette sur le Fluage MARSHALL.....	84
Figure.IV.30.	Influence de taux de poudrette sur la compacité	85
Figure.IV.31.	Influence de taux de poudrette sur le Quotient MARSHALL	87
Figure.IV.32.	Influence de la poudrette de caoutchouc sur la tenue à l'eau.....	88

ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

BBSG : Bétons Bitumineux Semi-Grenus

SONATRO: Société Nationale des Travaux Routiers

AE: Agrégats d'enrobé

SARA : Saturés, Aromatiques, Résines, Asphaltènes

Ip : Indice de Pénétrabilité

L.C.P.C : Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées

NA : Norme Algérienne

NF : Norme Française

EN : Européen Norme

TBA : Température de ramollissement Bille et Anneau

LA : Los Angeles

M.D.E : Micro Deval Humide

A : Coefficient d'Aplatissement

P : Propreté Superficielle

ES : Equivalent de Sable

α : Facteur dépendant du type de granulats

K : Module de richesse

Σ : Surface Spécifique des granulats

G : pourcentage en poids des éléments de dimensions supérieur à 6,3 mm

S : pourcentage en poids des éléments de dimensions comprises entre 6,3 et 0,315 mm

s : pourcentage en poids des éléments de dimensions comprises entre 0,315 et 0,08 mm

f : pourcentage en poids des éléments de dimensions inférieurs à 0,08 mm

TL : Teneur en liant

MVRg : Masse Volumique Apparente

MVR : Masse Volumique Réelle

SM : Stabilité Marshall

FM : Fluage Marshall

CTTP: Organisme de Control Technique des Travaux Publics

RC_{imm} : Résistance à la traction indirecte du lot humide

RC_{sec} : Résistance à la traction indirecte du lot sec

R : Résistance à la compression à sec

r : Résistance à la compression en immersion

Pen_{LER} : Pénétrabilité du liant d'enrobé recyclé

Pen_{LAE} : Pénétrabilité du liant d'agrégat d'enrobé

Pen_{LA} : Pénétrabilité du liant d'apport

TBA_{LER} : Température de ramollissement du liant d'enrobé recyclé

TBA_{LAE} : Température de ramollissement du liant d'agrégat d'enrobé

TBA_{LA} : Température de ramollissement du liant d'apport

Visc_{LER} : Viscosité du liant dans le nouveau mélange

Visc_{LAE} : Viscosité du liant provenant des agrégats d'enrobés bitumineux

Visc_{LA} : Viscosité du liant d'apport

LA : Liant d'apport

LAE : Liant d'Agrégats d'Enrobés

LER: Liant d'enrobé recyclé

GER : Granulat d'enrobé recyclé

P.C.G : Presse à Cisaillement Giratoire

TSE: Centrale de type tambour Sécheur Enrobeur

NCHRP : Cooperative Highway Research Program

SHRP : Strategic Highway Research Program

SAEL : Société d'Applications d'Elastomères

EPTP : Entreprise Publique de Travaux Publics

V.B : Valeur au Bleu de méthylène

INH : Institut National des Hydrocarbures

PSC : poudrette de caoutchouc issue de broyage des semelles de chaussures

PP : Poudrette issue de broyage des pneus des véhicules

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans un monde où on voit la nécessité de développer de nouvelles technologies et méthodes de gestion pour satisfaire les demandes environnementales sans toutefois altérer la performance des ouvrages, le développement durable est un thème d'actualité dans le secteur des chaussées bitumineuses, car la construction routière est une grande consommatrice en granulats neufs.

L'Algérie est dotée d'un réseau routier avec plus de 112 696 kilomètres de chaussées au total dont la totalité est revêtue de matériaux hydrocarbonés; l'entretien de ces routes passe nécessairement par le fraisage des anciennes couches de chaussée, ce qui engendre une grande quantité de déchets des matériaux bitumineux [1].

L'utilisation de la technique de fraisage- recyclage des enrobés bitumineux pour leur réutilisation dans les projets routiers permet de réduire le coût global d'un projet de 30 % et d'un point de vue environnemental. Le recyclage des enrobés permet de limiter l'utilisation des ressources naturelles non renouvelables dans la construction des infrastructures, en plus de réduire la quantité de rebuts dans les lieux d'entreposage [2].

La Hollande, l'Allemagne, ou encore les Etats-Unis réemploient plus de 80 % des agrégats issus de la déconstruction des routes. En Algérie, l'entreprise SONATRO (Société Nationale des Travaux Routier) a tenté une expérience en 1985, sur un tronçon routier sur la rocade IV (Zeralda-Alger) à chaud, en centrale, et sur un autre tronçon au sud sur la RN 3 (Ouaragla –Hassi Messaoud) à froid, in situ. L'expérience s'est avérée concluante mais jamais renouvelée [3].

Sur le plan technique, les performances de l'enrobé recyclé sont généralement meilleures que celles de l'enrobé neuf. Cependant, la rigidité augmente considérablement pour les enrobés recyclés à plus de 30% à cause de la présence importante du liant vieilli. Cette rigidité fragilise le matériau (fissurations) d'autant que les enrobés sont destinés à être utilisés sur un corps de chaussée souple. Pour pallier à ce problème, les enrobés recyclés à plus de 30% sont formulés et fabriqués avec des liants plus mous (indice de pénétrabilité plus élevé) ou des liants régénérant [4].

Dans le cadre de notre travail, vue la non disponibilité des liants mous ou régénérants et vu les résultats des travaux antérieurs sur l'effet de l'incorporation de la poudrette de caoutchouc sur les performances Marshall, nous avons envisagé d'introduire cette poudrette dans le squelette granulaire pour éventuellement assouplir un enrobé recyclé à 50%.

Dans ce mémoire, nous avons analysé « l'évolution des caractéristiques Marshall d'un enrobé bitumineux semi-grenu (BBSG0/14) contenant 50% d'Agrégats d'Enrobé, en fonction du taux et de la nature de la poudrette de caoutchouc incorporée au squelette granulaire ».

L'objectif de cet travail est d'identifier le taux et le type de poudrette qui confèreraient à l'enrobé recyclé des caractéristiques comparables à celles de l'enrobé neuf sans avoir à changer le grade ou de type de liant d'apport.

Les Agrégats d'Enrobés sont issus du fraisage de la couche de roulement en béton bitumineux. Le bitume d'apport est un bitume 40/50. Deux poudrettes sont ont été testées : une est issue du broyage des semelles des chaussures et l'autre du broyage de caoutchouc des pneus usagés. Le taux d'incorporation est de 1%, 2% et 3% du poids total des granulats.

Le travail effectué comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre porte sur les enrobés bitumineux, les différents constituants, la méthode de formulation ainsi que les essais effectués sur les enrobés bitumineux ;

Le deuxième chapitre traite des enrobés bitumineux recyclés, la préparation au recyclage de AE, les pratiques existantes pour la réutilisation des AE et les différentes types de centrales d'enrobages.

Le troisième chapitre présente la poudrette de caoutchouc, sa fabrication et son utilisation.

Le quatrième chapitre est consacré à l'identification des matériaux utilisés, l'étude de la formulation de l'enrobé bitumineux classique, l'enrobé bitumineux recyclé modifié à la poudrette de caoutchouc ainsi que l'interprétation des résultats obtenus.

CHAPITRE.I. *Les enrobés bitumineux*

I.1.Introduction

Un enrobé bitumineux est un mélange uniforme de granulats de différentes dimensions enrobés de bitume, on parle d'un enrobé bitumineux à chaud lorsque ce mélange est fabriqué aux alentours de 160 °C dans une centrale d'enrobage.

Les Bétons Bitumineux Semi Grenu (BBSG) représentent la major partie des enrobés utilisés en en couche de roulement et de liaison. Selon l'épaisseur de mise en œuvre de 5 à 7 cm ou de 6 à 9 cm, ils ont de granularité 0/10 ou 0/14, généralement de type continu. Ils doivent répondre au mieux aux contraintes induites par un trafic de plus en plus intense et agressif et par le climat [5].

I.2. Les principaux constituants de l'enrobé bitumineux

Les matériaux entrant dans la composition des enrobés utilisés en couche de roulement de chaussées se répartissent en 2 grandes catégories [6]:

- ✓ Le bitume,
- ✓ Les granulats.

I.2.1. Le bitume

I.2.1.1. Définition

Le bitume est un hydrocarbure qui s'est constitué naturellement durant une très longue période à partir du plancton accumulé et enfoui au fond des bassins sédimentaires. Il contient en moyenne 80 à 85 % de carbone, 10 à 15 % d'hydrogène, 2 à 3 % d'oxygène et en moindre quantité, du soufre, de l'azote et divers métaux à l'état de traces. A température ambiante, il est très visqueux, presque solide et présente deux caractéristiques importantes [6]:

- C'est un agglomérant avec un fort pouvoir adhésif
- Il est imperméable à l'eau

I.2.1.2. Origine du bitume

Tous les bitumes sont des produits du pétrole brut où ils se trouvent en solution. Ils sont le résultat de l'élimination des huiles servant de solvant par évaporation ou distillation du pétrole brut. Sachant que de tels processus pourraient se produire dans la nature, au niveau des couches souterraines, les bitumes proviennent en conséquence de deux sources: naturelle ou industrielle.

✓ Les bitumes naturels

Les bitumes naturels sont extraits des pétroles bruts, complètement dépourvus de fractions légères et contenant un certain pourcentage de matière minérale.

Le plus connu est certainement le « *bitume de Trinidad* » provenant d'un lac de bitume situé dans l'île de Trinidad (Antilles britanniques).

✓ Les bitumes artificiels

Le bitume est la fraction la plus lourde du pétrole brut, la teneur en bitume d'un pétrole peut varier de 0 % (pétrole léger de Sahara) à près de 100 % [6].

Les bitumes de pétroles sont obtenus :

- Soit par la distillation des pétroles bruts ensuite traités par des huiles légères pour donner tout une gamme de produits variés très utilisés en techniques routière.
- Soit par oxydation (soufflage à l'air comprimé) : on obtient des produits employés en étanchéité.

Le pourcentage d'un bitume peut varier dans très grandes proportions, il peut être :

- Faible voire nul, ce qui rend son extraction non rentable sur le plan industriel (cas des pétroles algériens et ceux du moyen orient).
- Très élevé, il peut atteindre les 70 à 80 % dans certains pétroles de l'Amérique latine (Venezuela), il peut atteindre pratiquement 100 % dans les bitumes naturels.

I.2.1.3. Structures chimiques d'un bitume

Le bitume est un mélange de composés hydrocarbonés de masses molaires et de structures chimiques variées, appartenant en majorité aux groupes aliphatiques et naphthéniques. Il est constitué de deux groupes génériques : les asphaltènes et les malthènes.

Les asphaltènes constituent environ 15 % du poids du bitume et les malthènes 85% répartis en trois familles : les Aromatiques 55 %, les Saturés 10 % et les Résines 20 % [cité par 7].

Les quatre principales fractions citées sont désignées sous l'appellation **SARA** (*Saturés, Aromatiques, Résines, Asphaltènes*) et sont obtenues selon la technique décrite dans la figure I.1.

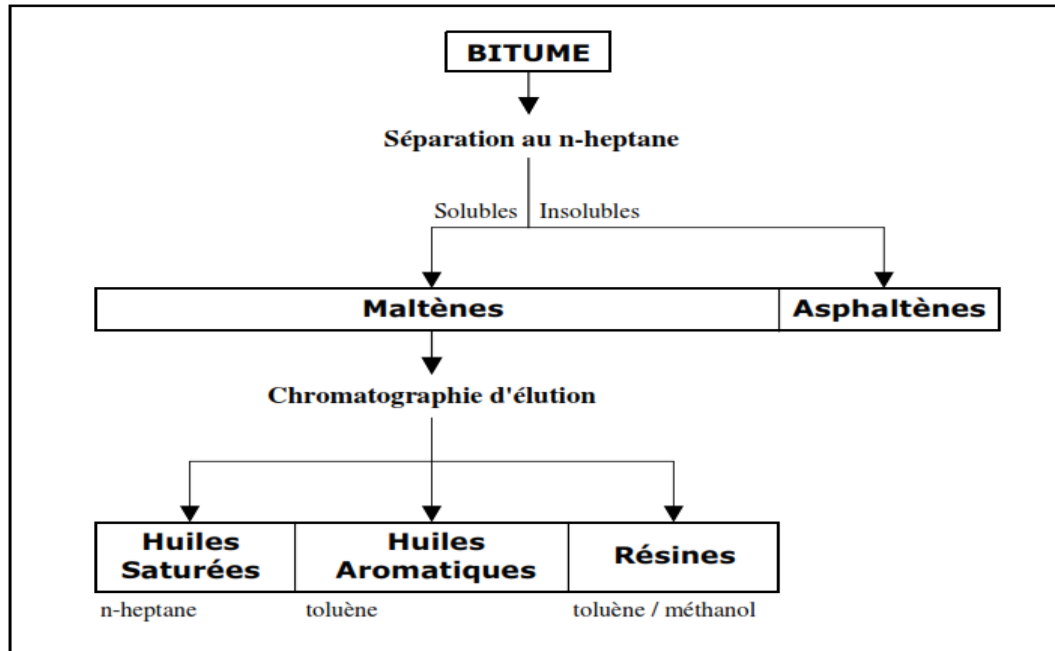


Figure.I.1. Définition des fractions d'un bitume [cité par 7]

✓ Définitions des fractions SARA

- **les asphaltènes** : Produits solides apportant au bitume sa cohésion et sa dureté et constituent entre 5 et 20 % du bitume.
- **les maltènes** : Produit huileux (molécules moins grosses) dans lequel baignent les asphaltènes. Les molécules de maltène peuvent être encore séparées par chromatographie en d'autres hydrocarbures.
- **saturés (dont les paraffines)** : Ils sont incolores ou légèrement jaunâtres. Ils affectent la viscosité du bitume.
- **Les aromatiques** : Sont des huiles visqueuses de couleur rouge brun foncé. Ils affectent aussi la viscosité du bitume.
- **Les aromatiques polarisés (les résines)** : Influencent son adhérence [cité par 7].

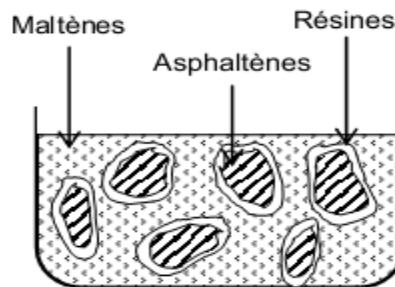


Figure.I.2. Composition du bitume [cité par 7]

I.2.1.4. Classification des bitumes

On peut classer les bitumes selon leur origine et selon leur dureté :

✓ Classification suivant leur origine

- Les bitumes naturels ;
- Les bitumes d'extraction de roches ou de sable ;
- Les bitumes obtenus par calcination de certaines roches contenant des hydrocarbures ;
- Les bitumes asphaltiques de distillation ou brais de pétrole ;
- Les bitumes asphaltiques soufflés ;
- Les bitumes asphaltiques de cracking.

✓ Classification suivant leur dureté

- Les bitumes durs de pénétration 40/50 ;
- Les bitumes semi-durs de pénétration 80/100 ;
- Les bitumes semi-mous de pénétration 180/220 ;
- Les bitumes mous de pénétration 280/300 ;
- Les bitumes très mous de pénétration 300/359 ;
- Les bitumes fluides de pénétration > 350.

Il est à noter que les classes les plus utilisées en Algérie sont : 40/50 et le 80/100 [5].

I.2.1.5. Identification des bitumes

Les principaux essais d'identification de bitume sont

✓ **Pénétrabilité à l'aiguille (NF T 66-004) (NA 5192)**

C'est un essai simple qui permet d'apprécier la consistance d'un bitume à différentes températures. La mesure de la pénétrabilité à une température bien précise : 25°C sert à classer les bitumes purs en différentes catégories.

Cet essai consiste à mesurer l'enfoncement à une température de 25°C d'une aiguille normalisée chargée à 100g dans un échantillon de bitume durant un intervalle de temps de (5s) .La pénétrabilité est alors la distance parcourue par l'aiguille, exprimée au 1/10^e de millimètres mesurée par un pénétromètre.

Il permet également de mesurer la susceptibilité du bitume à partir de mesures de pénétrabilités à cinq températures différentes : C'est l'indice de pénétrabilité I_p par la méthode " LCPC " .

✓ **Point de ramollissement bille et anneau (NF T 66-008) (NA 2617)**

Cet essai détermine la température à laquelle un produit bitumineux atteint un certain degré de ramollissement dans les conditions normalisées. Le bitume est liquéfié par chauffage et versé dans deux anneaux en laiton de dimensions normalisées, puis refroidi à la température ambiante. Une bille d'acier est placée au centre de l'échantillon et l'ensemble est chauffé progressivement (5°C par minute). La température correspondant à l'instant où la bille d'acier touche la plaque inférieure est le point de ramollissement bille et anneau (TBA) du bitume considéré. Cet essai est pratiqué généralement sur des bitumes purs.

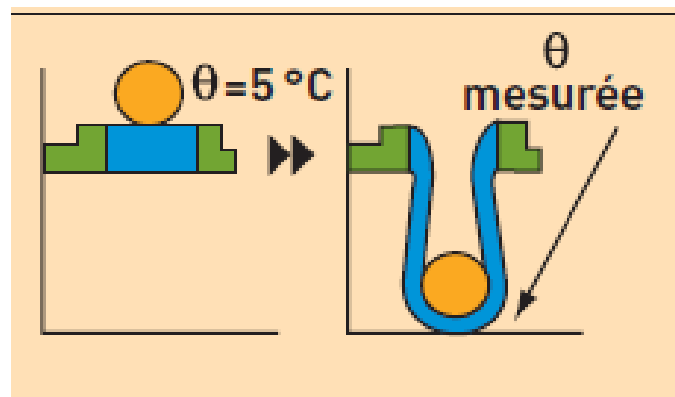


Figure.I.3. Principe de l'essai TBA [cité par 7]

✓ La ductilité (NF T66-006)

Cet essai consiste à mesurer l'allongement d'une éprouvette de bitume de forme déterminée. La ductilité est la longueur exprimée en centimètres à laquelle peut être étirée une briquette standard de bitume sans se rompre. La section transversale minimum de la briquette est de 1 cm².

L'essai de ductilité standard est exécuté sur bitume routier à la température de 25°C, et la vitesse d'étirage ou de séparation des deux extrémités de la briquette est de 5 cm/min.

✓ Densité relative (NF T66-007) (NA 5224)

La densité des bitumes est mesurée au pycnomètre généralement à 25°C, quelquefois à 15°C. Elle est définie par le rapport de la masse d'un volume de bitume donné à une température donnée sur celle d'un égal volume d'eau mesurée à la même température.

La densité des produits bitumineux est intéressante à connaître car :

- Elle permet de faire les corrections de volumes lorsque ceux-ci sont mesurés à des températures élevées (267°C ,270°C) ;
- Elle entre également dans le calcul du pourcentage des vides dans les mélanges bitumineux routiers compactés.

✓ Perte de masse au chauffage (NF T66 – 011)

Le bitume soumis à des températures élevées voit sa masse diminuer avec le temps. La perte de masse au chauffage du bitume est le rapport exprimé en pourcentage de la différence de masse entre la prise initiale de bitume (avant chauffage) (50g) et la prise finale sur la masse initiale. L'échantillon de bitume est placé dans une étuve et chauffé pendant cinq heures à une température de 160°C.

Cet essai a pour but de rendre compte des modifications apportées aux propriétés du bitume après l'action de la chaleur et d'en déduire une indication approximative sur sa stabilité dans le temps et sous l'action des agents atmosphériques.

✓ Point d'éclair et point de flamme (NF T60-118)

Le point d'éclair est la température la plus basse à laquelle les vapeurs s'enflamment à l'approche de la flamme. Le point de feu est déterminé à partir du moment où l'huile prend feu et brûle pendant au moins cinq secondes (5s).

L'une des méthodes de détermination du point d'éclair est l'essai du point d'éclair à "*l'appareil Cleveland à vase ouvert*". Un vase de laiton est partiellement rempli de bitume et chauffé. Une petite flamme est amenée au-dessus de la surface de l'échantillon périodiquement, puis on note la température à partir de laquelle il y aura assez de dégagement de vapeurs pour produire un éclair instantané. Cette température sera désignée comme étant le point d'éclair.

I.2.2. Les granulats

I.2.2.1. Définition

On désigne par le terme « granulat » un ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 et 80 mm. Ils sont désignés par d/D (classe granulaire), d et D représentent respectivement, la plus petite et la plus grande dimension [8].

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées et classées d'après les dimensions extrêmes d/D:

- Les fines 0/D avec $D \leq 0,080 \text{ mm}$
- Les sables 0/D avec $D \leq 6,3 \text{ mm}$
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2 \text{ mm et } D \leq 31,5 \text{ mm}$
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20 \text{ mm et } D \leq 80 \text{ mm}$
- Les graves 0/D avec $6,3 \text{ mm} < D \leq 80 \text{ mm}$

I.2.2.2. Caractéristiques des granulats

Il existe deux types de caractéristiques :

I.2.2.2.1. Caractéristiques intrinsèques

Celles qui tiennent à la nature de la roche d'origine (résistance au polissage; résistance aux chocs; masses volumiques; porosité; coefficient d'absorption et la teneur en eau), ce sont :

- *La résistance aux chocs*

Destinée à évaluer l'aptitude des gravillons à se fragmenter sous l'action du trafic, la fragilité se mesure en utilisant l'essai Los Angeles (LA).

Tableau.I.1. Le nombre des boulets correspondants aux classes granulaires pour l'essai de LA [cité par 7]

Classes granulaires (en mm)	Nombre boulets	Poids total de la charge (en grammes)
4 – 6.3	7	3080 (à +20 à -150)
6.3 – 10	9	3960 (à +20 à -150)
10 – 14	11	4840 (à +20 à -150)
10 -25	11	4840 (à +20 à -150)
16 – 31.5	12	5280 (à +20 à -150)
25 - 50	12	5280 (à +20 à -150)

- ***La résistance à l'usure par frottement***

Le frottement existe aussi bien à la surface de la chaussée sous l'action du pneumatique qu'entre les granulats en contact à l'intérieur d'une assise. L'usure qui en résulte est le frottement influencé par la présence d'eau; l'essai utilisé est l'essai micro-Deval en présence d'eau (MDE).

Tableau.I.2. Charge abrasive correspondant aux classes granulaires pour l'essai de MDE [cité par 7]

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (grammes)
4 – 6.3	2000 ± 5
6.3 – 10	4000 ± 5
10 – 14	5000 ± 5

- ***La résistance au polissage***

Les couches de roulement de chaussées ne doivent pas être exécutées avec des matériaux trop polissables, en égard au trafic auquel elles sont destinées et afin d'éviter que les chaussées ne deviennent glissantes.

1.2.2.2.2. Caractéristiques de fabrication

Celles qui résultent de la fabrication des granulats (propreté, forme, granularité, angularité, homogénéité), on citera :

- ***La granulométrie***

Déterminée par analyse granulométrique par tamisage, traduite par une courbe granulométrique (% de passant cumulés en ordonnée, et les dimensions de tamis en abscisse à l'échelle logarithmique).

- ***L'aplatissement***

Elle consiste à déterminer la masse de granulats plats exprimée en pourcentage de la masse de l'échantillon, est appelée indice d'aplatissement.

- ***L'angularité***

Applicable aux granulats d'origine alluvionnaire, elle représente les arêtes vives obtenues après concassage.

- ***La propreté superficielle des gravillons***

Consiste à mesurer le pourcentage d'éléments fins subsistant après lavage.

- ***Propreté des sables***

Pour la mesure de l'équivalent de sable. Le tableau de la page suivante résume les spécifications pour les granulats en fonction de l'importance du trafic.

Tableau.I.3. Les caractéristiques exigées pour les granulats routiers [cité par 8]

Trafic poids lourds/j V/j dans les 2 sens	Caractéristiques exigées	Couche de liaison	Couche de roulement
		Bétons bitumineux	
T4 < 25 (<500v/j)	A LA MDE P ES	< 30 < 30 < 25 < 2% > 50	< 30 < 30 < 25 < 2% > 50
T3 25 à 150 (500v/j à 3000 v/j)	A LA MDE P ES	< 30 < 25 < 20 < 2% > 50	< 25 < 20 < 15 < 2% > 50
T2 150 à 300 (3000v/j à 6000v/j)	A LA MDE P ES	< 25 < 25 < 20 < 2% > 50	< 20 < 20 < 15 < 2% > 50
T1 300 à 750 (6000v/j à 15000 v/j)	A LA MDE P ES	< 25 < 25 < 20 < 2% > 50	< 20 < 20 < 15 < 2% > 50
T0 > 750 (> 15000v/j)	A LA MDE P ES	< 20 < 25 < 20 < 2% > 50	< 20 < 15 < 15 < 2% > 50

Avec:

- ✓ **A** : Coefficient d'aplatissement.
- ✓ **ES**: équivalent de sable.
- ✓ **LA**: Coefficient Los Angeles.
- ✓ **MDE**: coefficient micro Deval en présence d'eau.
- ✓ **P**: propreté superficielle.

I.3. Etude de formulation en laboratoire

Formuler un enrobé bitumineux pour couche de roulement, c'est déterminer le meilleur mélange de granulats de diverses dimensions et du bitume permettant d'obtenir un matériau doué de certaines propriétés : imperméabilité, rugosité, résistance mécanique (orniérage et la fatigue) [5].

Les principaux critères à prendre en compte lors du choix d'une formulation d'enrobé sont les suivants :

- ✓ **Le trafic** : pour choisir une formule il faut d'abord tenir compte du trafic et du type de sollicitation (rampes exposées au sud, zone de freinage ...), pour des chaussées très circulées (autoroutes, routes nationales) on retiendra des formules aides c'est-à-dire utiliser des bitumes durs et bannir les granulats roulés. Par contre pour des chaussées peu circulées avec des supports déformables, des mélanges plus souple de type « enrobé dense » seront mieux adaptés.
- ✓ **Le type de structure** : chaussée souple ou semi-rigide.
- ✓ **La région** : l'exposition de la route et les conditions climatiques. Par exemple, une chaussée traversant une région boisée sera en permanence mouillée. Dans des zones soumises à des fortes sollicitations hivernales on retiendra des formules conduisant à des compacités in situ élevées (95% voire plus). Pour des climats chauds, on pensera surtout aux risques possibles de fluage et on retiendra des formules avec bitumes plus durs ne contenant pas de matériaux roulés.
- ✓ **L'épaisseur** : c'est certainement le critère n° 1 à prendre en compte pour le choix d'une formule d'enrobé. En effet, il y a une relation indiscutable entre la compacité d'une couche d'enrobé et son épaisseur. Une même formule utilisée avec des épaisseurs différentes, donne des compacités différentes. Cette différence de compacité tient au fait qu'un enrobé en couche plus mince se refroidit plus vite et que le compactage devient rapidement inefficace sur des matériaux insuffisamment chauds. Une formule prévue pour une épaisseur donnée doit être modifiée si l'on modifie l'épaisseur de la couche (par exemple : 1cm d'épaisseur en plus correspond à un gain de 1 point dans la compacité). L'épaisseur

permet en outre de trouver une solution acceptable au compromis résistance à l'orniérage-résistance aux sollicitations hivernales.

- ✓ *Les conditions d'exploitation hivernales* : pneus à crampons et sels de déverglaçage.
- ✓ *Les conditions de site au niveau de la sécurité* : routes de montagne, voies à grande vitesse ...etc.

I.3.1. Composition granulométrique

La méthode la plus couramment utilisée consiste à viser certaines valeurs de tamisât à deux ou trois tamis choisis, ou en général à ajuster cette courbe dans un fuseau de spécification de référence [8].

I.3.1.1. Fuseau granulométrique

Le squelette minéral d'un enrobé bitumineux doit répondre à certaines règles de composition granulométrique que l'on résume sous forme de fuseaux à l'intérieur desquels la courbe granulométrique du produit considéré peut se déplacer.

Dans un fuseau de spécification, peuvent figurer une infinité de courbes de mélanges. Le choix de la courbe granulométrique appropriée est fonction du comportement de l'enrobé bitumineux correspondant à chaque courbe choisie et testée en laboratoire (performances mécaniques, plus économique). Toutefois on se fixe une courbe modèle qui correspond en théorie à un optimum des propriétés du mélange et, on essaie par approximation de se rapprocher au mieux de celle-ci en jouant sur les pourcentages des différentes fractions granulaires considérées.

Le tableau ci-dessous nous donne des exemples de courbes granulométriques modèles pour la formulation des enrobés bitumineux.

Tableau.I.4. Quelques exemples de courbes modèles [cité par 8]

N°	Courbes modèles	Forme Mathématique
1	Courbe 5/8	$Y = 100(X/D)^{5/8}$
2	Füller	$Y = 100(X/D)^{0.5}$
3	Nijböer	$Y = 100(X/D)^{0.45}$

Avec : D : diamètre du plus gros granulat

X : diamètre du granulat choisi ($0 < X < D$)

Y : Le pourcentage de tamis

I.3.1.2. Quelques exemples de fuseaux de spécification pour enrobés

Les tableaux suivants nous donnent des indications sur les fuseaux de référence des bétons bitumineux.

Tableau.I.5. Fuseaux de référence pour la granularité des bétons bitumineux semi grenus [cité par 8]

Ouvertures des tamis (mm)	Béton bitumineux 0/10 (%)	Béton bitumineux 0/14 (%)
14		94 à 100
10	94 à 100	72 à 84
6.3	65 à 75	50 à 66
4	45 à 60	40 à 57
2	30 à 45	28 à 40
0,08mm couche de roulement	7 à 10	7 à 10
0,08mm couche de liaison	6 à 9	6 à 9

Tableau.I.6. Fuseaux de spécification de granularité pour enrobés de surface de chaussées souples à faible trafic [cité par 8]

Tamisats au tamis de (mm)	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
	0/10 discontinu 2/6,3	0/10 continu	0/10 continu	0/14 continu
14	-	-	95 à 100	95 à 100
10	92 à 100	95 à 100	76 à 82	74 à 80
6,3	48 à 53	65 à 72	55 à 60	53 à 58
2	40 à 45	38 à 46	32 à 36	30 à 35
0,5	20 à 26	20 à 27	15 à 20	14 à 19
0,08	7 à 10	6 à 9	6 à 9	7 à 9

Avec : Type 1 : enrobé d'épaisseur 4 à 5cm,

Type 2: enrobé d'épaisseur 8cm,

Type 3: enrobé d'épaisseur 10 à 12cm

Tableau.I.7. Fuseaux de spécification de la granularité pour Bétons bitumineux clouté [cité par 8]

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Tamisats (%)</i>
10	90 à 100
6,3	70 à 80
4	55 à 65
2	40 à 50
0,63	21 à 28
0,08	8 à 11

I.3.1.3. Teneur en Fillers

Le filler est un matériau granulaire très fin. Il est défini par une classe granulaire 0/D telle que: $D < 0,08$ mm ou 80 μ m

Les fillers sont utilisés dans la composition des enrobés bitumineux pour:

- ✓ Augmenter la teneur en fines du sable si celle-ci est faible ;
- ✓ Comblent les vides laissés par les grains de sables dans l'enrobé ce qui améliore la compacité ;
- ✓ Multiplier les points de contact entre les différents grains et augmenter la stabilité de l'enrobé bitumineux ;
- ✓ Permettre au liant de se rigidifier sans pour autant nuire à la plasticité de l'enrobé bitumineux ;
- ✓ Permettre d'utiliser un dosage en liant élevé sans pour autant nuire au comportement de l'enrobé en service (Amélioration de la perméabilité sans avoir de ressuage de surface) ;
- ✓ Augmenter la résistance à la compression de l'enrobé bitumineux ;
- ✓ Augmenter la résistance au désenrobage à l'eau de l'enrobé bitumineux.

La teneur en fillers à retenir pour le chantier sera déterminée à partir d'une étude en laboratoire qui portera au moins sur trois types différents (pourcentages). Il est à noter que si l'on a affaire à un sable pollué, c'est à dire qui contient une teneur en argile non négligeable, on est amené à utiliser des fillers d'apport pour parer à cette défaillance [8].

Comme fines d'apports généralement utilisés en construction routière, on peut citer

- ✓ La chaux éteinte;
- ✓ Le ciment ;
- ✓ Le soufre.

I.3.2. Teneur en liant

La teneur en liant à retenir est définie à partir d'une étude de laboratoire qui consiste à choisir à partir d'un granulats simple ou composé entrant dans le fuseau recommandé. Elle sera fonction de la surface spécifique des granulats selon la formule suivante [8].

$$\text{Teneur en liant} = \alpha \cdot K \sqrt{\Sigma}$$

Avec : **K**: module de richesse pouvant prendre les valeurs suivantes

- ✓ 2 à 2,6 pour les graves bitumes
- ✓ 3,3 à 3,9 pour un béton bitumineux

α: coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats.

$$\alpha = \frac{2,65}{MVRg}$$

Avec :

MVRg = Masse volumique réel des granulats

Σ : Surface spécifique du granulat, La surface spécifique du granulat est calculée par la formule

$$\Sigma = 0,25.G + 2,3.S + 12.s + 135.f$$

Avec:

- ✓ G : pourcentage en poids des éléments de dimensions supérieur à 6,3 mm
- ✓ S : pourcentage en poids des éléments de dimensions comprises entre 6,3 et 0,315 mm
- ✓ s : pourcentage en poids des éléments de dimensions comprises entre 0,315 et 0,08 mm
- ✓ f : pourcentage en poids des éléments de dimensions inférieurs à 0,08 mm

I.4. Essais sur enrobés bitumineux

I.4.1. Essai Marshall

Il permet de détermination de la teneur en vides et les caractéristiques mécaniques de l'enrobé L'essai Marshall est largement utilisé par les laboratoires Algériens, il permet d'avoir les caractéristiques suivantes :

- ✓ La stabilité (SM) qui est la résistance maximale à l'écrasement ;
- ✓ Le fluage (FM) qui est le raccourcissement du diamètre de l'éprouvette au moment de sa rupture.

Deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'orniérage Elles permettent de définir le quotient Marshall SM/FM.

On prépare un mélange hydrocarboné qu'on mettra dans des moules cylindriques, on fait subir à l'enrobé un compactage en appliquant 50 coups par face par une dame, on fait refroidir les éprouvettes à l'air pendant 4 à 5 heures, chaque éprouvette est démoulée à l'aide d'une presse, conservé ensuite pendant 24 heures.

Les éprouvettes, sont immergées dans un bain d'eau à 60°C pendant une durée de 30 à 40 min puis comprimées à vitesse constante 50 mm/min en compression diamétrale empêchée au moyen de mâchoires hémicylindriques [9].

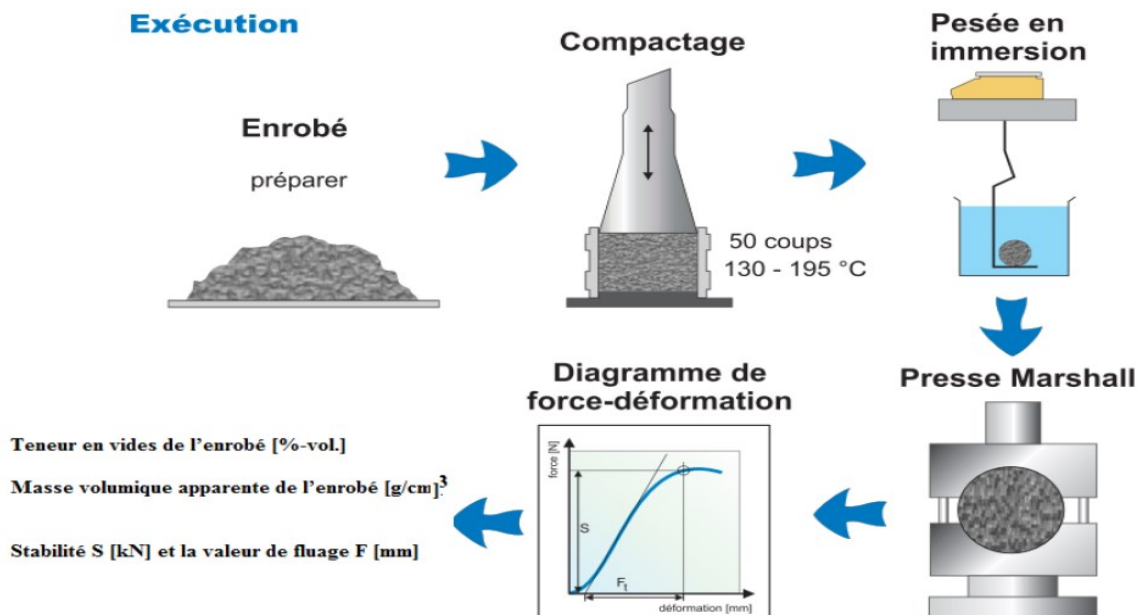


Figure.I.4. Principe de l'essai MARSHALL [cité par 9]

I.4.2. Tenue à l'eau

La tenue à l'eau est habituellement mesurée au moyen de l'essai Duriez dans le cadre de la normalisation française et algérienne. Cependant, en Algérie, l'essai Duriez est de moins en moins utilisé remplacé par l'adaptation de l'essai Marshall à la tenue à l'eau.

I.4.2.1. Adaptation de l'essai Marshall à la tenue à l'eau (sensibilité à l'eau)

Le mode opératoire de l'essai MARSHALL ne renseigne pas sur la tenue à l'eau de l'enrobé, néanmoins au niveau du CTTP d'Alger on utilise une note de calcul européenne EN 12697-12 [10] qui consiste à introduire l'immersion ainsi que le calcul de gonflement, cette méthode est pratiquée comme suit:

On prépare un mélange hydrocarboné qu'on mettra dans des moules cylindriques, on fait subir à l'enrobé un compactage en appliquant 50 coups de la dame sur les deux surfaces de l'éprouvette, on fait refroidir les éprouvettes à l'air pendant 4 à 5 heures, chaque éprouvette est démoulée à l'aide d'une presse, conservé ensuite pendant 24 heures.

On prépare 6 éprouvettes de même composition :

- ✓ (03) éprouvettes conservées à une température de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ sans immersion.
- ✓ (03) éprouvettes immergées pendant 72 heures à une température de $40 \pm 1^\circ\text{C}$.

On calculera le volume, puis on fait immerger de nouveau pendant 2 heures (la température varie de 18 à 25 °C).

Les éprouvettes (immergés et non immergés) sont comprimées à vitesse constante 50 mm/min au moyen de mâchoire de la traction indirecte.

On calcule ensuite :

- le Rapport immersion / compression (RC_{imm}/RC_{sec})

RC_{imm} = Résistance à la traction indirecte du lot «humide».

RC_{sec} = Résistance à la traction indirecte du lot «sec».

I.4.2.2. Essai Duriez (Essai de compression simple type LCPC)

Cet essai est réalisé sur une éprouvette cylindrique d'enrobé bitumineux de poids et de section bien déterminés. Celle-ci est soumise à une compression statique.

Les éprouvettes ainsi confectionnées sont conservées :

- Les unes à 18°C pendant une durée de sept jours dans l'air.
- Les autres à 18°C pendant une durée de sept jours dans l'eau.

Les éprouvettes sont écrasées à 18°C au huitième jour et l'on obtient:

- La résistance des éprouvettes conservées à l'air pendant une durée de sept jours **R**.
- La résistance des éprouvettes conservées dans l'eau pendant une durée de sept jours **r**.

Le rapport r/R appelé "*rapport d'immersion/compression*" traduit en quelque sorte la tenue à l'eau de l'enrobé bitumineux. C'est un moyen pour apprécier d'une façon indirecte l'adhésivité du bitume aux granulats.

Cet essai nous permet également de mesurer la compacité LCPC qui est très souvent prise comme compacité de référence sur chantier [9].

I.4.3. Essai d'orniérage LPC

Cet essai pratiqué essentiellement pour les couches de roulement, sert à vérifier la résistance à l'orniérage des formules d'enrobés bitumineux étudiées en laboratoire. On détermine la profondeur d'ornière provoquée par le passage répété d'une roue sur une plaque d'enrobé à la température de 60°C [8].



Figure.I.5. Ornièreur LPC [cité par 8]

I.4.4. Essai de Fatigue

Les structures de chaussées subissent un endommagement progressif par fissuration sous l'agressivité du trafic routier. Ce phénomène de fatigue est étudié en laboratoire par des essais de flexion deux points réalisés sur consoles à profil trapézoïdal qui subissent en tête des sollicitations sinusoïdales continues.

Cet essai permet d'étudier le comportement des enrobés bitumineux vis-à-vis de la fissuration, il est pratiqué sur des éprouvettes de forme trapézoïdales, l'éprouvette est encastrée à la base,

sollicités en tête en flexion sinusoïdale par déplacement imposé d'amplitude constante choisie afin de caractériser la rupture à un million de cycle.

L'essai est pratiqué à 10°C et à une fréquence de 25 Hz.

La répétitivité des cycles de flexion alternée entraîne un endommagement de l'éprouvette (des fissures sont localisées).

L'essai est conduit jusqu'à réduction de moitié de l'effort mesuré en tête, c'est le critère de la rupture. Les résultats obtenus sont reportés sur un diagramme (déformation - nombre de cycles à rupture) [8].

I.5. Les facteurs influençant le béton bitumineux

Les propriétés des enrobés hydrocarbonés peuvent varier si l'on influe sur les caractéristiques des trois facteurs principaux de la composition que sont les granulats. Les fines, le liant, ainsi que sur la compacité de l'ensemble [5].

I.5.1. Influence des granulats

Elle s'exerce sur les propriétés des enrobés par l'intermédiaire de la granularité, l'angularité des fines [5].

✓ Effet de la granularité

Le choix de la granularité pour les couches de roulement n'est pas uniquement imposé par le souci d'obtenir une bonne compacité. Un compromis doit être trouvé étant donné la nécessité d'obtenir une texture superficielle présentant une microrugosité suffisante pour le maintien des caractéristiques antidérapante du revêtement et pour mieux résister à l'action des pneus à crampons. A cet effet, on tend à augmenter la dimension maximale des granulats ce qui va dans le sens d'une meilleure compacité (à condition que l'épaisseur de la couche le permette) et à une diminution de la teneur en bitume.

✓ Effet de l'angularité

Elle a une influence directe sur la résistance à l'orniérage. La présence de granulats anguleux dans un enrobé hydrocarboné augmente la résistance au cisaillement grâce au frottement interne plus élevé du squelette.

Elle augmente également les qualités antidérapante du revêtement en présentant des arêtes vives plutôt que des faces roulées, c'est pourquoi dans les couches de roulement il est préférable d'utiliser des granulats entièrement concassés, malgré l'inconvénient de conduire à des enrobés difficiles à compacter.

✓ Influence des fines

Le rôle principal des fines est de remplir les vides du squelette granulaire conduisant ainsi à une augmentation de la compacité et par suite à une meilleure imperméabilité de l'enrobé. Le cas extrême est celui des bétons bitumineux coulés qui, avec une teneur en fines allant jusqu'à 25%, ont une teneur en vide pratiquement nulle, d'où une compacité avoisinant les 100%.

Les fines agissent également par leur dosage sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé et notamment sur la rigidité, puisque c'est surtout la quantité de fines qui détermine l'épaisseur du film de bitume. Les films minces conduisent à des enrobés plus rigides et moins susceptibles à la température.

L'effet de rigidification des forts rapports fines-bitume se traduit sur de nombreuses caractéristiques mécaniques des enrobés et en particulier sur le module complexe et sur la résistance à l'orniérage. En ce qui concerne ce dernier point. Il semble cependant que l'utilisation du rapport fines-bitume élevé ne suffise pas à conférer au matériau une bonne résistance à l'orniérage si la granularité et l'angularité du squelette n'y contribuent pas également.

1.5.2. Influence du bitume

De tous les facteurs de formulation, le bitume est sans doute celui qui a l'influence la plus nette, car le comportement rhéologique des enrobés hydrocarbonés est le reflet de celui du bitume utilisé. Il intervient par sa dureté et par son dosage dans l'enrobé [5].

✓ Effet de la dureté du bitume

La diminution de pénétrabilité du bitume, c'est-à-dire l'utilisation de bitumes plus durs, se traduit par une augmentation importante du module de l'enrobé pour une même température et un même temps de charge, ce qui est important pour la résistance à la fatigue des couches bitumineuses à faibles déflexion.

Enfin, l'utilisation de bitumes plus durs se traduit par une augmentation de la résistance à l'orniérage. Cette qualité a été mise en évidence par la comparaison des profondeurs d'orniérage obtenu dans un essai de simulation utilisant un orniéreur.

✓ Effet de la teneur en bitume

Une majoration de la teneur en bitume a pour effet immédiat, comme les fines, d'accroître la compacité de l'enrobé par augmentation de l'effet de lubrification des granulats et par le remplissage des vides. De même, à partir d'une basse teneur en bitume les résistances mécaniques à la compression et à la traction croissent avec l'augmentation de la teneur en bitume, mais, au-delà d'un certain pourcentage, on assiste à une chute des résistances mécaniques par déformabilité excessive lorsque la teneur en vides devient très faible. Le dosage optimum est très difficile à obtenir, car il doit tenir compte des granulats et surtout de l'épaisseur de l'enrobé.

I.5.3. Influence de la compacité

A la différence des facteurs étudiés ci-dessus, la compacité des enrobés n'est pas un critère de formulation, mais une caractéristique du mélange qui résulte à la fois des facteurs de formulation et des conditions de mise en œuvre. Le rôle de chacun des facteurs de la formulation sur la compacité a été examiné : il faut retenir qu'une compacité élevée conditionne un grand nombre de qualités des enrobés hydrocarbonés telles que [5]:

- ✓ La résistance à la rupture ;
- ✓ Le comportement à la fatigue ;
- ✓ La durée de vie : selon Saunier elle est multipliée par 3 lorsque la compacité passe de 91 à 95,5% ;
- ✓ Le module complexe ;
- ✓ La tenue à l'eau ;
- ✓ La résistance aux pneus à crampons ;
- ✓ La résistance au vieillissement par oxydation du bitume.

I.6.Fabrication des enrobés bitumineux à chaud

Bien que d'autres méthodes existent, telles que la mise en émulsion ou le moussage, les bitumes sont majoritairement (à 70 %) utilisés dans des applications dites « à chaud », où le liant est fluidifié par élévation de la température autour de 160°C, afin d'être mélangé dans des malaxeurs industriels, à des granulats calibrés préalablement séchés [7].

La fabrication des enrobés bitumineux se décompose en différentes étapes :

- ✓ stockage des constituants pour préserver leurs propriétés ;
- ✓ dosage ;
- ✓ chauffage du bitume pour atteindre sa température d'application dans un malaxeur ou un pétrin calorifugé et éventuellement séchage des granulats dans un sécheur ;
- ✓ mélange du bitume chaud et des granulats éventuellement préchauffés et séchés dans le malaxeur ou pétrin, ou coulée du bitume chaud sur les granulats mis en place, ou coulée des granulats sur le bitume chaud répandu, selon l'application (fabrication de chaussée,..);
- ✓ transport et mise en place, les enrobés sont surtout fabriqués sur place. Ces deux étapes se résument donc souvent à une coulée de l'enrobé du malaxeur au lieu d'utilisation.

Un enrobé bitumineux « frais » acquiert ses propriétés physiques définitives dès qu'il a refroidi de sa température de fabrication (entre 130 et 230°C) à sa température d'utilisation.

I.7. Conclusion

Les enrobés sont un mélange uniforme de granulats enrobés de bitume. Pour sécher les granulats et fluidifier suffisamment le bitume en vue de s'assurer d'obtenir un mélange homogène et maniable, les granulats et le bitume doivent être chauffés avant l'enrobage, d'où l'expression «enrobés à chaud».

Les paramètres influençant la performance des enrobés sont la granulométrie, la forme des granulats, la teneur en fines, la dureté et le dosage en liant et l'énergie de compactage lors de la mise en œuvre.

Les méthodes de formulation diffèrent d'un pays à un autre, on retiendra qu'en Algérie, la formulation des enrobés se fait selon une approche empirique basée sur la méthode Marshall.

CHAPITRE.II. *Les enrobés bitumineux recyclés*

II.1. Introduction

Le recyclage des enrobés est un processus utilisé depuis une quarantaine d'années.

Ainsi, face aux contraintes économiques et environnementales de plus en plus pressantes, l'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent les professionnels de la route à chercher de nouvelles sources d'approvisionnement. Ils ont été amenés à s'intéresser aux gisements potentiels de matériaux existants dans les chaussées à démolir ou à rénover.

L'objectif du recyclage à chaud est de fabriquer un enrobé ayant des qualités comparables à celles d'un enrobé neuf : en réutilisant des matériaux récupérés, tout en respectant les contraintes environnementales et technico-économiques. La composition est étudiée pour respecter les caractéristiques et les règles habituelles pour la fabrication des enrobés traditionnels, et plus précisément l'homogénéité du produit final, le respect de l'environnement en matière d'émission de particules solides et de polluants gazeux [11].

II.2. Préparation au recyclage des déchets bitumineux résultants de l'entretien du réseau routier

Les déchets bitumineux produits par les opérations d'entretien des chaussées sont quasiment recyclables et peuvent être réutilisés pour la fabrication d'enrobé bitumineux, et doivent être considérés comme une source de granulats et liant bitumineux permettant de réduire le prélèvement et la consommation de matières premières non renouvelables [12].

II.2.1. Traitement des déchets bitumineux contenant du goudron de houille

Le passé industriel du lieu d'origine des déchets bitumineux implique de vérifier l'absence de goudron de houille.

Le goudron de houille est un sous-produit de l'exploitation industrielle du charbon minier, il était utilisé en tant que liant routier avant la seconde guerre mondiale. A la différence du bitume, le goudron est de par sa composition chimique classé comme produit dangereux. L'utilisation du goudron de houille en technique routière a été abandonnée.

Le recyclage de ces produits est possible mais conditionné [12].

II.2.2. Transformation des déchets bitumineux en matériau recyclable

Les agrégats d'enrobés (AE) issues de recyclage des déchets bitumineux doivent impérativement être conditionnés quelle que soit la réutilisation pour disposer d'une taille adaptée à la technique de recyclage. Ce conditionnement est réalisé, soit lors de la déconstruction de la chaussée par fraisage, soit par des opérations ultérieures de concassage/criblage. Il est fonction de la réutilisation envisagée, avec des contraintes en matière d'études préalables imposées par la technique de réutilisation.

Dès leur arrivée sur une aire de stockage, ils sont réceptionnés en lots identifiés dans l'une des trois classes suivantes :

- ✓ Classe A : fraisats d'enrobés bitumineux issus d'une formule unique, réputés homogènes et de dimension maximale D inférieure ou égale à 31,5 mm.
- ✓ Classe B : fraisats d'enrobés bitumineux issus de formules diverses.
- ✓ Classe C : autres enrobés bitumineux issus de déconstructions de chaussées et de surplus de centrales d'enrobage.

Les fraisats de classe A constituent les agrégats d'enrobés, lesquels sont définis par la teneur et les propriétés du liant récupéré, la granularité et les caractéristiques intrinsèques des granulats après désenrobage [13].



Figure.II.1. Origine des agrégats d'enrobé

II.3. Les Agrégats d'Enrobés

II.3.1. Définition / Stockage

Les agrégats d'enrobé sont des granulats contenant une certaine proportion de bitume obtenus en concassant des enrobés démolis ou à partir du fraisage de couches bitumineuses de routes ainsi que des surplus de centrales d'enrobage [11].

Il est important de protéger les agrégats d'enrobés stockés contre la pluie, car les agrégats d'enrobés ont tendance à retenir l'humidité. En moyenne, la teneur en humidité des agrégats d'enrobés atteint 5 %. Par conséquent, le chauffage et le séchage des AE humides absorbe beaucoup d'énergie, et augmentera fortement le coût de l'enrobé recyclé [15].

Des températures ambiantes élevées feront coller les AE, le compactage dû aux camions ou aux pelles produira des conglomérats, et la lumière du soleil provoquera le vieillissement et l'oxydation des AE. Par mesure de prévention, il est donc recommandé de prévoir un abri dans un hangar ou un bâtiment dont les côtés sont ouverts, pour minimiser la teneur en eau et la variation au sein du dépôt, il n'est pas recommandé de recouvrir les dépôts de bâches, puisque cette pratique risque d'emprisonner l'humidité dans le dépôt [16].

II.3.2. Caractéristiques des agrégats d'enrobés

Quel que soit le mode de récupération, fraisage ou récupération par croûtes, la nature minéralogique des agrégats d'enrobés est celle des granulats naturels d'origine, provenant de roches massives ou de matériaux alluvionnaires [14].

Par analogie avec les granulats naturels, les agrégats d'enrobés sont caractérisés après récupération (fraisage) ou après conditionnement (concassage - criblage) comme suit [14] :

✓ *Avant désenrobage*

Les agrégats d'enrobés récupérés par fraisage et destinés à être réutilisés sans conditionnement supplémentaire possèdent les caractéristiques moyennes suivantes :

- Une granularité de 0/20 à 0/31 mm, la granularité étant principalement dépendante de la vitesse d'avancement de la fraiseuse et de la profondeur de fraisage ;
- Une teneur en eau inférieure à 3%, la teneur en eau influant sur le séchage dans le tambour sécheur (avant recyclage) ;
- Un refus à 25mm inférieur à 7%, la quantité de gros agglomérats (> 25mm) est donc limitée pour favoriser la fragmentation de ces agglomérats dans le tambour sécheur.

Les agrégats d'enrobés récupérés par des moyens autres que le fraisage (retours chantiers, pelles, brise roches...) se présentent sous la forme de blocs de quelques kg à une centaine de kg pour des surfaces atteignant le m². Le conditionnement par concassage - criblage permet d'obtenir des granularités conformes à celles souhaitées pour l'utilisation envisagée.

✓ *Après désenrobage*

Les caractéristiques moyennes de ces agrégats (obtenus par fraisage ou concassage/criblage) deviennent :

- granularité comprise entre 0/10 à 0/14mm ;
- % en fines variant de 8 à 12.

II.3.3. Caractéristiques du liant des agrégats

La teneur en liant des agrégats est fonction du type de récupération. Lorsque les agrégats sont récupérés par fraisage d'une couche d'enrobé homogène, la teneur en liant est proche de celle de l'enrobé d'origine. Lorsque les agrégats sont obtenus après conditionnement d'enrobés de provenances diverses, la teneur en liant moyenne est généralement de l'ordre de 4,5 à 4,7 %.

Ce liant, vieilli, a subi un premier choc (choc thermique et modifications chimiques) au cours de la fabrication et de la mise en œuvre de l'enrobé d'origine, suivi d'une évolution plus lente dans le temps (oxydation à basse température). Ce vieillissement correspond à une perte en moyenne d'une classe pour un bitume pur (dans le cas d'agrégats récupérés par fraisage d'une couche d'enrobés homogènes).

Tableau.II.1. Ordres de grandeurs des caractéristiques des liants anciens [13]

<i>Pénétrabilité à 25°C (1/10mm)</i> <i>NF EN 1426</i>	<i>Température Bille Anneau</i> <i>(°C)</i> <i>NF EN 1427</i>	<i>Teneur en asphaltènes (%)</i> <i>NF T 60-115</i>
<i>De 8 à 50</i>	<i>De 55 à 80</i>	<i>De 15 à 25</i>

Pour les agrégats d'enrobés issus de provenances diverses, la difficulté de prélever des échantillons représentatifs, couplée à la difficulté matérielle (coût et temps) de multiplier les analyses est la cause de l'imprécision de ces caractéristiques. Dans ce cas, le choix de la technique de valorisation et la limitation de la part d'agrégats à réutiliser (taux de recyclage) compensent ce manque de précision [14].

II.4. Les pratiques existantes pour la réutilisation des agrégats d'enrobés

Les agrégats d'enrobés se caractérisent par une homogénéité conditionnée par la grande diversité de provenances de ces déchets routiers. Leur valorisation optimale doit tenir compte de ce critère d'homogénéité et du type d'enrobé recyclé à produire ainsi des contraintes économiques, en fonction de ces exigences on distingue plusieurs classifications de réutilisation des agrégats d'enrobés qui peuvent être faites selon :

- ✓ L'endroit où est effectué le mélange ;
- ✓ La température du processus ;
- ✓ Les caractéristiques du matériau à retraiter ;
- ✓ Le type de liant [16].

II.4.1. Selon l'endroit où est effectué le mélange

II.4.1.1. En place

Les matériaux fraisés et le liant sont mélangés en place. Dans cette méthode les matériaux de la chaussée existante sont le constituant principal, parfois avec l'addition de granulats d'apport.

Le liant est répandu en surface de la chaussée (dans le cas du ciment ou de la chaux) ou est injecté dans le matériel de retraitement (coulis de ciment, émulsion de bitume, mousse de bitume) et est mélangé intimement au matériau fraisé. De l'eau, est habituellement ajoutée pendant les phases de fraisage et de mélange.

II.4.1.2. En centrale

Le matériau fraisé ou pulvérisé est stocké, puis traité pour obtenir une granulométrie appropriée et mélangé en centrale pour former un nouveau matériau traité au ciment ou avec un liant bitumineux. Les malaxeurs peuvent être continus ou discontinus. Le matériel retraité est ensuite transporté sur le site où il est répandu et compacté mécaniquement.

II.4.2. Selon la température du procédé

II.4.2.1. A froid

Le retraitement à froid, sans chauffer les matériaux existants de la chaussée, est généralement effectué en place mais il peut également être exécuté en centrale fixe

II.4.2.2. A chaud

Quand le matériau est retraité en centrale, le fraisât est mélangé à chaud avec le bitume et les granulats d'apports ajoutés pour corriger la granularité. Les mélanges contiennent habituellement moins de 40% de matériau recyclé, mais ils peuvent comporter jusqu'à près de 100% des agrégats d'enrobés. Quand le matériau est retraité en place à chaud, des machines de chauffage spéciales élèvent la température de la chaussée pour faciliter son fraisage et le mélange.

II.4.3. Selon les caractéristiques du matériau à recycler

Le retraitement peut être limité à une couche relativement homogène (par exemple, une couche granulaire recouverte par un enduit superficiel ou par une épaisseur réduite de mélange bitumineux) ou elle peut concerner deux couches ou plus de matériaux différents (par exemple, une couche granulaire recouverte d'une épaisseur importante de mélanges bitumineux par suite de recouvrements successifs).

II.4.4. Selon le type de liant

II.4.4.1. Bitume

Le retraitement à chaud en centrale des enrobés recyclés utilise le bitume comme liant.

La figure II.2 synthétise les différentes techniques proposées en matière de réutilisation des agrégats d'enrobés.

II.4.4.2. Émulsion de bitume

Le matériau fragmenté est mélangé à l'émulsion et à la quantité nécessaire d'eau. Une fois mis en place et compacté, le mélange obtenu a des caractéristiques comparables à celles d'une grave-émulsion ou d'un enrobé bitumineux dense à froid.

II.4.4.3. Mousse de bitume

La mousse est produite par l'injection d'une quantité contrôlée d'eau (habituellement, environ 2 à 3% en masse) et d'air dans le bitume chaud. La viscosité de bitume est ainsi nettement diminuée, ce qui permet le mélange avec le matériau de chaussée fraisé.

II.4.4.4. Ciment

Le dosage en ciment est ajusté pour obtenir une résistance au moins égale à celle d'un sol traité au ciment, bien que, selon les caractéristiques du matériau à retraiter et la teneur en ciment, des valeurs beaucoup plus élevées puissent être obtenues. Par exemple, dans le cas de matériaux granulaires relativement propres, les caractéristiques et la résistance du mélange après retraitement seront semblables à celles d'une grave traitée au ciment.

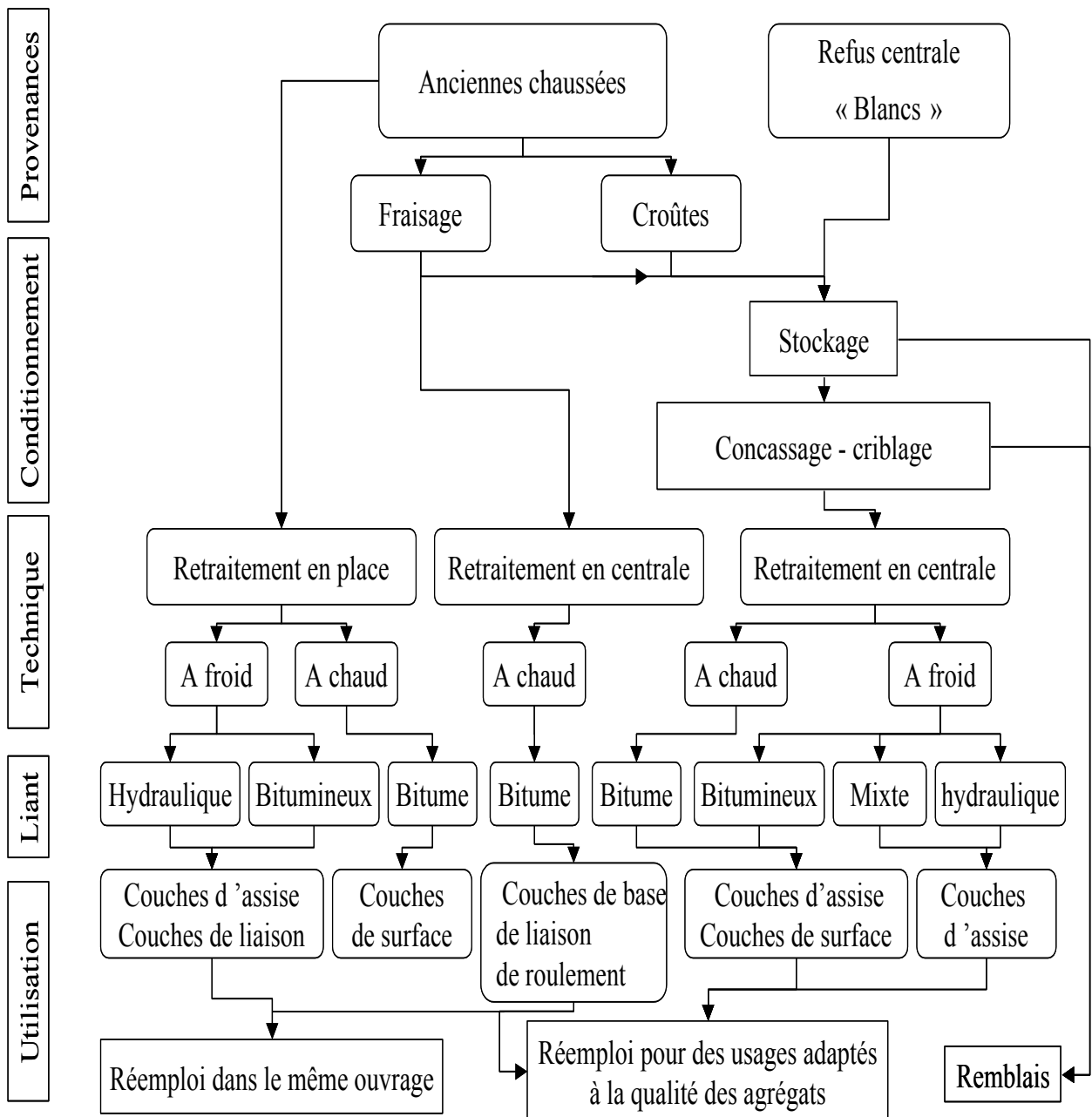


Figure.II.2. Réutilisation des agrégats d'enrobés [14]

II.5. Différents types de centrales d'enrobage

Il existe trois types de centrales d'enrobage [16] :

- ✓ Centrale discontinue avec un tambour de chauffage séparé aussi appelé tambour parallèle;
- ✓ Centrale discontinue sans tambour de chauffage séparé ;
- ✓ Tambour sécheur-enrobeur.

II.5.1. Centrale discontinue sans tambour de chauffage séparé

Dans cette centrale les agrégats d'enrobés peuvent être :

- ✓ Ajoutés directement dans l'unité de pesage aux granulats d'apport surchauffés jusqu'à 275°C.

On peut recycler jusqu'à 20 % d'agrégats d'enrobés selon la teneur en humidité.

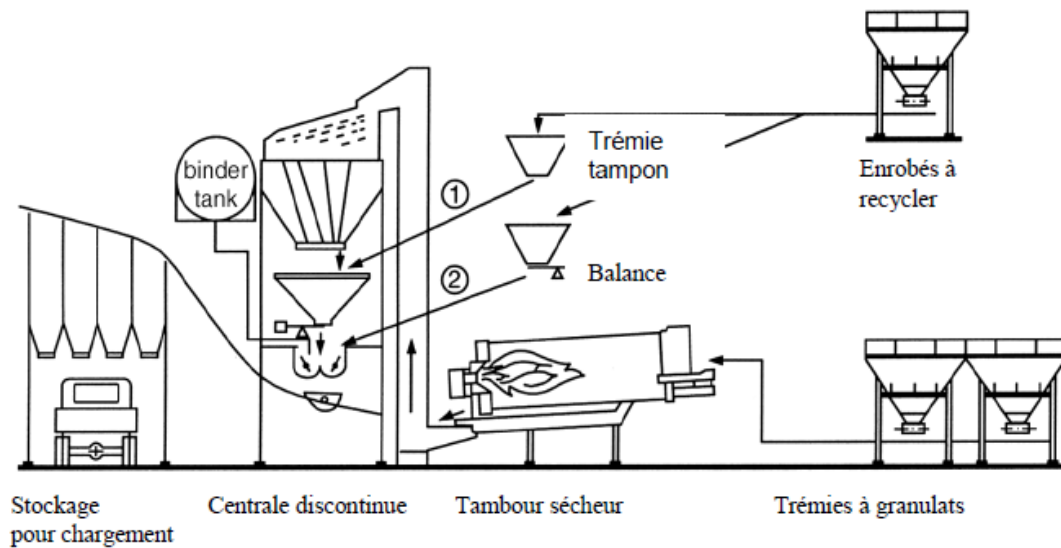


Figure.II.3. Addition discontinue des agrégats d'enrobés froids et les granulats d'apports [16]

- ✓ chauffés en même temps que les granulats d'apports dans un seul tambour de chauffage, muni d'installations spéciales pour les additions figure II.4 en appliquant le système du flux contraire, l'addition de 40 % des agrégats d'enrobés est possible.

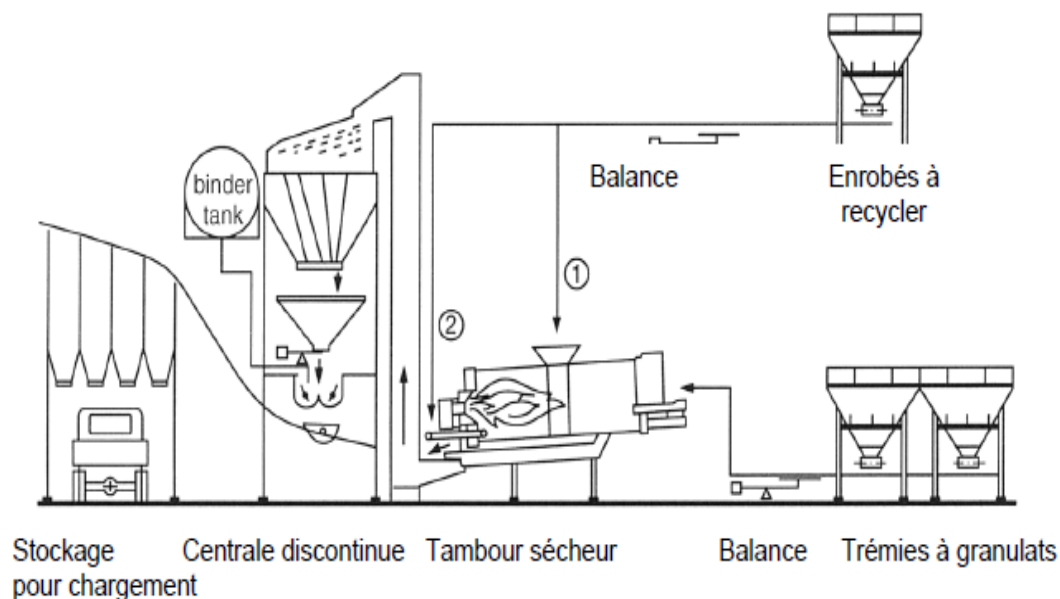


Figure.II.4. *Addition discontinue, réchauffage des agrégats d'enrobés dans le tambour sécheur des granulats d'apports [16]*

II.5.2. Centrale discontinue avec un tambour de chauffage séparé

Le tambour de chauffage additionnel a son propre dispositif de chauffage pour sécher les agrégats d'enrobés et les préchauffer à 130°C. Ensuite, ils sont transportés via l'unité de pesage dans le mélangeur, et ils sont mélangés avec les granulats d'apports légèrement surchauffés, de sorte que la température finale atteindra environ 160° C.

Dans ce type de centrales la quantité maximum des agrégats d'enrobés sec et préchauffés, peut atteindre jusqu'à 50 % ou même 80 %, lorsqu'il peut être garanti que les agrégats d'enrobés ont une origine constante et une qualité très élevée.

Le pré-malaxage des agrégats d'enrobés avec les granulats d'apports ne devrait pas dépasser 10 secondes, afin d'éviter le durcissement du bitume qui est ensuite ajouté. Selon le type de l'installation, la durée totale de malaxage est plus longue et la capacité de production est inférieure à celle de la fabrication des enrobés neufs dans une centrale conventionnelle.

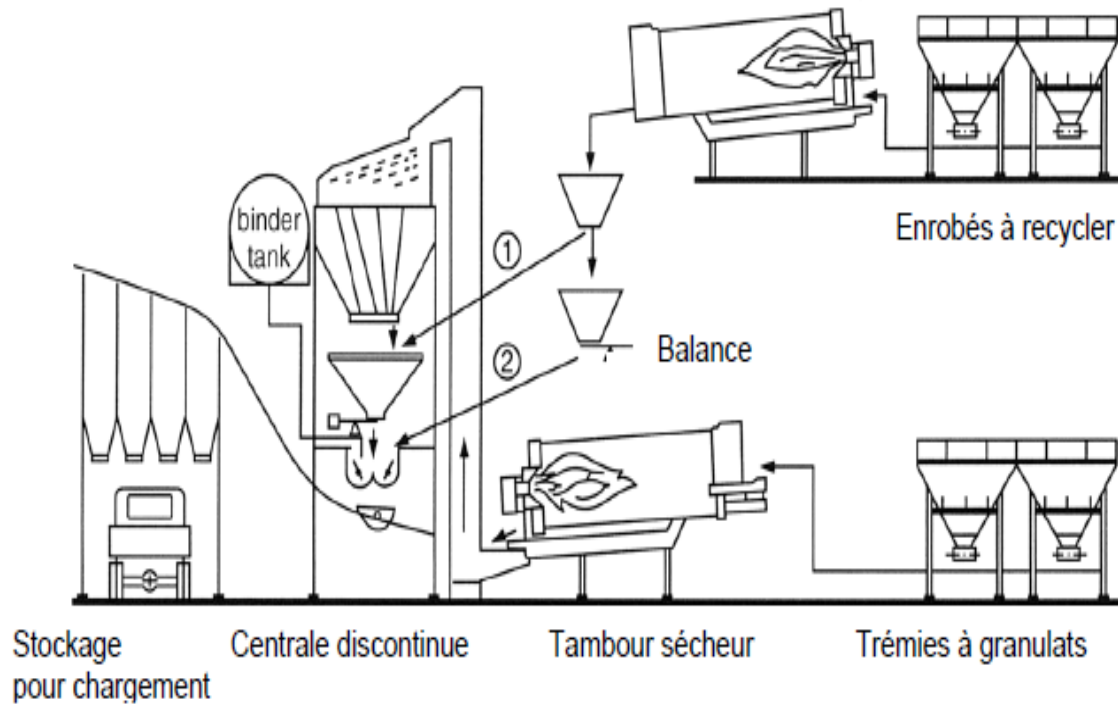


Figure.II.5. Centrale discontinue avec tambour de chauffage séparé [16]

II.6. Composition d'un enrobé contenant des agrégats d'enrobé

Un enrobé bitumineux contenant des agrégats d'enrobé est un mélange entre des matériaux neufs dits d'apport (granulats d'apport - GA - et de liant d'apport - LA -) et des agrégats d'enrobé - AE. Il est normativement défini par le terme enrobé de recyclage - ER - (NF P98-149 2000). Cependant dans le cadre de ce document, nous aurons recours au terme communément utilisé d'enrobé recyclé.

Les agrégats d'enrobé étant initialement des enrobés bitumineux, ils sont composés de granulats d'agrégats d'enrobé - GAE - et de liant d'agrégats d'enrobé - LAE -. L'enrobé recyclé est donc constitué de granulats d'enrobé recyclé - GER - (mélange de GA et de GAE) et de liant d'enrobé recyclé - LER - (mélange de LA et de LAE).

La dénomination des constituants de l'enrobé recyclé est présentée sur la figure. II.6 sur laquelle la part de LER est exagérée permettant d'en représenter la répartition en LA et LAE [7].

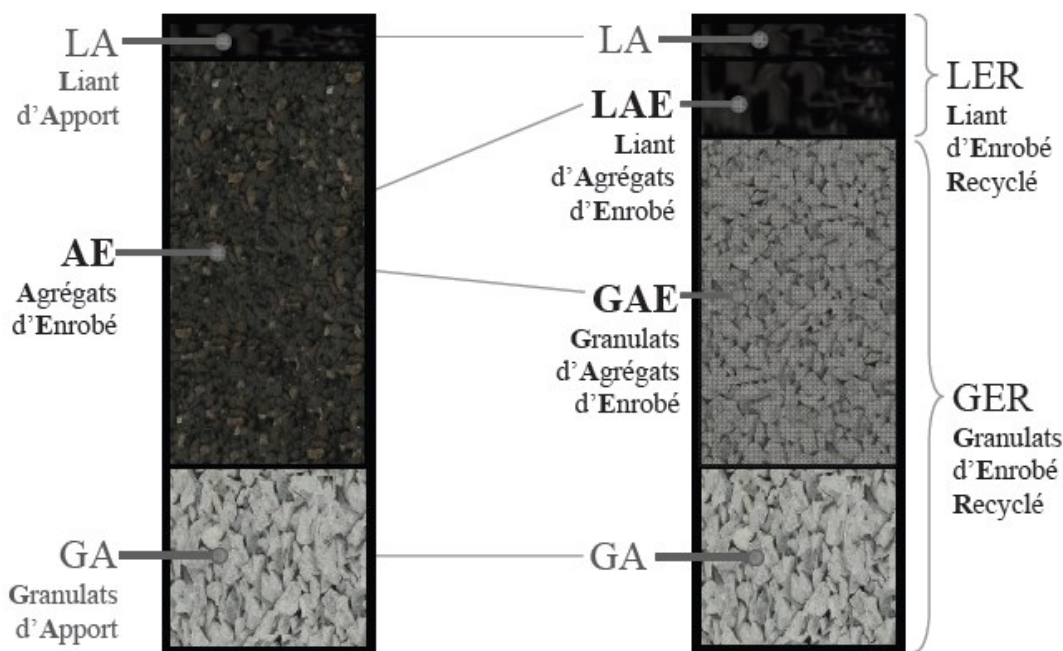


Figure.II.6. Composition d'un enrobé recyclé et répartition de la participation des agrégats d'enrobé au liant et aux granulats de l'enrobé recyclé [7]

II.6.1. Calcul des quantités et détermination des caractéristiques du liant d'apport

L'étude des performances mécaniques des enrobés recyclés implique de déterminer la quantité de liant d'apport nécessaire et d'en identifier les caractéristiques.

II.6.1.1. Caractéristiques du liant d'apport

Pour le choix des caractéristiques du liant d'ajout, il est possible, en première approche, de calculer les caractéristiques théoriques du liant final grâce à la loi des mélanges.

Il existe trois options permettant de calculer la quantité et le type de liant :

- Une approche d'après la pénétration ;
- Une approche d'après la température de Bille et Anneaux ;

Une règle concernant la viscosité (particulièrement pour les bitumes mous utilisés dans les pays froids).

Il s'agit dans tous les cas de prévoir la qualité du liant issu du mélange entre le vieux liant et une certaine quantité d'un nouveau liant particulier. Toutes ces approches ont un arrière-plan empirique et ne sont pas applicables pour des bitumes modifiés par des polymères.

✓ *Approche 1 : calcul de la pénétration du liant d'un mélange*

Cette approche utilise la formule $\text{pen}_{\text{LER}} = a \log \text{pen}_{\text{LAE}} + b \log \text{pen}_{\text{LA}}$

Où : **pen_{LER}** : pénétration calculée du liant dans le mélange contenant des agrégats d'enrobés bitumineux

pen_{LAE} : pénétration du liant récupéré à partir des agrégats d'enrobés bitumineux

pen_{LA} : pénétration du liant d'apport

a et b : part en masse de liant provenant des recyclats (a) et du liant ajouté (b) dans le mélange ($a + b = 1$)

✓ *Approche 2 : calcul de la Température Bille et Anneaux du liant d'un mélange*

Il est nécessaire d'appliquer la formule : $\text{TBA}_{\text{LER}} = a \times \text{TBA}_{\text{LAE}} + b \times \text{TBA}_{\text{LA}}$

Où: **TBA_{LER}**: température de Bille et Anneaux calculé du liant dans le mélange contenant des agrégats d'enrobés bitumineux

TBA_{LAE}: température de Bille et Anneaux du liant récupéré à partir des agrégats d'enrobés bitumineux

TBA_{LA}: température de Bille et Anneaux du liant ajouté

a et b : part en masse de liant provenant des recyclats (a) et du liant ajouté (b) dans le mélange ($a + b = 1$)

✓ *Approche 3 : calcul de la viscosité du liant d'un mélange*

Cette approche utilise la formule : $\log \log \text{Visc}_{\text{LER}} = a \log \log \text{Visc}_{\text{LAE}} + b \log \log \text{Visc}_{\text{LA}}$

Où :

Visc_{LER} : Viscosité du liant dans le nouveau mélange en Ns/m²

Visc_{LAE} : Viscosité du liant provenant des agrégats d'enrobés bitumineux

Visc_{LA} : Viscosité du liant d'apport

a + b = 1

Là où se trouvent de faibles quantités d'agrégats d'enrobés bitumineux dans le mélange, l'influence du liant durci peut être ignorée, et il ne semble pas nécessaire d'appliquer ces règles [11].

II.6.1.2. Indétermination du degré de remobilisation

L'indétermination du degré de remobilisation du liant des agrégats d'enrobé a conduit le National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) à réaliser une étude visant à définir la méthode de prise en compte des agrégats d'enrobé dans le cadre de la méthode de formulation SUPERPAVE. Une partie de cette recherche a été réalisée dans le but d'évaluer le degré de remobilisation du liant des agrégats d'enrobé entre 10% et 40% de recyclage. Les caractéristiques mécaniques considérées sont l'orniérage, la fatigue et le retrait thermique. Les échantillons ont été fabriqués en simulant trois degrés de remobilisation du liant d'agrégats d'enrobé. Chaque degré de remobilisation est représenté par trois méthodes distinctes de fabrication de l'enrobé recyclé.

- ✓ La première méthode simule une remobilisation nulle du liant des agrégats d'enrobés appelée « Black Rock ». Dans cette méthode, des échantillons d'enrobé recyclés sont préparés en mélangeant les granulats d'apport (GA), les granulats d'agrégats d'enrobé (GAE) et le liant d'apport (LA). La suppression du liant qui serait apporté par les agrégats d'enrobé permet de simuler alors une non remobilisation totale du liant d'agrégats d'enrobé (LAE).
- ✓ La seconde méthode simule une remobilisation totale du liant des agrégats d'enrobés appelée « Total Blending ». Dans cette méthode, les granulats d'apports (GA) et les granulats d'agrégats d'enrobé (GAE) sont mélangés avec un liant constitué dans des proportions adéquates de liant d'apport (LAE) et de liant d'agrégats d'enrobés (LAE). Le liant d'agrégats d'enrobé ayant été préalablement extrait des agrégats d'enrobés dont les granulats d'agrégats d'enrobé alors utilisés proviennent.
- ✓ La troisième méthode simule le cas intermédiaire de remobilisation indéterminée appelée « Actual practice ». Dans cette méthode, les granulats d'apport (GA) et le liant d'apport (LA) sont mélangés aux agrégats d'enrobé (AE) sans séparer le liant et les granulats de ces derniers.

L'étude présentée permet de comparer le cas de remobilisation indéterminée avec les cas de remobilisation nulle et totale. Les conclusions de l'étude indiquent que pour un taux de recyclage de 10 %, les trois méthodes présentent des résultats comparables. Alors que pour un taux de 40 % de recyclage, le cas de remobilisation intermédiaire est plus proche de l'hypothèse de remobilisation totale que de celle de remobilisation nulle. L'étude du NCHRP indique donc que le liant des agrégats d'enrobé est remobilisé de manière importante durant la fabrication des enrobés recyclés. Les conclusions de l'étude précisent qu'il ne semble cependant pas raisonnable de supposer que, lors d'une fabrication industrielle, une remobilisation totale doive être considérée. L'indétermination du degré de remobilisation confirme la nécessité des règles de correction du liant d'apport et leur utilisation lors de l'incorporation d'une part importante de liant d'agrégats d'enrobé [12].

II.7. Influence du taux de recyclage sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé final

Le comportement en laboratoire des enrobés recyclés est apprécié à l'aide des essais de laboratoire habituels (essai de compression simple, presse à cisaillement giratoire, essai d'orniérage) et éventuellement de l'essai de traction directe (information sur le comportement à long terme). Les prescriptions à respecter étant celles exigées des enrobés neufs utilisables dans les mêmes conditions.

Cependant, certains matériaux incorporant une fraction plus ou moins importante d'agrégats semblent présenter des niveaux de résistance à la fatigue et à l'orniérage inférieurs à ceux attendus. Ainsi, l'objectif essentiel des recherches du SHRP (Strategic Highway Research Program) a été de fournir des recommandations sur la proportion agrégats d'enrobés bitumineux, et sur le choix du grade du liant d'apport pour obtenir un liant final possédant des propriétés similaires à celles du liant normalement spécifié.

Les résultats de recherches du NCHRP montrent que les agrégats d'enrobés bitumineux n'agissent pas comme un « black rock » dans l'enrobé. Il n'est donc pas possible de le considérer comme un granulats dont la couche de vieux bitume augmente le diamètre. Le vieux liant se combine, dans une certaine mesure, au liant d'apport. Par conséquent, le mélange des deux liants doit être considéré dans le nouvel enrobé car il ne s'agirait pas d'un simple phénomène de double enrobage.

Les effets des agrégats d'enrobés bitumineux sur les propriétés de l'enrobé ne sont significatifs qu'à partir d'un certain pourcentage d'agrégats d'enrobés bitumineux et sont négligeables pour un faible pourcentage. Lorsque le taux d'agrégats d'enrobés bitumineux augmente, il est observé :

- Une augmentation de la rigidité et une diminution des déformations de cisaillement ;
- Une meilleure résistance à l'orniérage ;
- Une augmentation de la température de fissuration à basses températures s'il n'y a pas de modification du grade du liant d'apport (test de traction indirecte) ;
- Une résistance moins bonne à la fatigue s'il n'y a pas de modification du grade du liant d'apport.

Il est donc nécessaire de compenser l'augmentation de la rigidité de l'enrobé (et donc les pertes de performances) en utilisant un liant d'apport approprié (moins dur). De plus, dans la formulation de l'enrobé final, la quantité de liant des agrégats d'enrobés bitumineux doit être prise en compte et la quantité de liant d'apport devra être réduite en conséquence.

Les propriétés des agrégats peuvent limiter le pourcentage des agrégats d'enrobés bitumineux dans l'enrobé : en cas de mauvaise qualité des granulats des agrégats d'enrobés bitumineux (grade, granularité), la rigidité de l'enrobé sera réduite et ses performances en seront altérées.

En général, la plupart des études de laboratoire ont conclu que l'effet des agrégats d'enrobés bitumineux sur les propriétés de l'enrobé sont négligeables lorsque la teneur en agrégats est faible (jusqu'à 15 ou 20%). Un faible pourcentage d'agrégats n'affecte pas significativement la rigidité ou la résistance de l'enrobé final à faible et haute température. Cependant, une augmentation du pourcentage d'agrégats au-delà de 20% augmente la rigidité et la résistance de l'enrobé, ce qui a pour conséquence une augmentation de la résistance à l'orniérage. Si on ne change pas le grade du bitume d'apport, l'augmentation du pourcentage d'agrégats recyclés (>40%) résulte en une augmentation significative de la rigidité de l'enrobé à faible, moyenne et haute températures.

Une étude conduite en centrale d'enrobage avec production d'enrobés contenant plus de 40% d'agrégats d'enrobés recyclés a révélé que les agrégats d'enrobés n'avaient pas autant d'impact que ce qui était attendu, l'enrobé fabriqué n'étant pas significativement plus rigide qu'un enrobé neuf. Les résultats des tests ont suggéré que les recommandations du NCHRP sont restrictives et que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour comprendre pleinement le comportement des agrégats dans l'enrobé. Notons cependant que cette étude n'a été réalisée que dans une centrale, avec une seule source d'agrégats d'enrobés et de granulats vierges.

Selon une récente étude effectuée à l'université du Nevada, l'addition de 15% et 30% d'agrégats d'enrobés peut générer une résistance aux dommages dus à l'humidité acceptable mais en une réduction de la résistance à la traction. De façon générale, l'étude montre qu'un enrobé comportant 15% d'agrégats d'enrobés recyclés avec un liant d'apport pur a des performances de laboratoire similaires à celle d'un enrobé neuf en terme de résistance à l'orniérage, à la fatigue, et à la fissuration thermique. D'autre part, l'addition d'agrégats d'enrobés avec un liant d'apport modifié (bitume modifié par un polymère) résulte en une réduction significative des propriétés de fatigue de l'enrobé. Dans cette même étude, les résultats ont montré que la méthode du diagramme des mélanges est peu fiable dans la plupart des cas étudiés.

Toutes ces études ont permis d'obtenir des indications sur le taux de recyclage à choisir en fonction des caractéristiques mécaniques souhaitées du nouvel enrobé incorporant des agrégats recyclés. L'influence du liant des agrégats y est abordée sous l'angle de l'analyse des propriétés mécaniques des enrobés recyclés. Les conclusions révèlent, de façon expérimentale, que le mélange des deux liants doit être considéré dans le nouvel enrobé et que le liant vieilli de l'agrégat se combine, dans une certaine mesure, au liant neuf d'apport. En outre, la méthode du diagramme des mélanges, qui repose sur l'hypothèse d'homogénéité du mélange entre liant vieilli et liant neuf d'apport, ne permet pas systématiquement de prévoir les caractéristiques mécaniques de ce mélange [12].

II.8. Conclusion

D'après la recherche qu'on a faite sur le recyclage des agrégats d'enrobés, on constate que la qualité de l'enrobé recyclé dépend de plusieurs paramètres qui peuvent être énumérés comme suit :

- La qualité des agrégats d'enrobé et les conditions dans lesquelles ils sont stockés;
- La technique utilisée pour le recyclage;
- Type de centrale utilisée pour la formulation;
- La qualité des granulats et du liant d'apport;
- Le taux du recyclage.

On constate aussi que les agrégats d'enrobé n'agissent pas comme une roche noire «black rock», par contre Le vieux bitume joue le rôle d'un liant dans le nouveau mélange, mais il n'est pas remobilisé en totalité et l'homogénéité du mélange des deux liants n'est pas totale.

Le durcissement du liant des agrégats d'enrobé qui se traduit par l'augmentation du pourcentage des *asphaltènes* et la diminution du pourcentage des *malthènes* subit lors du vieillissement du liant des AE au cours du temps diminue considérablement la résistance à la fatigue avec des taux de recyclage très importants. Pour remédier à ce problème, les normes préconisent l'ajustement du liant d'apport (liants avec un indice de pénétrabilité plus élevé ou un liant régénérant riche en *malthènes*).

En Algérie les liants régénérant et les liants mous ne sont pas disponibles, nous proposons dans le cadre de nos travaux d'introduire la poudrette de caoutchouc qui selon les résultats antérieurs (chapitre III) a la faculté de donner une plus grande souplesse aux enrobés tout en améliorant leur résistance à la fatigue à basse température.

CHAPITRE.III. *Poudrette de caoutchouc*

III.1.Introduction

Les déchets de caoutchouc représentent un gisement valorisable important tant en volume qu'en Poids. Le gisement provient de 2 origines :

- ✓ Pneumatiques usagés
- ✓ Les autres sources sont industrielles
 - Déchets de caoutchouc industriel (fabrication de chaussures, tuyaux, revêtements de sols,...) ;
 - Déchets de fabrication de pneus ;
 - Déchets de rechapage des pneus.

Actuellement, 25% du gisement du caoutchouc et des pneumatiques sont valorisés bien qu'il existe de nombreux modes de traitement [17].

III.2.Fabrication de la poudrette de caoutchouc

Les pneus sont broyés mécaniquement. Les granulés qui en résultent sont utilisés dans la fabrication de revêtements de sols industriels et sportifs, d'écrans antibruit, etc...

Le procédé de vulcanisation du caoutchouc normal le rend plus dur et résistant, le problème en ce matériel est lié à sa difficile dégradation.

L'installation de pulvérisation doit être équipée de manière à pouvoir délivrer des produits présentant la qualité requise. La séparation magnétique des métaux et la séparation sous jet d'air des composants textiles figurent parmi les processus appliqués. Les granulats ou la poudre ainsi que les déchets d'acier devront être valorisés, tandis que les textiles seront incinérés dans une installation appropriée. Les dégagements de poussières seront limités par l'installation de filtres. Il y a lieu de respecter les dispositions de l'ordonnance sur la protection de l'air et de l'ordonnance sur la protection contre le bruit .Il faut également tenir compte des conditions posées par l'autorité compétente pour la prévention des incendies et des explosions [17].

III.3.L'utilisation de la poudrette de caoutchouc dans les enrobés bitumineux

Le caoutchouc employé dans la plupart du temps comme additif provient en général de déchets industriels et des pneumatiques usagés réduits sous forme de poudrettes. Introduit dans le bitume ou le mélange bitumineux chauds, il réagit et gonfle par absorption de fractions aromatiques du bitume.

Toutefois, la vulcanisation (traitement par du soufre ayant pour but l'amélioration des caractéristiques mécaniques du caoutchouc qui reste élastique à froid comme à chaud) fait que la poudrette de caoutchouc issu de pneus usagés ne se dissout pas bien dans le bitume chaud; ce qui donne des mélanges instables [8].

III.3.1. Les avantages

L'introduction de caoutchouc dans des bitumes permet d'améliorer les propriétés des enrobés, de donner une plus grande souplesse aux revêtements réalisés, d'améliorer leur résistance à la fatigue aux basses températures, et de diminuer les phénomènes de bruit et de réflexions de sources lumineuses. L'utilisation de caoutchouc de récupération à cet effet permet de plus, de contribuer à l'élimination de pneus usés d'origines diverses [18].

III.3.2. Les procédés d'utilisation

Les poudrettes de caoutchouc peuvent être utilisées soit comme poudres ajoutées au mélange granulaire, on parle alors d'incorporation par voie «sèche», soit incorporées à chaud directement dans le liant on parle alors d'incorporation par voie «humide». Toutefois, l'une des contraintes auxquelles on doit faire face en Algérie est l'absence d'unités de fabrication des liants modifiés. Il est donc nécessaire de développer des enrobés fabriqués par le procédé sec [18].

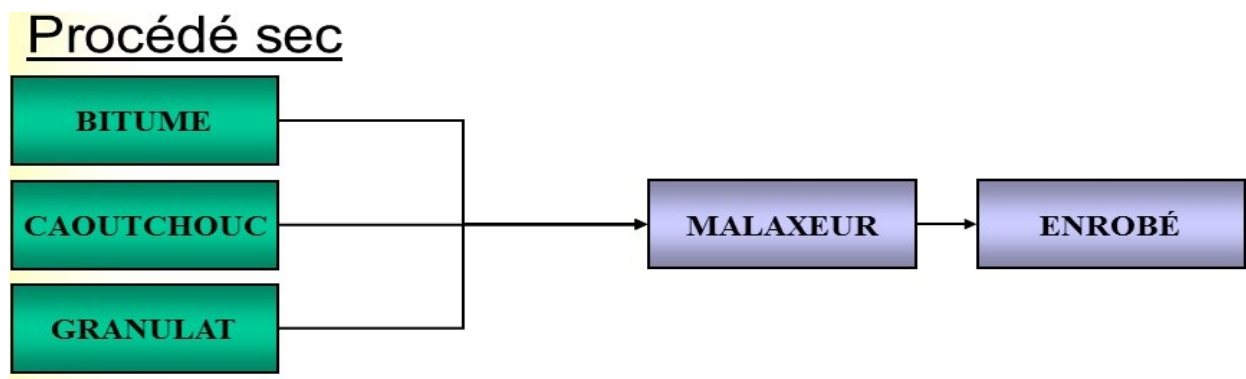


Figure.III.1. Procédé sec [19]

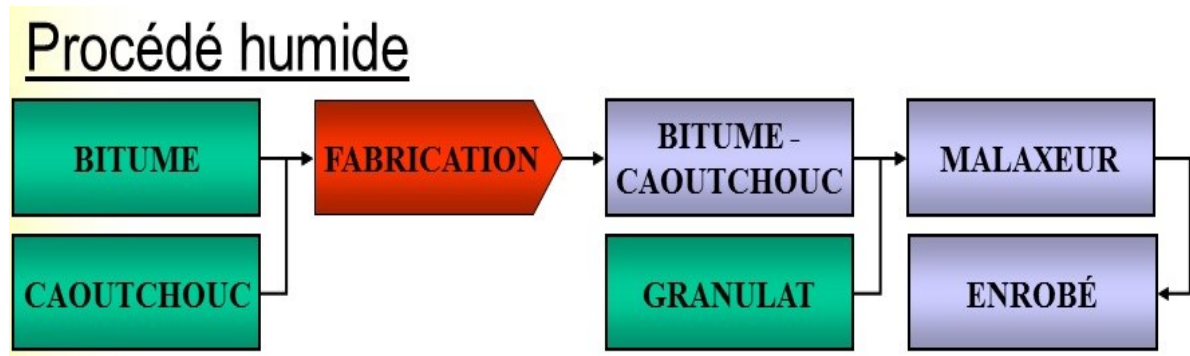


Figure.III.2. Procédé humide [19]

III.3.3. Incorporation de la poudrette de caoutchouc par voie sèche

Pour la mise en œuvre de ce type de procédé, on considérait d'abord nécessaire d'utiliser des granules ayant une granulométrie comprise entre 1 et 3 ou 2 et 4 mm, c'est-à-dire des granules de caoutchouc ayant une granulométrie comparable à celle des gravillons.

On produisait alors un revêtement routier qui, au moins par endroits, présentait une épaisseur de caoutchouc de plusieurs millimètres entre deux granulats ou gravillons traditionnels.

Le caoutchouc ayant un module d'élasticité extrêmement faible, une telle épaisseur de caoutchouc entre deux granulats traditionnels qui sont des matériaux durs, conduit à des déformations très importantes du revêtement lorsqu'il est soumis à une contrainte locale élevée telle que celle produite par le passage d'un camion et donc à une déformation importante du revêtement qui conduit rapidement à la détérioration de celle-ci. Pour remédier à ce problème, une partie de la fraction sableuse qui accompagne traditionnellement les gravillons a été remplacée, par de la poudre de caoutchouc dont les particules ont un diamètre moyen compris entre 0 et 1,5 mm.

Cette dernière technique a donné globalement satisfaction. Toutefois, on cherche à améliorer encore la résistance de la chaussée, par exemple pour des applications en zones de stationnement où les manœuvres sont fréquentes et les braquages très courts.

L'enrobé bitumineux doit par ailleurs permettre d'obtenir un revêtement routier ayant une bonne drainabilité superficielle à l'eau, et de bonnes propriétés sonores.

Plusieurs études ont été faites dans ce procédé on trouve parmi eux l'étude qui a été faite par Colas S.A, sur un BBSG 0/10 avec un bitume de grade 60/70 destiné à être utilisé dans la couche de roulement avec ajout de 1% et 2% de poudrette de caoutchouc issu de broyage des pneus. Cette étude a révélé que pour avoir des bons résultats la taille des particules de la poudrette de caoutchouc doit être $\leq 1,5$ mm dont au moins 90 % des particules sont < 1 mm c'est-à-dire le taux de

refus des particules de caoutchouc au tamis de 1 mm doit être inférieur à 10 % de la masse sèche de l'échantillon et que le pourcentage de caoutchouc dans le mélange granulaire est compris entre 0,5 et 1 % [18].

Les résultats obtenus par cette étude sont illustrées dans le tableau suivant :

Tableau.III.1. Tenue à l'eau (granulats + poudrette des pneus) [18]

Essais DURIEZ	Enrobé (1% de poudrette)	Enrobé (2% poudrette)
<i>Densité hydrostatique (g/cm³)</i>	2,263	2,044
<i>Compacité (%)</i>	94,5	86,2
<i>R (MPa)</i>	9,2	5,9
<i>r(MPa)</i>	8,9	4,9
<i>Coefficient réduction r/R</i>	0,97	0,84
<i>Eau Absorbée (%)</i>	1,5	3,8

On cite aussi une autre étude qui a été faite ici en Algérie sur deux enrobés BBSG 0/14 de granulats d'origine différente avec un bitume de grade 35/50 et on a fait varier le pourcentage de la poudrette de caoutchouc issue de semelles de chaussures 0/1 mm de 1% à 4% avec un pas de 1%, on a obtenu les résultats illustrés dans les deux tableaux suivants [20] :

Tableau.III.2. Résultats Marshall et tenue à l'eau : Granulats basaltiques + poudrette semelles de chaussures [20]

Teneur en poudrette (%)	0	1	2	3	4
<i>Compacité (%)</i>	95,67	97,24	97,28	93,46	91,26
<i>Fluage Marshall (mm)</i>	5,35	4,327	3,850	4,825	5,675
<i>Stabilité MARSHALL (KN)</i>	9,00	9,62	9,92	9,31	8,16
<i>Tenue à l'eau r/R</i>	0,77	0,77	0,86	0,95	0,96

Tableau.III.3. Résultats Marshall et tenue à l'eau : Granulats calcaires + poudrette de semelles de chaussures [20]

<i>Teneur en poudrette (%)</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Compacité (%)</i>	92,83	96,65	95,83	95,45	93,16
<i>Fluage MARSHALL (mm)</i>	4,32	3,62	3,76	4,06	5,52
<i>Stabilité MARSHALL (KN)</i>	10,34	10,77	10,54	10,05	6,19
<i>Tenue à l'eau r/R</i>	0,84	0,86	0,9	0,98	0,99

Ce qui nous donne les courbes suivantes :

Avec

Enrobé1= BBSG 0/10 + poudrette des pneus

Enrobé2= BBSG 0/14 avec granulats basaltiques + poudrette des semelles de chaussures

Enrobé3= BBSG 0/14 avec granulats calcaires + poudrette des semelles de chaussures

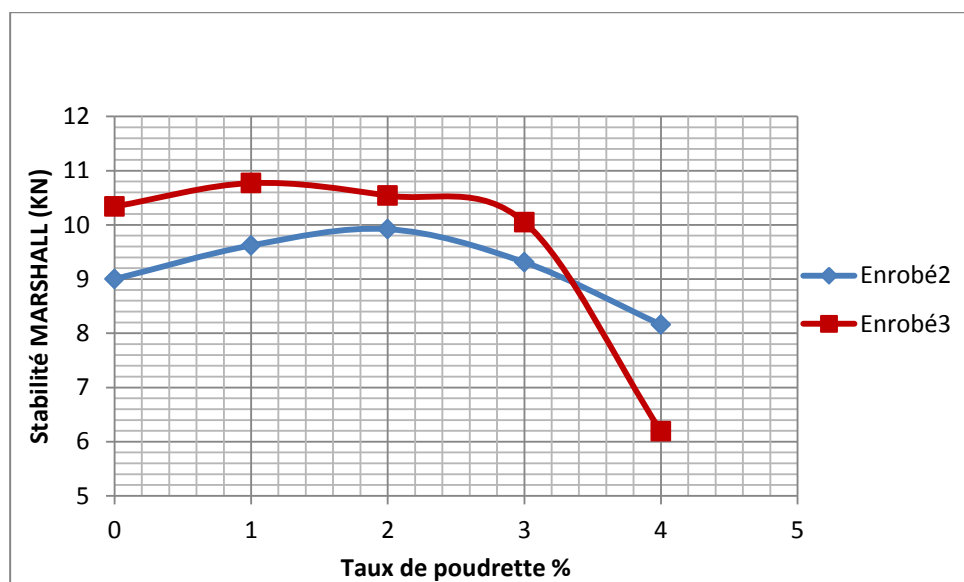


Figure.III.3. Influence de taux de poudrette sur la stabilité MARSHALL [20]

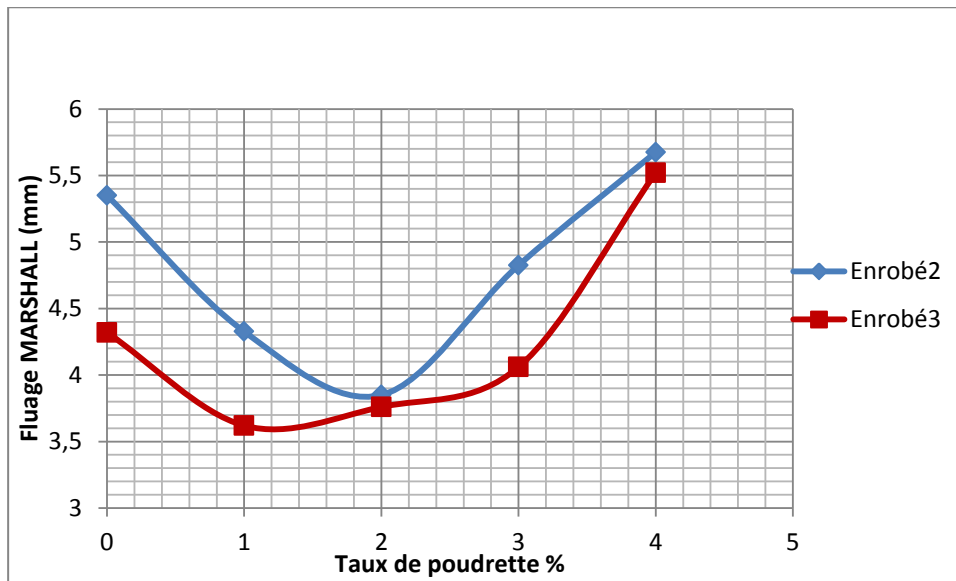


Figure.III.4. Influence de taux de poudrette sur le fluage MARSHALL [20]

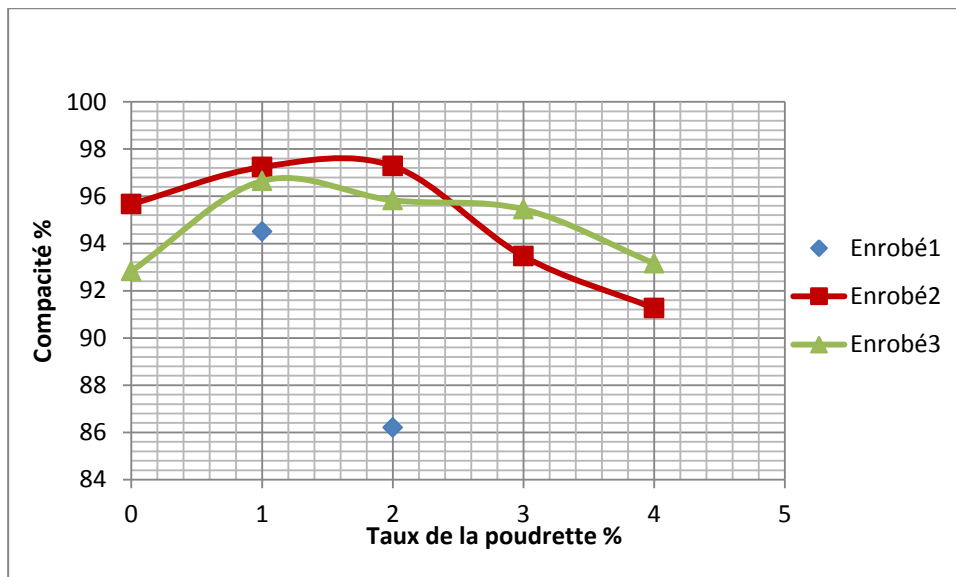


Figure.III.5. Influence de taux de poudrette sur la compacité [20]

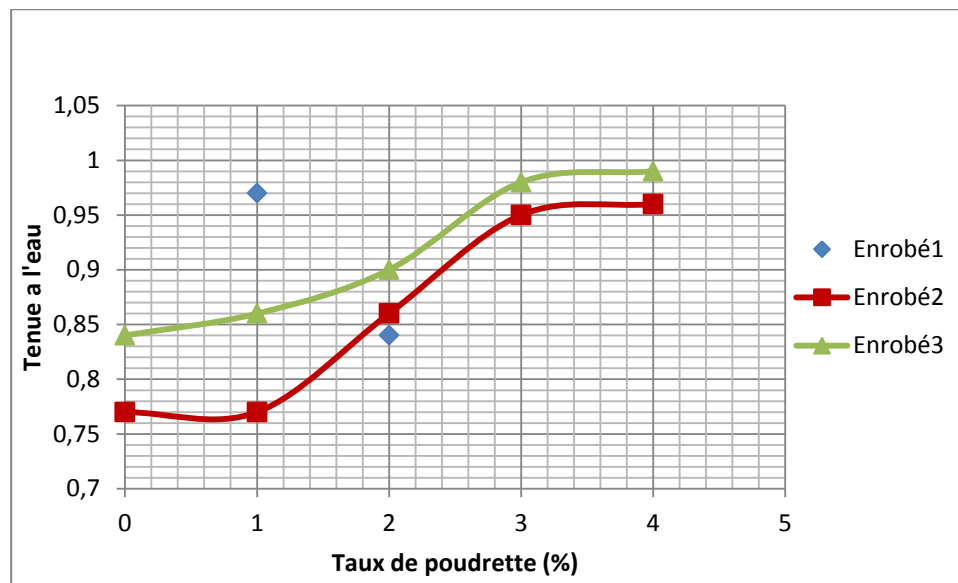


Figure.III.6. Influence de taux de poudrette sur la tenue à l'eau [20]

III.4. Conclusion

L'utilisation de caoutchouc de récupération permet de contribuer à l'élimination des déchets de caoutchouc industriel et de pneus usés.

Quant à l'effet de l'incorporation la poudrette sur les mélanges bitumineux, il apparait que la poudrette issue de broyage de semelles de chaussures augmente les performances mécaniques de l'enrobé tandis que la poudrette issue de broyage des pneus diminue la tenue à l'eau et la compacité.

Ces deux poudrettes sont utilisées dans notre étude expérimentale.

CHAPITRE.IV. *Étude expérimentale*

IV.1. Problématique et méthodologie

Cette partie expérimentale est destinée à mettre en application les connaissances acquises dans la partie bibliographique à savoir, établir une formulation d'un Enrobé standard, puis celle d'un enrobé recyclé et en fin analyser l'influence de la poudrette de caoutchouc sur les performances de l'enrobé recyclé.

En effet, le but du recyclage est d'obtenir un mélange bitumineux présentant les mêmes performances que l'enrobé de base c.à.d. sans agrégats d'enrobé. Vue la non disponibilité du liant approprié pour cette étude nous avons introduit des ajouts issus de broyage de la poudrette de caoutchouc.

La partie expérimentale comporte deux volets principaux:

- ✓ formulation d'un Béton Bitumineux Semi Grenu (BBSG 0/14),
- ✓ formulation d'un Béton Bitumineux recyclé contenant 50 % d'Agrégats d'Enrobés (AE) modifié à la poudrette de caoutchouc à divers taux, de deux natures différentes.

Cette partie a été réalisée au sein du laboratoire du Contrôle Technique de Travaux Publics (CTTP), elle comporte :

1. Identification des matériaux ;
 - Les granulats d'apport ;
 - Le bitume d'apport ;
 - Les agrégats d'enrobé (liant vieilli et granulats) ;
 - L'additif poudrette de caoutchouc (issue de broyages des semelles de chaussures et des pneus).
2. Formulation d'un enrobé bitumineux semi grenu BBSG 0/14 (méthode MARSHALL) (voir l'organigramme dans la figure IV.1).
3. Formulation de l'enrobé BBSG 0/14 recyclé à 50% d'AE
4. Introduction des poudrettes de caoutchouc à différents taux : 1%, 2%, 3%.
5. Essais de performances Marshall : Stabilité, Fluage, Compacité, Quotient, Tenue à l'eau
6. Analyse de l'influence de l'ajout sur les performances du BBSG 0/14 recyclé à 50% et modifié à la poudrette de caoutchouc : formulation optimale.

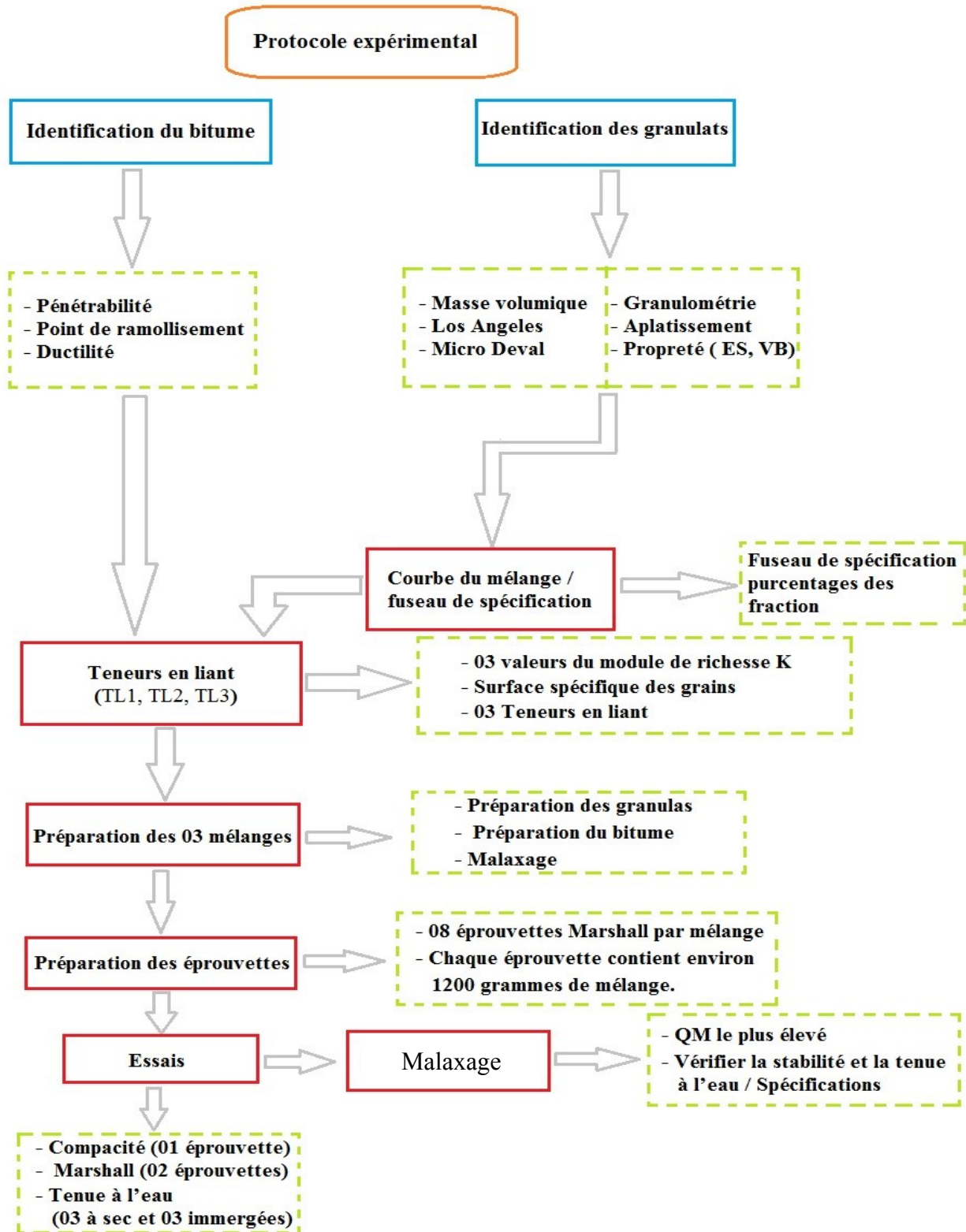


Figure.IV.1. schéma présentant la démarche expérimentale

IV.2. Identification des matériaux

La qualité des matériaux utilisés dans les formulations influent grandement sur le comportement mécanique des enrobés. Les principaux éléments ayant la plus grande influence sur la résistance mécanique sont :

- ✓ Les caractéristiques intrinsèques et de fabrication des granulats d'apport ;
- ✓ La teneur et le type de liant d'apport ;
- ✓ La qualité des fraisats.

Tous ces éléments doivent être analysés par le concepteur afin de proposer un mélange correspondant aux caractéristiques optimales en termes de résistance mécanique et de susceptibilité thermique pour le bitume.

Dans nos expériences, nous avons utilisé les matériaux suivants :

IV.2.1. Les Granulats d'apports

Le squelette granulaire d'un mélange bitumineux est composé de plusieurs fractions ou classes granulaires homogènes. La composition granulométrique est obtenue à partir de différents constituants qui entrent dans notre cas dans le fuseau de spécification d'un BBSG0/14.

IV.2.1.1. Origine des granulats

Les granulats utilisés dans le cadre de la présente étude sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des bétons bitumineux destinés aux couches de roulement.

Les matériaux ont été acheminés au laboratoire par les techniciens de COSIDER. Les trois fractions utilisées sont données dans le tableau IV.1, ainsi que leurs origines.

Tableau.IV.1. Origine des granulats utilisés.

<i>Matériaux</i>	<i>Carrières</i>	<i>Entreprise d'exploitation</i>
<i>Sable 0/3</i>	<i>BOUZEGZA</i>	<i>COSIDER</i>
<i>Gravillon 3/8</i>	<i>BOUZEGZA</i>	<i>COSIDER</i>
<i>Gravier 8/15</i>	<i>BOUZEGZA</i>	<i>COSIDER</i>

Les échantillons des différentes fractions sont représentés dans la figure IV.2



Figure.IV.2. Les différentes fractions de granulats

IV.2.1.2. Caractéristiques des granulats

IV.2.1.2.1. Caractéristiques intrinsèques des granulats

Afin de déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, les essais suivants ont été réalisés :

- ✓ La masse volumique réelle (NA 255). (figure IV.3).
- ✓ La résistance à l'usure en présence d'eau : Essai micro-Deval (NA 5129) (Figure IV.4 – Figure IV.5).
- ✓ La résistance aux chocs : Essai LOS ANGELES (NA 5130) (Figure.IV.6)

✓ La masse volumique réelle (NA 255)

Cet essai vise à déterminer la masse et le volume de la prise d'essai et à calculer sa masse volumique réelle (rapport masse/volume). La masse est calculée en pesant l'échantillon après l'avoir séché à l'étuve. Le volume est déterminé à partir du poids du volume d'eau déplacé par les particules sèches dans un pycnomètre de volume connu.



Figure.IV.3. Essai de la masse volumique

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.2 :

Tableau.IV.2. Masse volumique réelle de différentes fractions granulaires

<i>fraction</i>	<i>masse volumique réelle (t/m³)</i>
0/3	2,66
3/8	2,69
8/15	2,70

✓ **L'essai d'usure micro-Deval en présence d'eau selon la norme (NA 5129)**

Cet essai permet de mesurer la résistance à l'usure par frottement réciproque des éléments des granulats dans un cylindre en rotation.



Figure.IV.4. Jarre micro Deval



Figure.IV.5. Machine micro Deval

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau IV.3 :

Tableau.IV.3. Résultats d'essai micro-Deval

<i>Fraction</i>	<i>Classe référentielle</i>	<i>micro-Deval en présence d'eau (%)</i>
<i>3/8</i>	<i>4-6,3</i>	<i>6,28</i>
<i>8/15</i>	<i>10-14</i>	<i>10,66</i>

Les critères de qualité pour l'attrition, sont représentés dans le tableau IV.4 :

Tableau.IV.4. Critères de qualité pour l'attrition

Micro-Deval (MDE)	Qualité
MDE < 13	Très bon
13 < MDE < 20	Bon à Moyen
20 < MDE < 25	Moyen à faible
MDE > 25	Médiocre

Commentaire : Les résultats de l'essai de MDE ont montré que la qualité pour l'attrition des fractions 3/8 et 8/15 est très bonne.

✓ **L'essai LOS ANGELES selon la norme NA 5130**

Cet essai permet d'estimer l'évolution de la granularité due à la fragmentation des éléments des granulats sous le choc des boulets métalliques dans la machine LOS ANGELES.

**Figure.IV.6. Machine LOS ANGELES**

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.5

Tableau.IV.5. Essai LOS ANGELES

<i>fraction</i>	<i>classe référentielle</i>	<i>Los Angeles</i>
3/8	4-6,3	22
8/15	10-14	27

En technique routière, les critères de qualité pour la dureté, sont représentés dans le tableau IV.6

Tableau.IV.6. Critères de qualité pour la dureté

Los Angeles (LA)	Qualité
$LA < 15$	Très bon
$15 < LA < 20$	Bon à moyen
$20 < LA < 30$	Moyen à faible
$LA > 30$	Médiocre

Commentaires : Les résultats de l'essai de LA ont montré que la qualité pour la dureté des fractions 3/8 et 8/15 est de « moyen à faible » selon le tableau IV.6.

IV.2.1.2.2. Caractéristiques de fabrications des granulats

Pour ce qui est des caractéristiques de fabrication des granulats, les essais suivants ont été réalisés :

- ✓ Analyse granulométrique (NA 2607) (Figure.IV.7) (Figure.IV.8) ;
- ✓ Essai d'aplatissement (NA 256 / 1990) (Figure.IV.9) ;
- ✓ Equivalent de sable (NF EN 933-8) (Figure.IV.10) ;
- ✓ Essai au bleu de méthylène (NA 1948) (figure.IV.11).

✓ Analyse granulométrique (NA 2607)

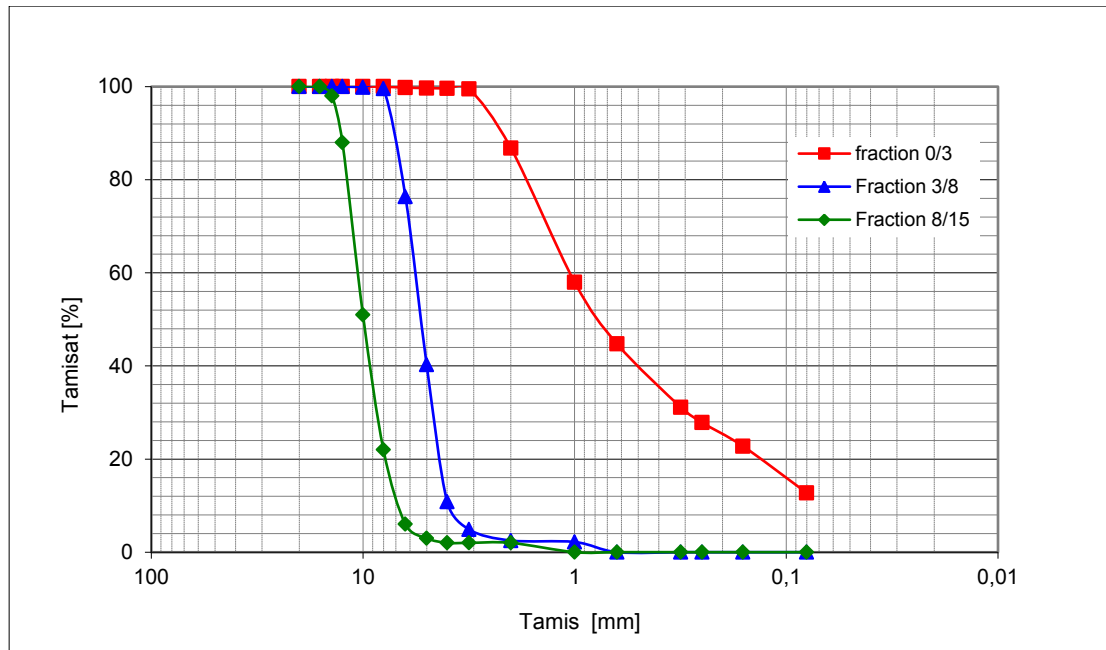
L'analyse granulométrique a pour objet de déterminer la distribution dimensionnelle des grains elle s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle y compris aux granulats légers allant jusqu'à la dimension 63 mm à l'exclusion des fillers.

Elle est effectuée à l'aide d'une série de tamis (Figure IV.7).



Figure.IV.7. Série de tamis (0,08-16mm)

Ce qui nous permet de tracer les courbes de chaque fraction granulaire comme indiqué sur le graphe IV.8



Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau IV.7:

Tableau.IV.7. Coefficient d'aplatissement des granulats

<i>Fraction</i>	<i>Classe référentielle</i>	<i>Coefficient d'aplatissement A (%)</i>	Specification (%)
3/8	4-6,3	13,4	<25
8/15	10-14	7,5	

Commentaire : on remarque que le pourcentage en éléments plats est < 25%

✓ **Equivalent de sable (NF EN 933-8)**

L'essai consiste à déterminer le pourcentage des particules fines dans les éléments sableux.

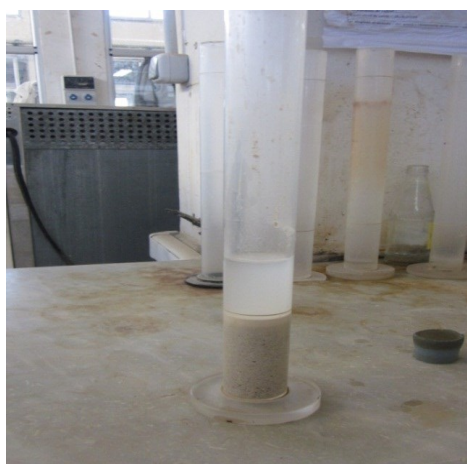


Figure.IV.10. L'essai d'équivalent de sable

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant

Tableau.IV.8. Résultats de l'essai d'équivalent de sable

<i>Classe granulaire</i>	0/2
<i>L'équivalent de sable (%)</i>	82

Commentaire : Le sable utilisé est un sable propre.

✓ **Essai de bleu de méthylène**

L'essai est réalisé selon la norme NA 1948, la figure suivante nous présente l'appareil de l'essai de bleu de méthylène :



Figure.IV.11. Appareil de l'essai de bleu de méthylène

Les résultats obtenus dans cet essai sont présentés dans le tableau suivant

Tableau.IV.9. Valeur au bleu de méthylène

<i>Echantillon</i>	<i>fraction 0/2 mm</i>
<i>Valeur au bleu de méthylène</i>	<i>0,67</i>

Commentaire : Le sable utilisé contient une faible quantité d'argile.

IV.2.1.3. Récapitulatif des caractéristiques des granulats

Tableau.IV.10. Caractéristiques intrinsèques des granulats.

Essais	0/3	3/8	8/15	Spécifications
Masse volumique réelle [t/m³]	2,66	2,69	2,70	>2,6
LA [%]	-	22,30	27,56	≤30
MDE [%]	-	6,28	10,66	≤25
LA+MDE [%]	-	28,58	38,22	≤ 45

Commentaire : Les résultats obtenus permettent de classer les gravillons (3/8) en **catégorie B** et les graviers (8/15) en **catégorie C**.

Tableau.IV.11. Caractéristiques de fabrication des granulats

Essais	Résultats			Spécifications	
	0/3	3/8	8/15		
Coefficient d'aplatissement [%]	-	13,4	7,5	≤ 25	bon
Equivalent de sable à 10% de fines [%]	82	-	-	≥ 60	Sable propre
Valeur au bleu de méthylène	0,67	-	-	< 2	bon

Commentaire : Les résultats obtenus permettent de classer le sable (0/3) en **catégorie A**.

IV.2.1.4. Conclusion

Les résultats obtenus d'après les différents essais réalisés sur les granulats ont montré que :

- ✓ La qualité pour l'attrition des fractions 3/8 et 8/15 est très bonne.
- ✓ La qualité pour la dureté des fractions 3/8 et 8/15 est de moyenne à faible.
- ✓ Le pourcentage en éléments plats est bon
- ✓ Le sable utilisé est un sable propre non argileux.

Ce qui permet de classer le sable en catégorie A, les gravillons en catégorie B, les graviers en catégorie C.

Ces granulats peuvent être utilisés dans la formulation de BBSG 0/14, avec ajout de fillers de l'ordre de 6% par rapport au poids de sable.

IV.2.2. Le Bitume

Le bitume utilisé dans notre étude provient de la centrale d'enrobage de l'EPTP à Réghaia. Il s'agit d'un bitume pur de grade 40/50 et de densité 1,02

Les analyses que nous avons effectuées sur ce bitume sont :

- ✓ Pénétrabilité à l'aiguille à 25°C (NA 5192) (*figure.IV.12– Figure.IV.13*) ;
- ✓ Point de ramollissement billes et anneaux (NA 2617) (*figure.IV.14 – Figure.VI.15*) ;
- ✓ Ductilité (NA 5223) (*figure.IV.16*).

Les figures suivantes montrent les dispositifs nécessaires pour l'essai de pénétrabilité à l'aiguille:



Figure.IV.12. Pénétromètre



Figure.IV.13. Les tares de bitumes

Les figures suivantes montrent le dispositif nécessaire pour l'essai de point de ramollissement billes et anneaux :



Figure.IV.14. Appareil de l'essai Bille-Anneau

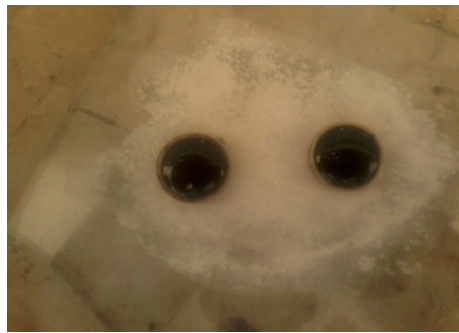


Figure.IV.15. Les anneaux de bitume

La figure IV.16 présente l'appareil d'essai de ductilité :



Figure.IV.16. Essai de ductilité

Les résultats des essais d'indentification de bitume sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.12. Résultats d'identification du bitume

Type d'essai	Résultat	Moyenne	Spécifications
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	40-43	41,5	40-50
Température bille et anneau « TBA » (°C)	52-52	52	50-58
Ductilité (cm)	>100	-	>100

Commentaire : Le bitume présent répond aux caractéristiques du bitume 40/50 selon la Norme NF T65-001.

IV.2.3. Les Agrégats d'Enrobés ou Fraisats

Les fraisats qui sont utilisés dans l'expérimentation nous ont été fournis par l'entreprise de réalisation Entreprise publique de travaux publique (EPTP), indiquant une formulation d'un BBSG 0/14 avec Bitume 40/50.



Figure.IV.17. Echantillon du fraisât

IV.2.3.1. Étude granulométrique des fraisâts avant extraction du liant

Après récupération des fraisats qui doivent être légèrement humides pour éviter la perte d'éléments fins selon la norme (P18-553) (voir l'annexe 1), on a utilisé le quartage pour homogénéiser l'échantillon du fraisat.

La courbe granulométrique du mélange d'agrégats d'enrobés avant désenrobage est donnée dans le graphe suivant :

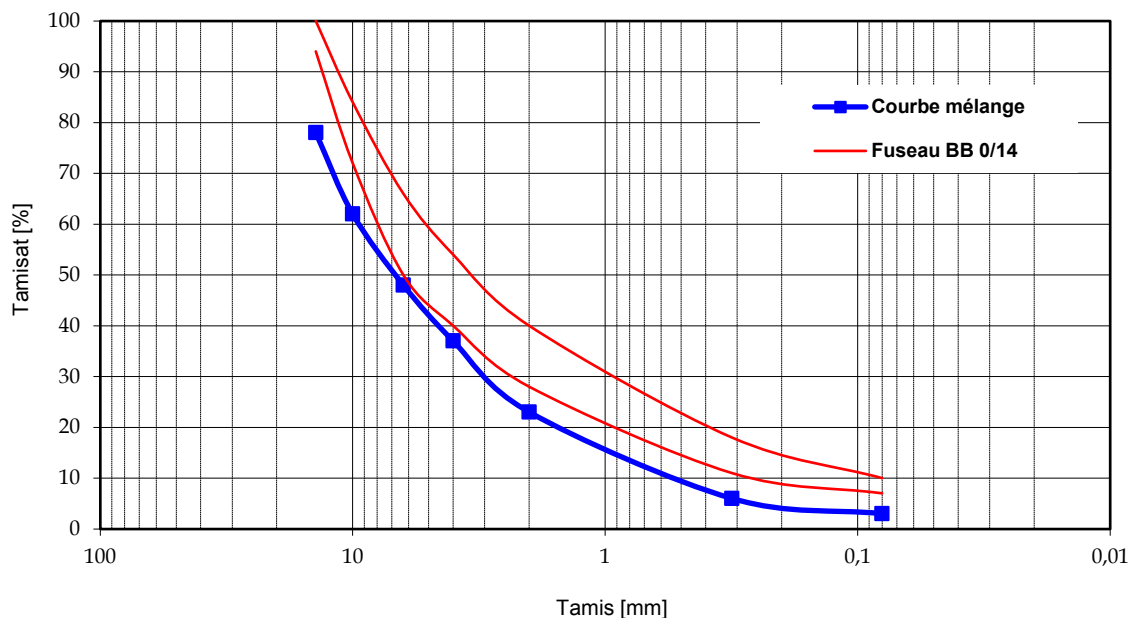


Figure.IV.18. Courbe granulométrique des fraisats avant extraction du bitume

Commentaire : on remarque la courbe granulométrique des fraisats avant extraction du bitume se situe en dessous du fuseau de spécification du BBSG 0/14.

Le tableau suivant compare les résultats obtenus avec ceux de spécifications mentionnés dans le paragraphe II.3.2.

Tableau.IV.13. Spécifications et résultats des fraisats avant extraction du liant

Spécifications	Résultats obtenus
Une granularité de 0/20 à 0/31 mm	Granularité 0/20 ($D = 26$ mm)
Un refus à 25mm inférieur à 7%	Refus à 25 mm = 2 %

Commentaire : Ces résultats permettent d'utiliser les AE sans conditionnement.

IV.2.3.2. Étude granulométrique du fraisats après extraction du liant

L'extraction du liant a été faite par la méthode de KUMAGAWA en utilisant un diluant industriel comme solvant

La courbe granulométrique du mélange après extraction du liant est donnée dans la figure IV.19

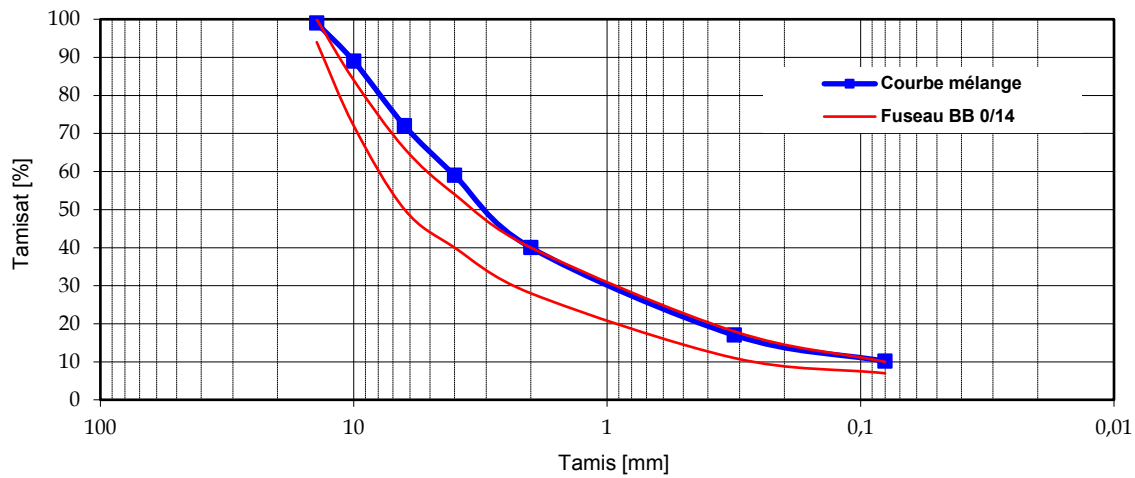


Figure.IV.19. Courbe granulométrique des fraisats après extraction de bitume

Commentaire : on remarque la courbe granulométrique des fraisats après extraction du bitume se situe au-dessus du fuseau de spécification du BBSG 0/14.

Les résultats obtenus après l'extraction sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.14. Spécifications et résultats des fraisats après extraction du liant

<i>Spécifications</i>	<i>résultats obtenus</i>
<i>granularité entre 0/10 et 0/14</i>	<i>granularité 0/14</i>
<i>pourcentage des fines entre 8 % et 12 %</i>	<i>pourcentage des fines = 10,48%</i>

Commentaire : Le pourcentage des fines après extraction est bon.



Figure.IV.20. Fraisât après désenrobage

IV.2.3.3. Détermination de la teneur en liant

La teneur en liant est obtenue par l'essai du KUMAGAWA, cet essai est effectué sur un échantillon de fraisats avec un solvant par une procédure de distillation

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant

Tableau.IV.15. Caractéristiques de liant après désenrobage

<i>Essai</i>	<i>fraisats</i>
<i>Teneur en liant (%)</i>	<i>4,52</i>
<i>surface spécifique (m²/kg)</i>	<i>17,67</i>
<i>Module de richesse K</i>	<i>2,55</i>
<i>Pourcentage des fins < 80µm (%)</i>	<i>10,48</i>



Figure.IV.21. Appareil KUMAGAWA

IV.2.3.4. Essais de caractérisation du liant (Pénétrabilité, TBA)

Après qu'on ait récupéré le mélange liant et solvant (diluant) de l'appareil KUMAGAWA, on a acheminé ce mélange au niveau de l'institut national d'hydrocarbure (INH) où le bitume a été récupéré au moyen de l'essai de distillation rotatif, après récupération de bitume on a effectué les essais de caractérisation (Pénétrabilité, Point de ramollissement) de ce dernier.

Les résultats obtenus des essais effectués sur le liant récupéré sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.16. Caractéristiques du liant vieilli

<i>ESSAIS REALISES Essais réalisés</i>	<i>Résultats obtenus</i>
<i>Pénétrabilité (25°C) 1/10mm</i>	<i>21</i>
<i>Point de ramollissement</i>	<i>68</i>



Figure.IV.22. Mélange (bitume + diluant)

IV.2.4. L'additif (poudrette de caoutchouc)

Dans notre travail on a utilisé deux poudrettes de caoutchouc d'origine différente :

- ✓ Poudrette de caoutchouc issue de broyage des semelles de chaussures ;
- ✓ Poudrette de caoutchouc issue de broyage des pneus.



Figure.IV.23. Poudrette des semelles de chaussures



Figure.IV.24. Poudrette des pneus

Ces poudrettes nous ont été fournies par la société d'application d'élastomère SAEL et elles ont été utilisées dans notre travail comme ajout avec des pourcentages pondéraux différents dans le squelette granulaire du béton bitumineux.

Elles présentent une granularité assez fine de taille égale à 1mm maximum pour chaque une d'elles. L'analyse granulométrique de ces poudrettes nous a donné le graphe suivant :

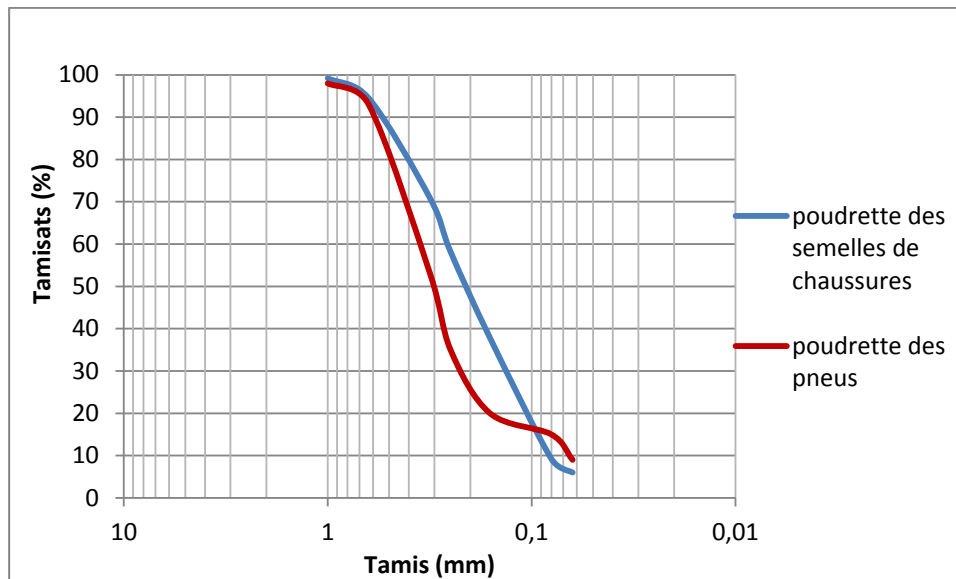


Figure.IV.25. Analyse granulométrique de poudrette des pneus et de poudrette des semelles de chaussures

Commentaire : On remarque que les deux courbes présentent deux granularités voisines.

IV.2.5. Conclusion

Les matériaux utilisés dans la formulation de l'enrobé neuf et de l'enrobé recyclé ainsi que les poudrettes de caoutchouc ont été identifiés dans ce chapitre.

Il apparaît que ces matériaux répondent aux spécifications exigées par les normes mises à part le sable qui présente un pourcentage de fines faible (12,72 %),

Pour cela, on a ajouté un pourcentage de fines par rapport au poids de sable (6 %).

La granulométrie des fraisât avant et après extraction du liant indique que ces derniers peuvent être utilisés sans conditionnement préalable.

La teneur en liant répond aux spécifications d'après paragraphe II.3.3.

IV.3. Formulation des enrobés bitumineux

Après avoir procédé à l'identification des matériaux, nous allons passer à la détermination de la teneur optimum en liant.

Il s'agit de la formulation d'un enrobé bitumineux semi grenu (BBSG0/14), appartenant à la classe des enrobés denses fabriqués à chaud.

Les prescriptions CTTP pour une étude de formulation d'un enrobé en laboratoire sont les suivantes:

- ✓ **Teneur en liant optimale** : variation du module de richesse par pas de 0,15 autour de module de richesse exigé par la norme, 3 formules au total.
- ✓ **Granulométrie**: une seule composition, cela se fait par combinaison des fractions granulaires utilisées de manière à ce que le mélange s'insère dans un fuseau de référence.

Les essais mécaniques retenus pour l'étude de formulation sont les suivants :

- ✓ **Essai Marshall** : compacité des éprouvettes, de stabilité, fluage, quotient Marshall et la tenue à l'eau comme il est expliqué dans le paragraphe I.4.1 et I.4.2.1

IV.3.1. Formulation d'enrobé classique

IV.3.1.1. Choix du mélange granulaire

L'objectif visé est de maîtriser la disposition granulaire du squelette minérale et choisir une formule qui donne un mélange ayant la meilleure compacité et qui pourrait conférer une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné.

Celui-ci se fait par combinaison des fractions granulaires utilisées de manière à ce que le mélange s'insère dans un fuseau de référence.

Le fuseau de référence est celui d'un béton bitumineux semi grenu 0/14, dont les valeurs limites sont données dans le tableau IV.17.

Tableau.IV.17. Fuseau de référence d'un béton bitumineux semi grenu 0/14

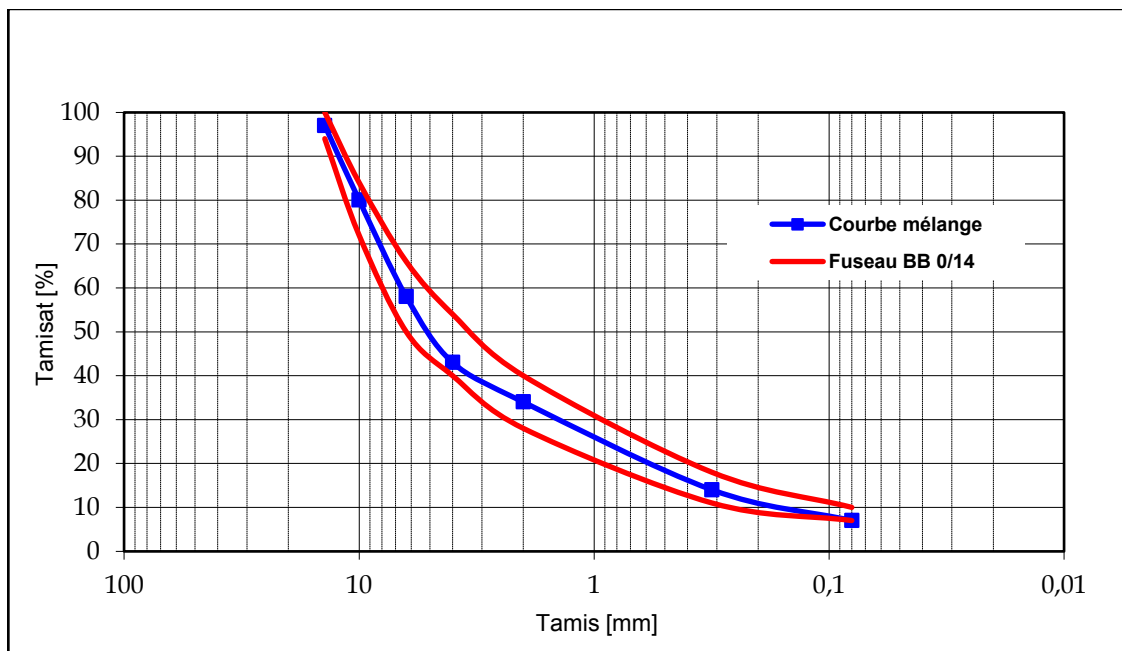
<i>Tamis</i>	<i>Fuseau</i>	
14	94	100
10	72	84
6,3	50	66
4	40	54
2	28	40
0,315	11	18
0,08	7	10

Pour que la courbe de mélange s'insère dans le fuseau de référence, la composition granulaire suivante a été retenue :

Tableau.IV.18. Composition granululaire du mélange

Fractions	Pourcentage des constituants (%)
Fillers	2
sable 0/3	38
gravier 3/8	20
gravier 8/15	40

La courbe granulométrique du mélange issue de cette formule s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique au béton bitumineux semi grenu 0/14.

**Figure.IV.26. Courbe granulométrique du mélange 0/14**

IV.3.1.2. Détermination des teneurs en bitume

Pour déterminer ces teneurs en liant, on utilise les lois mentionnées dans le paragraphe I.3.2.

✓ Détermination de la surface spécifique des granulats

Tableau.IV.19. Calcul de la surface spécifique

Tamis	Tamisé % (mélange proposé)	Paramètre de calcul de Σ
20	100,00	G = 42 %
16	100,00	
14	97,00	
12,5	95,00	
10	80,00	
8	69,00	
6,3	58,00	S = 44 %
5	49,00	
4	43,00	
3,15	42,00	
2	34,00	
1	24,00	
0,63	19,00	S = 7 %
0,315	14,00	
0,25	13,00	
0,16	11,00	
0,08	7,00	F = 7 %
$\Sigma (M^2/kg)$		11,41
$\sqrt[5]{\Sigma}$		1,627

✓ Calcul du coefficient α :

$$\text{MVRg} = \frac{(d(f) \times (\%f)) + (d(0/3) \times \% (0/3)) + (d(3/8) \times \% (3/8)) + (d(8/15) \times (\%8/15))}{100}$$

- ✓ d(f) : la densité des fillers ;
- ✓ d(0/3) : la densité des sables ;
- ✓ d(3/8) : la densité des gravillons ;
- ✓ d(8/15) : la densité des graviers.

$$\text{MVRg} = \frac{(2,66 \times 2) + (2,66 \times 38) + (2,69 \times 20) + (2,70 \times 40)}{100} = 2,68$$

$$\alpha = 2,65 / \text{MVRg} = 0,988$$

Donc on a pour les valeurs de module de richesse suivante la teneur en liant :

Tableau.IV.20. Les teneurs en liant

Module de richesse K	3,45	3,6	3,75
Teneur en liant (%)	5,55	5,79	6,03

Remarque : le module de richesse K varie entre 3,3et 3,9 selon EN 12697-34.

IV.3.1.3. Détermination du mélange optimal

Les essais réalisés pour tester les performances mécaniques et déterminer la formulation optimale de béton bitumineux sont uniquement les essais MARSHALL réalisés selon le mode opératoire des « recommandations Algériennes pour l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux », On mesure :

- ✓ La compacité
- ✓ Stabilité et fluage Marshall
- ✓ Tenue à l'eau

Les résultats des essais MARSHALL sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.21. Résultats des essais MARSHALL

Formule granulaire	TL1	TL2	TL3
<i>Teneur en bitume (%)</i>	5,55	5,79	6,03
<i>Densité apparente (t/m³)</i>	2,37	2,353	2,34
<i>Densité réelle (t/m³)</i>	2,46	2,46	2,46
<i>Compacité (%)</i>	96,34	95,67	95,12
<i>Stabilité Marshall SM (KN)</i>	10,71	10,17	9,65
<i>Fluage FM (mm)</i>	3,43	3,10	4,33

Les résultats des essais de la Tenue à l'eau sont présentés dans le tableau suivant

Tableau.IV.22. Résultats des essais de la tenue à l'eau

Formule granulaire	TL1	TL2	TL3
Teneur en bitume (%)	5,55	5,79	6,03
Résistance la compression à sec R à 18°C (MPA)	56	51	50
Résistance à la compression en immersion r à 18°C (MPA)	47	43	40
La tenue à l'eau r/R	0,83	0,84	0,80

✓ **Commentaire:**

On remarque que pour la formulation TL1 on a :

- Une bonne stabilité MARSHALL ;
- Un bon fluage MARSHALL ;
- Une bonne compacité ;
- D'après les résultats obtenus sur la tenue à l'eau on remarque que les résultats obtenus sur la résistance à la compression à sec et la tenue à l'eau sont acceptable d'après les spécifications de LCPC.

Donc on remarque que l'ensemble des caractéristiques Marshall de l'enrobé pour les trois teneurs en liant répond aux spécifications, mis à part la stabilité Marshall pour TL2 et TL3, d'où le choix de :

TL1 = 5,55% ; K = 3,45

Tableau.IV.23. Tableau récapitulatif

Composition et performances du BBSG0/14				
Fractions	Constituants (%)	Performances Marshall		Spécifications
<i>Fillers</i>	2%	<i>Stabilité (KN)</i>	10.71	> 10.5
<i>sable 0/3</i>	38%	<i>Compacité (%)</i>	96.34	<97 et >95
<i>gravier 3/8</i>	20%	<i>Fuage (mm)</i>	3.43	< 4
<i>gravier 8/15</i>	40%	<i>Tenue à l'eau (r/R)</i>	0.83	>0.75
<i>Bitume 40/50</i>	<i>Pen=41,5 , TBA=52 , teneur = 5,55%</i>			

IV.3.2. Formulation de l'enrobé recyclé modifié à la poudrette de caoutchouc

Après avoir procédé à l'identification des matériaux et la détermination de la teneur optimum en liant, nous allons passer à la formulation de l'enrobé recyclé et sa correction par ajout de poudrette de caoutchouc (l'une issue de broyage des semelles de chaussures et l'autre de broyage des pneus des véhicules) La teneur en poudrette varie de 0 % à 3% avec un pas de 1.

Pour tester les différentes formulations, des éprouvettes Marshall ont été confectionnées au laboratoire dans le but de voir l'impact des poudrettes (de semelles de chaussures et de pneus) incorporées directement dans le squelette granulaire et d'étudier leurs influences sur les caractéristiques de l'enrobé en les comparant à celles de l'enrobé de base.

En partant de données et recherches déjà faites, en introduisant directement la poudrette dans le squelette granulaire, une partie sera fusionnée dans le bitume et l'autre jouera le rôle des fillers.

Les matériaux et les moules utilisés pour la confection des éprouvettes Marshall sont chauffés dans l'étuve à la température de 160°C pour le Bitume 40/50.

IV.3.2.1. Correction de la granulométrie des agrégats d'enrobé par ajout de granulats d'apport

La formulation de l'enrobé recyclé consiste à corriger la granulométrie des agrégats d'enrobé par l'ajout de granulats neufs pour obtenir une granulométrie comparable à celle d'un enrobé neuf.

Pour que la courbe du mélange s'insère dans le fuseau de référence, la composition granulaire suivante a été retenue :

Tableau.IV.24. Composition du mélange granulométrique avec 50 % de fraisats

<i>Fraction</i>	<i>Pourcentage (%)</i>
fraisats	50
sable 0/3	20
Gravillon 3/8	10
Gravier 8/15	20

La courbe granulométrique issue de cette formule s'insère parfaitement dans le fuseau spécifique au BBSG 0/14.

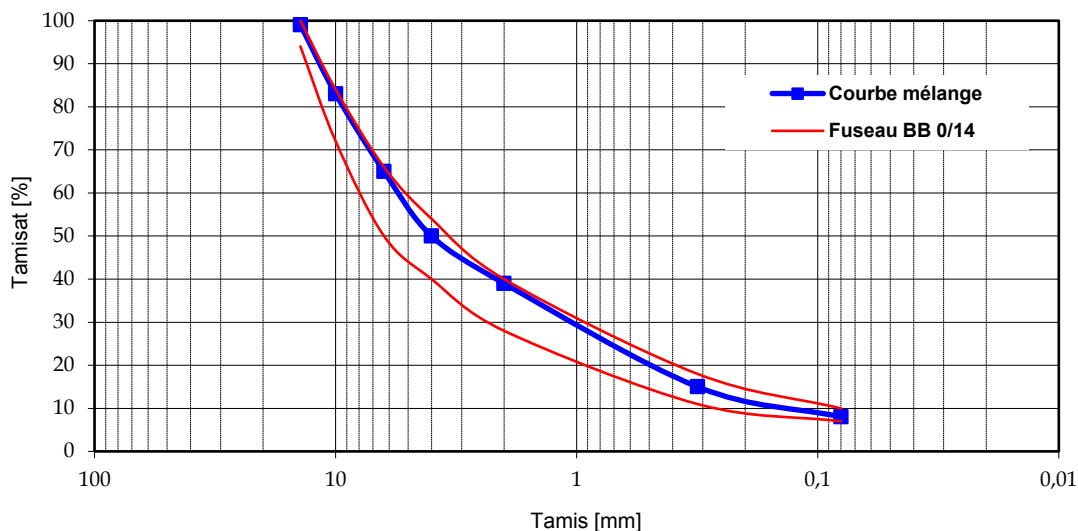


Figure.IV.27. Courbe granulométrique du mélange granulaire avec 50 % de fraisâts

IV.3.2.2. Correction des caractéristiques du liant d'agrégats d'enrobé par l'ajustement des caractéristiques du liant d'apport

IV.3.2.2.1. Quantité de liant d'apport

La quantité de liant d'apport (LA) est déterminée en assimilant les enrobés recyclés à des enrobés neufs. La masse de liant d'apport nécessaire à la fabrication d'un enrobé recyclé est déterminée en soustrayant la quantité de liant apportée par les agrégats d'enrobé de la quantité de liant connue comme celle nécessaire à la fabrication d'un enrobé neuf de même granulométrie. Cette méthode suppose donc que le liant des agrégats d'enrobé est entièrement remobilisée pour participer à la cohésion des enrobés fabriqués (voire paragraphe II.6.1.2).

$$TLA (\%) = TL (BBSG 0/14)(\%) - \frac{TLAE (\%) \times AE(\%)}{100}$$

$$TLA = 5,55 - (50 \times 4,52) / 100 = 3,29\%$$

IV.3.2.2.2. Caractéristiques du liant d'apport

Les caractéristiques du liant d'apport sont déterminées à partir des caractéristiques du liant d'agrégats d'enrobé et de liant d'enrobé recyclé souhaité avoir. Les caractéristiques recherchées sont la pénétrabilité et la température bille-anneau au moyen des approches présentées précédemment (paragraphe II.6.1.1.)

Dans notre cas on fixe d'abord le grade de liant d'apport pour aboutir aux caractéristiques du mélange (liant d'apport + liant d'AE). Une fois les caractéristiques de LER seront déterminées on verra l'effet des poudrettes sur le grade du liant de l'enrobé recyclé.

$$\log \text{pen}_{\text{LER}} = a \log \text{pen}_{\text{LAE}} + b \log \text{pen}_{\text{LA}}$$

$$a=b=0,5$$

$$\text{pen}_{\text{LAE}} = 21$$

$$\text{pen}_{\text{LA}} = 41,5$$

$$\text{Pen}_{\text{LER}} = 29,52 \text{ (1/10mm)}$$

$$\text{TBA}_{\text{LER}} = a * \text{TBA}_{\text{LAE}} + b * \text{TBA}_{\text{LA}}$$

$$a=b=0,5$$

$$\text{TBA}_{\text{LAE}} = 68$$

$$\text{TBA}_{\text{LA}} = 52$$

$$\text{TBA}_{\text{LER}} = 60^{\circ}\text{C}$$

Ou **a** et **b** : part en masse de liant provenant des recyclats (a) et du liant ajouté (b) dans le mélange (a + b = 1)

IV.3.2.3. Différentes formulations d'enrobés recyclés avec l'introduction de la poudrette de caoutchouc

IV.3.2.3.1. Formulation de référence (0 % de poudrette)

✓ Résultats Marshall

Les résultats des essais Marshall (NF P 98-251-2) sur l'enrobé recyclé à 0 % de poudrette de caoutchouc sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau.IV.25. Résultats Marshall enrobé recyclé avec 0 % d'ajout

<i>Stabilité Marshal SM (KN)</i>	14,50
<i>Fluage Marshal FM (mm)</i>	3,25
<i>Quotient Marshal SM/FM (KN/mm)</i>	4,46
<i>Densité apparentes</i>	2,33
<i>Densité réelle</i>	2,44
<i>Compacité (%)</i>	95,85

✓ **Tenue à l'eau**

Les résultats des essais de la tenue à l'eau sur l'enrobé recyclé à 0 % d'ajout de poudrette de caoutchouc sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.26. Résultats de la tenue à l'eau, enrobé recyclé sans ajout

Résistance à la compression RC_{sec} (KN)	75
Résistance à la compression RC_{imm} (KN)	69
la tenue à l'eau RC_{sec} / RC_{imm}	0,92

Tableau.IV.27. Tableau récapitulatif

Composition et performances du BBSG0/14 recyclé à 50%				
Fractions	Constituants (%)	Performances Marshall		Spécifications
Fraisat (AE)	50%	Stabilité (KN)	14.50	> 10.5
sable 0/3	20%	Compacité (%)	95.85	>95et <97
gravier 3/8	10%	Fuage (mm)	3,25	< 4
gravier 8/15	20%	Tenue à l'eau	0.92	>0.75
Liant AE	Pen= 21, TBA=68, teneur = 4,52%			
Bitume 40/50	Pen= 41,5, TBA= 52, teneur = 3,29%			

IV.3.2.4. Poudrette de caoutchouc issue de broyage des semelles de chaussures

IV.3.2.4.1. Formulation d'un enrobé recyclé avec 1 % de poudrette de caoutchouc issue de broyage des semelles de chaussures

✓ **Résultats Marshall**

Les résultats des essais Marshall (NF P 98-251-2) sur l'enrobé recyclé à 1 % de poudrette de caoutchouc des semelles de chaussures sont donnés dans le tableau IV.28.

Tableau.IV.28. Résultats Marshall enrobé recyclé + 1 % de PSC

Stabilité Marshal SM (KN)	17,75
Fluage Marshal FM (mm)	2,95
Quotient Marshal SM/FM (KN/mm)	6,04
Densité apparentes	2,37
Densité réelle	2,44
Compacité (%)	97,08

✓ **Tenue à l'eau**

Les résultats des essais de la tenue à l'eau sur l'enrobé recyclé à 1 % d'ajout de poudrette de caoutchouc sont donnés dans le tableau suivant ;

Tableau.IV.29. Résultats de la tenue à l'eau pour l'AE + 1 % de PSC

<i>Résistance à la compression RC_{sec} (KN)</i>	79
<i>Résistance à la compression RC_{imm} (KN)</i>	75
<i>la tenue à l'eau RC_{imm} / RC_{sec}</i>	0,95

IV.3.2.4.2. Formulation d'un enrobé recyclé à 2 % de poudrette de caoutchouc de semelles de chaussures

✓ **Résultats Marshall**

Les résultats des essais Marshall (NF P 98-251-2) sur l'enrobé recyclé à 2 % de poudrette de caoutchouc de semelles de chaussures sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau.IV.30. Résultats Marshall, enrobé recyclé + 2 % de PSC

<i>Stabilité Marshall SM (KN)</i>	15,57
<i>Fluage Marshall FM (mm)</i>	3,65
<i>Quotient Marshall SM/FM (KN/mm)</i>	4,27
<i>Densité apparentes</i>	2,33
<i>Densité réelle</i>	2,44
<i>Compacité (%)</i>	95,44

✓ **Tenue à l'eau**

Les résultats des essais de la tenue à l'eau sur l'enrobé recyclé à 2 % d'ajout de poudrette de caoutchouc des semelles de chaussures sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.31. Résultats de la tenue à l'eau, enrobé recyclé + 2 % de PSC

<i>Résistance à la compression RC_{sec} (KN)</i>	69
<i>Résistance à la compression RC_{imm} (KN)</i>	66,5
<i>la tenue à l'eau RC_{imm} / RC_{sec}</i>	0,96

IV.3.2.4.3. Formulation d'un enrobé recyclé à 3 % de poudrette de caoutchouc des semelles de chaussures

✓ Essais Marshall

Les résultats des essais Marshall (NF P 98-251-2) sur l'enrobé recyclé à 3 % de poudrette de caoutchouc de semelles de chaussures sont donnés dans le tableau ci-après :

Tableau.IV.32. Résultats Marshall, enrobé recyclé +3 % de PSC

<i>Stabilité Marshall SM (KN)</i>	<i>14,99</i>
<i>Fluage Marshall FM (mm)</i>	<i>4,25</i>
<i>Quotient Marshall SM/FM (KN/mm)</i>	<i>3,55</i>
<i>Densité apparentes</i>	<i>2,25</i>
<i>Densité réelle</i>	<i>2,44</i>
<i>Compacité (%)</i>	<i>92,16</i>

✓ Tenue à l'eau

Les résultats des essais de la tenue à l'eau sur l'enrobé recyclé à 3 % d'ajout de poudrette de caoutchouc des semelles de chaussures sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.33. Résultats de la tenue à l'eau, enrobé recyclé + 3 % de PSC

<i>Résistance à la compression RC_{sec} (KN)</i>	<i>50</i>
<i>Résistance à la compression RC_{imm} (KN)</i>	<i>49</i>
<i>la tenue à l'eau RC_{imm} / RC_{sec}</i>	<i>0,98</i>

IV.3.2.4.4. Poudrette de caoutchouc issue de broyage des pneus

✓ Formulation d'un enrobé recyclé avec 1 % de poudrette issue de broyage des pneus des véhicules

• Résultats Marshall

Les résultats des essais Marshall (NF P 98-251-2) sur l'enrobé recyclé à 1 % de poudrette de caoutchouc des pneus sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau.IV.34. Résultats Marshall, enrobé recyclé +1 % de PP

<i>Stabilité Marshall SM (KN)</i>	<i>13,91</i>
<i>Fluage Marshall FM (mm)</i>	<i>3,55</i>
<i>Quotient Marshall SM/FM (KN/mm)</i>	<i>3,77</i>
<i>Densité apparentes</i>	<i>2,33</i>
<i>Densité réelle</i>	<i>2,44</i>
<i>Compacité (%)</i>	<i>95,44</i>

- **Tenue à l'eau**

Les résultats de l'essai de la tenue à l'eau sur l'enrobé recyclé à 1 % d'ajout de poudre de caoutchouc des pneus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.35. Résultats de la tenue à l'eau, enrobé recyclé +1 % de PP

<i>Résistance à la compression RC_{sec} (KN)</i>	<i>74</i>
<i>Résistance à la compression RC_{imm} (KN)</i>	<i>76,5</i>
<i>la tenue à l'eau RC_{imm} / RC_{sec}</i>	<i>0,91</i>

- ✓ **Formulation d'un enrobé recyclé avec 2 % de poudre issue de broyage des pneus de véhicules**

- **Résultats Marshall**

Les résultats des essais Marshall (NF P 98-251-2) sur l'enrobé recyclé à 2 % de poudre de caoutchouc des pneus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.36. Résultats Marshall, enrobé recyclé + 2 % de PP

<i>Stabilité Marshall SM (KN)</i>	<i>11,61</i>
<i>Fluage Marshall FM (mm)</i>	<i>3,8</i>
<i>Quotient Marshall SM/FM (KN/mm)</i>	<i>3,51</i>
<i>Densité apparentes</i>	<i>2,24</i>
<i>Densité réelle</i>	<i>2,44</i>
<i>Compacité (%)</i>	<i>91,76</i>

- **Tenue à l'eau**

Les résultats de les essais de la tenue à l'eau sur l'enrobé recyclé à 2 % d'ajout de poudre de caoutchouc des pneus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.37. Résultats de la tenue à l'eau, enrobé recyclé + 2 % de PP

Résistance à la compression RC_{sec} (KN)	49
Résistance à la compression RC_{imm} (KN)	43,6
la tenue à l'eau RC_{imm} / RC_{sec}	0,89

- ✓ **Formulation d'un enrobé recyclé avec 3 % de poudre issue de broyage des pneus des véhicules**

- **Résultats Marshall**

Les résultats des essais Marshall (NF P 98-251-2) sur l'enrobé recyclé à 3 % de poudre de caoutchouc des pneus sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau.IV.38. Résultats Marshall, enrobé recyclé + 3% de PP

Stabilité Marshall SM (KN)	10,48
Fluage Marshall FM (mm)	4,55
Quotient Marshall SM/FM (KN/mm)	2,30
Densité apparentes	2,23
Densité réelle	2,44
Compacité (%)	91,35

- **Tenue à l'eau**

Les résultats des essais de la tenue à l'eau sur l'enrobé recyclé à 3 % d'ajout de poudre de caoutchouc des pneus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.39. Résultats de la tenue à l'eau, enrobé recyclé + avec 3 % de PP

Résistance à la compression RC_{sec} (KN)	44
Résistance à la compression RC_{imm} (KN)	37,8
tenue à l'eau RC_{imm} / RC_{sec}	0,86

Commentaires :

- La teneur en liant optimale du BBSG0/14 = 5, 55%
- L'enrobé recyclé à 50% d'AE présente une plus grande stabilité que l'enrobé neuf.
- L'ajout de PSC à l'enrobé recyclé augmente la stabilité des mélanges et donc augmente la rigidité de ces derniers.
- L'ajout de PP à l'enrobé recyclé réduit la stabilité des mélanges et donc donne de la souplesse à ces derniers.

IV.4. Interprétation des résultats

Après l'identification des matériaux, la formulation de l'enrobé classique, la formulation de l'enrobé recyclé modifié à la poudre de caoutchouc, on passe dans ce chapitre à l'interprétation des résultats obtenus dans IV.3. (Formulation des enrobés bitumineux).

Dans cette partie nous analysons l'influence de la poudre sur :

1. la Stabilité MARSHALL
2. le Fluage MARSHALL
3. la Compacité
4. le Quotient MARSHALL
5. la tenue à l'eau.

IV.4.1. Influence du taux de poudre sur la stabilité Marshall

Les résultats obtenus dans cette étude sont présentés dans le tableau ci-dessous

Tableau.IV.40. Résultats de la stabilité MARSHALL en fonction de % de la poudre

Taux d'AE (%)	0	50			
Taux de la poudre (%)	0	0	1	2	3
<i>SM des AE avec ajout de PSC (KN)</i>	<i>10,71</i>	<i>14,50</i>	<i>17,75</i>	<i>15,57</i>	<i>14,99</i>
<i>SM des AE avec ajout de PP (KN)</i>			<i>13,91</i>	<i>11,61</i>	<i>10,48</i>

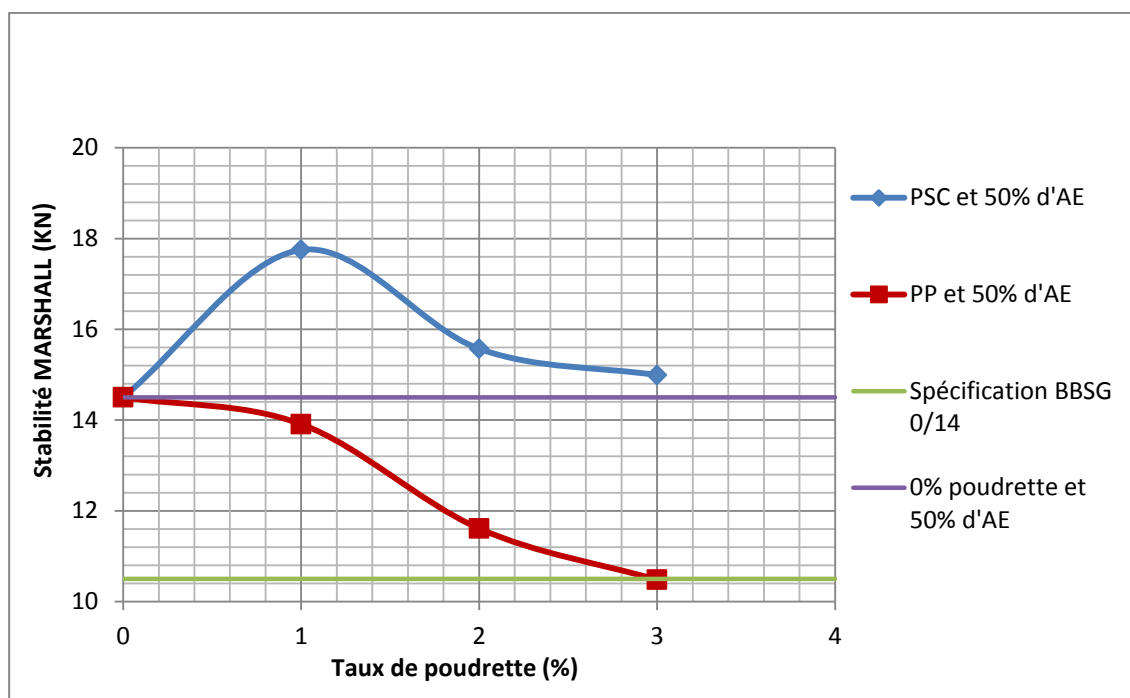


Figure.IV.28. Influence du taux de la poudrette sur la Stabilité MARSHALL

Avec :

PSC : Poudrette des semelles de chaussures

PP : Poudrette des pneus

AE : Agrégats d'Enrobés

- **Commentaires :**

La figure (IV.28) montre la variation de la stabilité Marshall en fonction de pourcentage d'ajout de poudrette (PSC et PP) d'un enrobé recyclé à 50% d'agrégats d'enrobés.

Il est à noter que dans les deux cas les courbes citées se situent au-dessus de la barre représentant la valeur minimale de la stabilité MARSHALL de spécifications de BBSG 0/14.

- ✓ La courbe de l'enrobé modifié à la poudrette de caoutchouc issue du broyage des Semelles Chaussure (**PSC**) a une allure ascendante puis descendante, présentant un optimum au tour de 1% d'ajout. Par rapport à l'enrobé recyclé sans ajout on remarque une amélioration globale de la stabilité MARSHALL avec :
 - Une valeur maximale de l'ordre de 22% d'augmentation pour 1% d'ajout ;
 - Une amélioration de résistance de l'ordre de 7% pour 2% d'ajout ;
 - Une amélioration de l'ordre de 3% pour 3% d'ajout.

- ✓ La courbe de l'enrobé modifié à la poudrette de caoutchouc issue du broyage des Pneus (**PP**) a une allure descendante avec un pseudo-palier jusqu'à 1% d'ajout, puis chute progressivement jusqu'à la valeur de 10,48 KN pour 3% d'ajout. Par rapport à l'enrobé recyclé sans ajout, on remarque une diminution globale de la stabilité MARSHALL avec :
 - Une diminution de l'ordre de 4% pour 1% d'ajout ;
 - Une chute de l'ordre de 20% pour 2% d'ajout ;
 - Une chute de l'ordre de 28% pour 3% d'ajout.
- ✓ La courbe de stabilité Marshall de l'enrobé recyclé à 50% et modifié par la poudrette de caoutchouc issue du broyage des Semelles Chaussure situe au-dessus la barre représentant la valeur de la stabilité de l'enrobé recyclé sans ajout.
- ✓ La courbe de stabilité Marshall de l'enrobé recyclé à 50% et modifié par la poudrette de caoutchouc issue du broyage des Pneus se situe entre la barre représentant la valeur de l'enrobé recyclé sans ajout et la barre de la valeur minimale imposée par la réglementation.

- **Conclusion**

Le but de l'introduction de la poudrette étant de réduire la rigidité de l'enrobé recyclé causée par le vieillissement du liant d'agrégats d'enrobé, il apparait à travers les résultats obtenus sur les essais de la Stabilité Marshall que la poudrette issue de broyage des pneus (**PP**) répond mieux à nos besoins (assouplir l'enrobé).

Le pourcentage d'ajout se situerait entre 2 et 3%, ramenant ainsi la stabilité de 14.5 KN à une valeur comprise entre 11.61 et 10.50 KN, valeurs réglementaires pour un BBSG0/14 ;

IV.4.2. Influence du taux de poudrette sur le fluage Marshall

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.41. Résultats de fluage MARSHALL en fonction de % de poudrette

Taux d'AE (%)	0	50			
Taux de poudrette (%)	0	0	1	2	3
FM des AE avec ajout de PSC (mm)	3,43	3,25	2,95	3,65	4,25
FM des AE avec ajout de PP (mm)			3,55	3,8	4,55

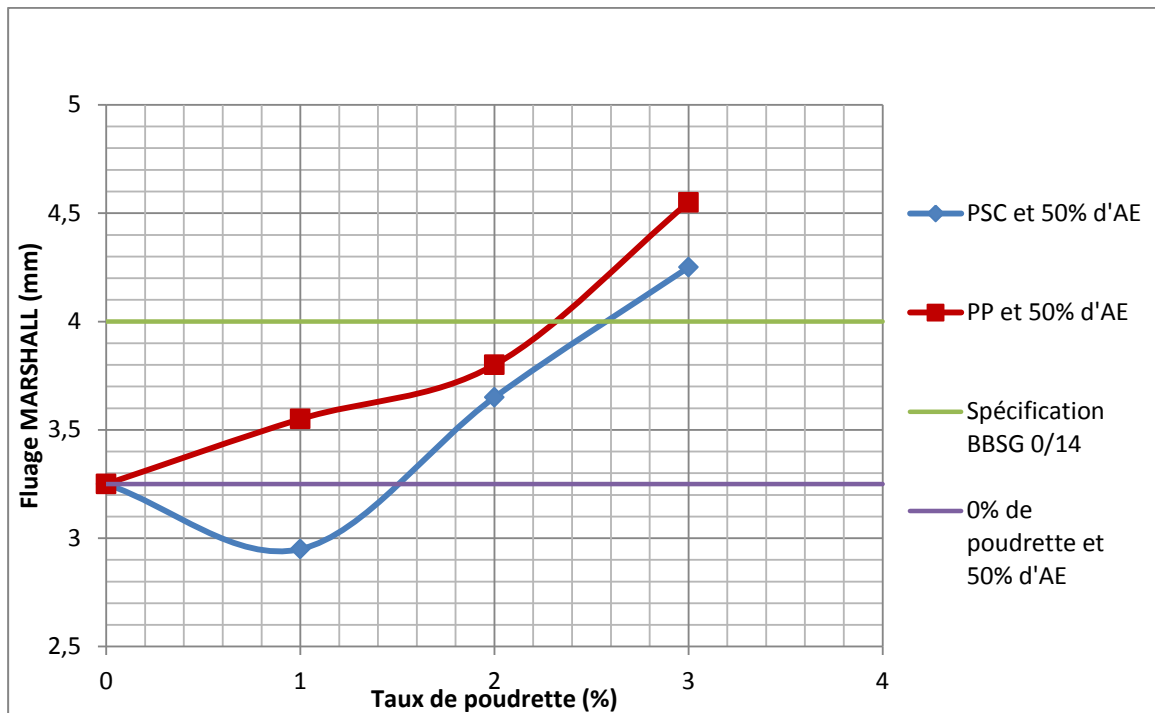


Figure.IV.29. Influence de taux de poudrette sur le Fluage MARSHALL

• **Interprétation :**

La figure (IV.29) montre la variation du fluage Marshall en fonction de pourcentage d'ajout de poudrette (PSC et PP) d'un enrobé recyclé à 50% d'agrégats d'enrobés.

- ✓ Par rapport à la valeur du fluage de l'enrobé recyclé sans ajout, l'incorporation de la PSC réduit le fluage, puis l'améliore au-delà de 1.8% d'ajout.
 - La valeur minimale se situe à 1% d'ajout représentant une diminution de l'ordre de 9 % ;
 - A 3% d'ajout, l'augmentation est de l'ordre de 31 %.
- ✓ Par rapport à l'enrobé recyclé sans ajout, l'incorporation de la **PP** augmente graduellement le fluage pour dépasser la valeur admise par les normes au taux de 2.4%

✓ **Conclusion**

L'analyse des résultats de fluage confirme celles de la stabilité MARSHALL à savoir l'ajout de la poudrette de caoutchouc issue de broyage des pneus donne plus de souplesse à l'enrobé recyclé avec taux d'incorporation inférieur à 2.4% ;

IV.4.3. Influence du taux de poudrette sur la compacité Marshall

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.42. Influence de % de poudrette sur la compacité

Taux d'AE (%)	0		50		
Taux de poudrette (%)	0	0	1	2	3
Compacité des AE avec ajout de PSC (%)	96,34	95,85	97,08	95,44	92,16
Compacité des AE avec ajout de PP (%)			95,44	91,76	91,35

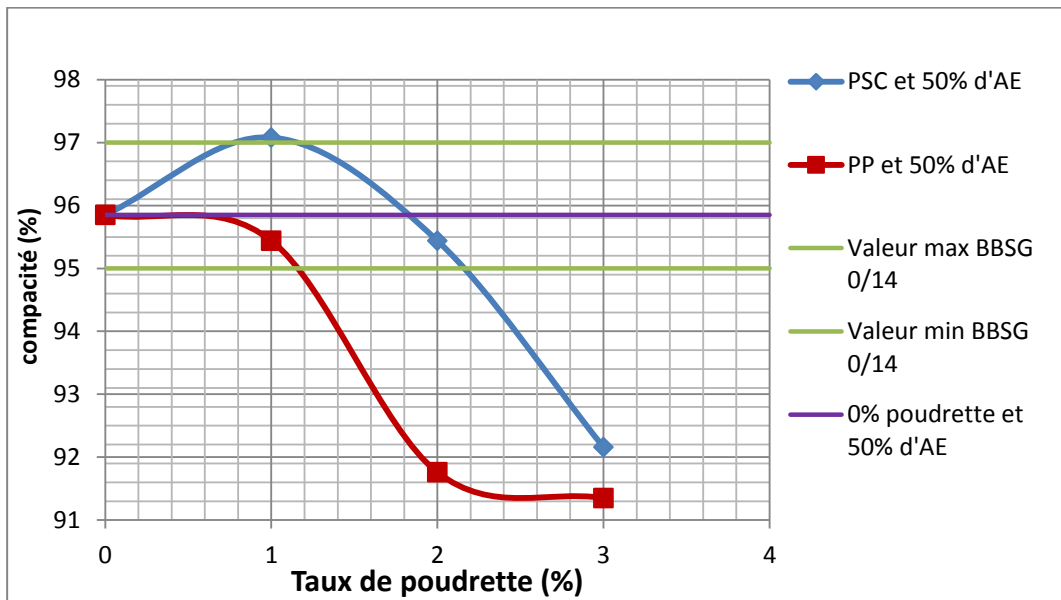


Figure.IV.30. Influence de taux de poudrette sur la compacité

• **Commentaire :**

La figure (IV.30) montre la variation de la compacité en fonction de pourcentage d'ajout de la poudrette de caoutchouc.

- L'ajout de la **PSC** améliore la compacité jusqu'à 1% d'ajout, puis on assiste à une baisse de l'ordre de 4% par rapport au sans ajout.
- L'ajout de **PP** baisse lentement puis progressivement à partir 1% pour comptabiliser une perte de l'ordre de 5% ;

Comme la compacité devrait être comprise entre 95% et 97% pour un BBSG0/14. On retiendra :

- ✓ un taux d'ajout inférieur à 2.2% pour la poudrette **PSC**,
- ✓ un taux d'ajout inférieur à 1.2% pour la poudrette **PP**.

IV.4.4. Influence du taux de poudrette sur le Quotient Marshall

Le Quotient MARSHALL est un indicateur pour la résistance aux déformations permanentes, contrainte de cisaillement et aussi pour l'orniérage des enrobés bitumineux [20].

Les plus grandes valeurs du quotient indiquent que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes.

Le tableau suivant présente la variation du quotient MARSHALL en fonction de taux d'ajout

Tableau.IV.43. Influence de taux de poudrette sur le Quotient MARSHALL

Taux d'AE (%)	0%	50%			
Taux de poudrette(%)	0%	0%	1%	2%	3%
QM des AE avec ajout de PSC (KN/mm)	3,12	4,46	6,04	4,27	3,55
QM des AE avec ajout de PP (KN/mm)			3,77	3,51	2,3

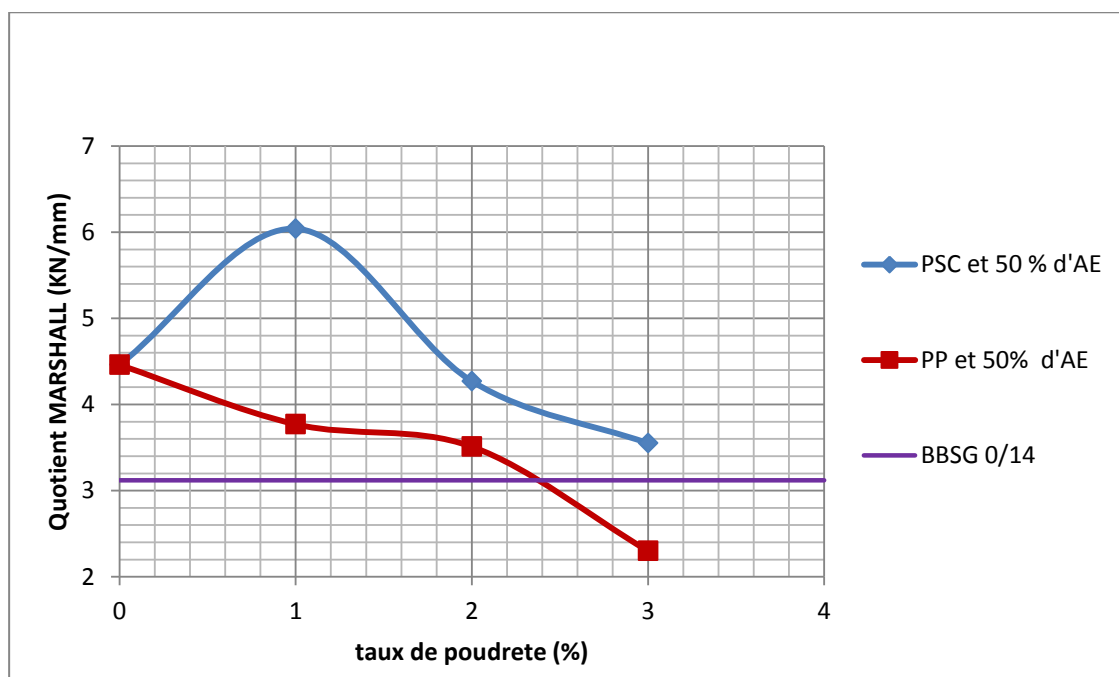


Figure.IV.31. Influence de taux de poudrette sur le Quotient MARSHALL

- **Commentaire :**

La figure (IV.31) montre la variation du Quotient MARSHALL en fonction de pourcentage d'ajout de la poudrette de caoutchouc.

- ✓ On remarque que le Quotient MARSHALL (QM) atteint une valeur maximale qui est de l'ordre de 6 pour un pourcentage d'ajout de 1% pour PSC.
- ✓ Par contre le QM diminue avec l'ajout de la poudre de pneus.
- ✓ Il est toutefois à remarquer que jusqu'à 2.4% d'ajout de PP, le QM reste au-dessus de la valeur 3.12 obtenue pour le BBSG0/14.

- **Conclusion :**

La poudre de caoutchouc issue de broyage des semelles de chaussures (PSC) améliore la résistance aux déformations permanentes des enrobés recyclés ; cette amélioration est de 35% pour 1% d'ajout.

La poudre de caoutchouc issue de broyage des pneus (PP) diminue la résistance aux déformations permanentes mais cette dernière reste supérieure à celle obtenue sur l'enrobé recyclé non modifié.

IV.4.5. Influence du taux de poudre sur la tenue à l'eau

Les résultats de la tenue à l'eau sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.44. Influence de la poudre de caoutchouc sur la tenue à l'eau

Taux d'AE (%)	0	50		
Taux de poudre(%)	0	1	2	3
<i>La tenue à l'eau des AE avec ajout des PSC</i>	0,92	0,95	0,96	0,98
<i>La tenue à l'eau des AE avec ajout des PP</i>		0,91	0,89	0,86

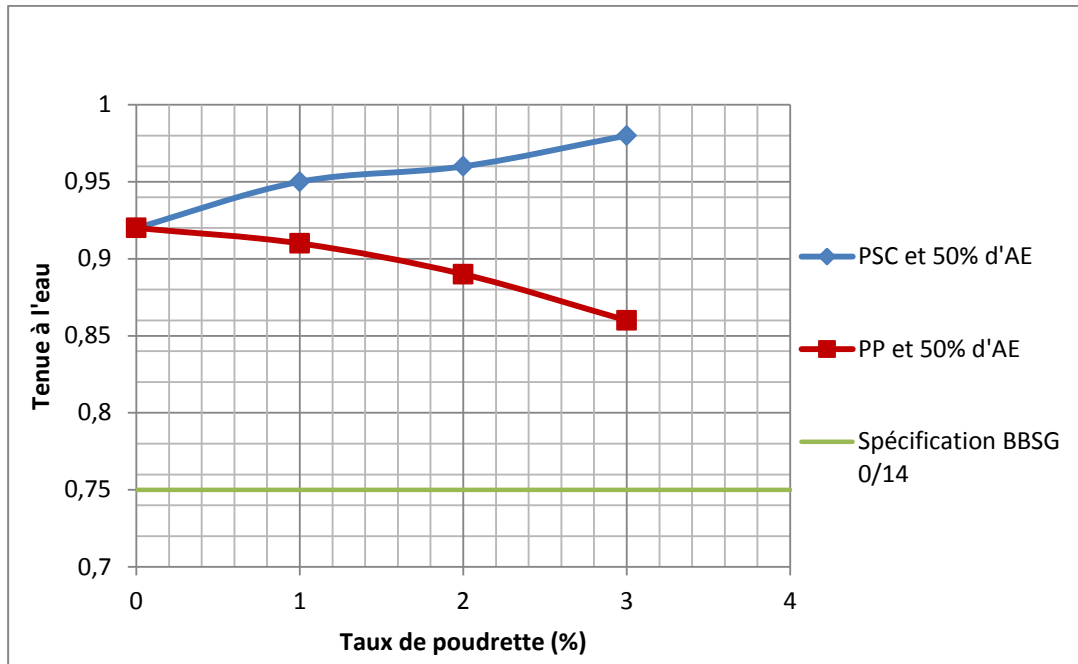


Figure.IV.32. Influence de la poudre de caoutchouc sur la tenue à l'eau

- **Commentaire :**

La figure (IV.32) montre la variation de la tenue à l'eau en fonction de pourcentage d'ajout de la poudre de caoutchouc. Il est à noter qu'une bonne tenue à l'eau est estimée correcte si le rapport entre les résistances à sec et immergée est supérieur ou égale à 0.75. On remarque que :

- ✓ La poudre de caoutchouc issue de broyage des semelles de chaussures améliore la tenue à l'eau qui passe de 0,92 à 0,98 pour 3% d'ajout.
- ✓ La poudre de caoutchouc issue de broyage des pneus diminue progressivement la tenue à l'eau, le rapport passe de 0,92 à 0,86 pour 3% d'ajout.

- **Conclusion :**

La poudre des semelles de chaussures limite l'effet de l'eau dans le désenrobage et assure donc une meilleure adhésivité du mélange.

La poudre des pneus diminue légèrement la tenue à l'eau mais l'enrobé modifié par cette poudre garde une tenue à l'eau qui répond aux normes.

IV.5. Conclusions

L'incorporation de la poudrette de caoutchouc issue du broyage des Semelles de Chaussures (**PSC**) dans le squelette granulaire d'un enrobé semi grenu 0/14, contenant 50% d'Agrégats d'Enrobé :

- Améliore la stabilité MARSHAL de l'enrobé ainsi modifié. On note un gain optimal de 22% à 1% d'ajout, puis une chute progressive ramenant le gain de stabilité à 7% pour 2% d'ajout et de 3% pour 3% d'ajout.
 - Réduit le fluage, puis l'améliore au-delà des 1.8% d'ajout ; la valeur minimale se situe à 1% d'ajout représentant une diminution de l'ordre de 9 % ; A 3% d'ajout, l'augmentation est de l'ordre de 31 %.
 - Améliore la compacité pour des taux inférieurs à 1%, puis la réduit au-delà de ce taux (l'ordre de 4% à 3% de PSC).
 - Améliore le Quotient MARSHALL (QM) avec une valeur maximale (gain de 35%) à 1% d'ajout de PSC.
 - Améliore la tenue à l'eau qui passe de 0,92 à 0,98 pour 3% d'ajout.
- ✓ L'incorporation de la poudrette de caoutchouc issue du broyage des Pneus (**PP**) dans le squelette granulaire d'un enrobé semi grenu 0/14, contenant 50% d'Agrégats d'Enrobé :
- Diminue la stabilité MARSHAL de l'enrobé ainsi modifié. On note une stagnation puis une diminution quasi progressive à partir de 1% d'ajout pour réduction de l'ordre de 28% de stabilité à 3% d'ajout de PP ;
 - Augmente graduellement le fluage pour dépasser la valeur admise par les normes au taux de 2.4%
 - Baisse lentement la compacité à partir 1% pour comptabiliser une perte de l'ordre de 5%.
 - Diminue d'une manière peu significative le Quotient MARSHALL.
- ✓ La poudrette issue de broyage des pneus (**PP**), permet, sans avoir à changer de grade du liant d'apport, de ramener les caractéristiques mécaniques de l'enrobé recyclé aux exigences normatives. Le pourcentage d'ajout se situerait, du point de vue :
- Stabilité : entre 2 et 3%
 - Fluage : inférieur à 2.4%
 - Compacité : inférieur à 1.2%
 - Tenue à l'eau : pas de réserve
 - Quotient Marshall : pas de réserve

- ✓ Ainsi, la formulation d'un enrobé bitumineux semi grenu, recyclé à 50%, avec ajout de poudrette de Pneus à raison d'un taux compris entre 2 et 2.4% permettrait d'obtenir un enrobé dont les caractéristiques Marshall sont celles de l'enrobé de base. Il reste cependant à agir sur les facteurs qui influencent la compacité pour ramener cette dernière à un taux acceptable par la réglementation en vigueur.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les travaux menés durant la préparation de notre mémoire nous ont permis de faire une immersion dans le domaine des produits noirs, de nous familiariser avec la caractérisation et la formulation des enrobés, le recyclage d'agrégat et de la valorisation des déchets de caoutchouc. Nous avons analysé l'évolution des performances Marshall d'un enrobé bitumineux semi-grenu (BBSG0/14) contenant 50% d'Agrégats d'Enrobé, en fonction du taux et de la nature de la poudrette de caoutchouc incorporée au squelette granulaire.

L'objectif de cet travail est d'identifier le taux et le type de poudrette qui confèreraient à l'enrobé recyclé des caractéristiques comparables à celles de l'enrobé neuf sans avoir à changer le grade du liant d'apport.

Les Agrégats d'Enrobés sont issus du fraisage de la couche de roulement en béton bitumineux. Le bitume d'apport est un bitume 40/50. Deux poudrettes ont été testées : une issue du broyage des semelles des chaussures et l'autre du broyage des pneus usagés. Le taux d'incorporation est de 1%, 2% et 3% du poids total des granulats.

Les résultats ont montré que :

- ✓ L'incorporation de la poudrette de caoutchouc issue du broyage des Semelles de Chaussures (PSC) dans le squelette granulaire d'un enrobé semi grenu 0/14, contenant 50% ne permet pas d'ajuster les performances de l'enrobé recyclé à 50%.
- ✓ La formulation d'un enrobé bitumineux semi grenu, recyclé à 50%, avec ajout de Poudrette de Pneus à raison d'un taux compris entre 2 et 2.4% permettrait d'obtenir un enrobé dont les caractéristiques Marshall sont celles de l'enrobé de base. Il reste cependant à agir sur les facteurs qui influencent la compacité pour ramener cette dernière à un taux acceptable par la réglementation en vigueur.
- ✓ Cette étude a mis en évidence la possibilité de valorisation des agrégats d'enrobés qui présentent un déchet des chaussées bitumineuses et deux déchets de caoutchouc de natures différentes; nous avons ainsi abordé un double problème environnemental (diminution des zones de stockages des matériaux routiers ; récupération des déchets industriels) et économique (réduction le cout globale des projets routiers).
- ✓ Cette étude ouvre des perspectives de recherche telles que :
 - L'amélioration de la compacité des enrobés recyclés et modifiés à sec à la poudrette de Pneus.
 - La compréhension du comportement des deux poudrettes (analyse chimique des poudrettes, analyse du liant extrait à partir de l'enrobé recyclé et modifié).
 - L'influence de la granulométrie de la poudrette sur les performances de l'enrobé recyclé modifié.....

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] RESEAU ROUTIER EN ALGERIE, <http://www.mtp.gov.dz/fr/domaines-d-activite/3033-sous-secteur-entretien.html>;
- [2] MÉRAD, L:« *recyclage des enrobés bitumineux, Réduire de 30% les coûts des projets routiers*» Journal Le Soir d'Algérie, 2005 ;
- [3] JOURNEE TECHNIQUE :« *Recyclage des enrobes bitumineux* », SONATRO (Alger), décembre 1997 ;
- [4] ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE: « *recyclage des chaussées* », France, 2003
- [5] OULD-HENIA, M & SOUAMI, S « *amélioration des performances d'un béton bitumineux* » Mémoire de fin d'étude, Ecole National Polytechnique, Alger, 1999 ;
- [6] Cours 4^{ème} année, infrastructure de transport, «*les matériaux de chaussées*», MORSLI, 2013 ;
- [7] RAHAB, K : « *Recyclage d'agrégats d'enrobés à divers taux, dans de nouvelles formulations d'enrobés* » Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Septembre 2012 ;
- [8] AMBA JEAN CHILLS : « *La Contribution A l'étude Des Performances Des Enrobes Bitumineux Modifies A Base De Polymères* » Mémoire de fin d'étude à l'USTHB, 2003 ;
- [9] HARKAT, B & BENDJABALLAH, M : «*Technique innovante en construction routière pour assise de chaussée*» Mémoire d'ingénieur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ENP, juin 2010 ;
- [10] NORME EUROPEENNE EN 12697-12 : Mélange Bitumineux- Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie -12 : « *Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes* » ;
- [11] EL BEZE, L : « *Recyclage à chaud des agrégats d'enrobes bitumineux : Identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport* » Thèse de doctorat université Aix-Marseille, 2008 ;
- [12] NAVARO, J: « *Cinétique de mélange des enrobes recyclés et influence sur les performances mécaniques*» Thèse de doctorat à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Bordeaux, 2011;
- [13] DUPONT, P & AUSSÉDAT, G & DESCANTES, Y & GUÉDON, J :«*Granulats. Production et utilisations*» Éditions technique de l'ingénieur, 2007;
- [14] RESUME LCPC, http://ofrir.lcpc.fr/article_produit/60/0/224/article_initial.doc;
- [15] AIPCR: «*RECYCLAGE DES CHAUSSEES*» France, 2003;
- [16] INFRAGUIDE : «*Réutilisation ou recyclage des matériaux de construction ou d'entretien de routes*» Fédération canadienne des municipalités (FCM), 2005;

- [17] MEZIDI, O: « *Étude comparative des caractéristiques et du comportement d'un béton de sable de dunes et d'un béton ordinaire modifiés à la poudrette de caoutchouc* » Mémoire magistère à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ENP, 2008;
- [18] GODARD, E: « Enrobé bitumineux à chaud comportant du caoutchouc » Colas, Octobre 2002 ;
- [19] OULD-HENIA : « *Liants au bitume caoutchouc* » LAVOC, EPFL, 2004
- [20] BRARA, A « *Contribution à l'étude du comportement d'un béton bitumineux modifié à la poudrette de caoutchouc* » Magister à l'Ecole National Polytechnique, Alger, 2004 ;
- [21] NINOUH, T : « *caractéristiques des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux recyclés* » doctorat université de Tébessa, juin 2012 ;
- [22] HADDADI, S « *Influence de la poudrette de caoutchouc sur le comportement au fluage des enrobés bitumineux* » Thèse de Doctorat à l'Université des sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Octobre 2007.
- [23] NORME EUROPEENNE EN 12697-23 : Mélange Bitumineux- Méthodes d'essai pour enrobé à chaud – Partie - 23 : « *Détermination de la résistance à la traction indirecte des éprouvettes bitumineuses* » ;
- [24] NORME EUROPEENNE EN 12697-30 : Mélange Bitumineux- Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie - 30 : « *Confection des éprouvettes par compactage à impact* » ;
- [25] NORME EUROPEENNE EN 12697-34 : Mélange Bitumineux- Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie-34 : « *Essai MARSHALL* » ;
- [26] NORME EUROPEENNE EN 12697-35 : Mélange Bitumineux- Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie - 35 : « *Malaxage en laboratoire* » ;
- [27] NORME EUROPEENNE EN 12697-6 : Mélange Bitumineux- Méthodes d'essai pour enrobé à chaud – Partie - 6 : « *Détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses* » ;
- [28] NORME EUROPEENNE EN 12697-2 : Mélange Bitumineux- Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie -2 : « *Granulométrie* » ;
- [29] NORME FRANÇAISE XP P98-135 : Enrobé Hydrocarboné – « *Caractéristiques des agrégats d'enrobés pour recyclage à chaud en centrale* » ;
- [30] NORME FRANÇAISE P18-553 Granulats : « *Préparation d'un échantillon pour essai* » ;
- [31] NORME ALGERIENNE NA 2607 : « *Essai de l'analyse granulométrique par tamisage* » ;
- [32] NORME ALGERIENNE NA 256/1990 : « *Mesure de coefficient d'aplatissement* » ;
- [33] NORME ALGERIENNE NA5129 : « *Détermination de la résistance à l'usure, essai Micro-Deval* » ;

- [34] NORME ALGERIENNE NA 5130 : « *Détermination de la résistance à la fragmentation par la méthode de Los Angeles* » ;
- [35] NORME FRANÇAISE XP P18-540 : « *Granulats : Définition ; conformité, spécification* » ;
- [36] NORME FRANÇAISE P18-598 : « *Granulats : équivalent de sable* » ;
- [37] NORME FRANÇAISE P18-591 : « *Granulats : Détermination de la propreté superficielle* » ;
- [38] NORME EUROPEENNE NF EN 1427 : Bitume et liants bitumineux – « *détermination de la température de ramollissement : méthode Bille et Anneau* » ;
- [39] NORME ALGERIENNE NA 5192 : « *Essai sur bitume pur : Essai de pénétrabilité* ».

ANNEXE.I.

ESSAIS SUR GRANULATS

I.1.Échantillonnage

L'échantillonnage des granulats consiste à sélectionner une fraction réduite de matériau, censée représenter l'ensemble du matériau de façon aussi faible que possible.

Lorsqu'on n'applique pas les méthodes d'échantillonnages, les caractéristiques des granulats utilisés dans la formulation des enrobés bitumineux s'écartent nécessairement de celles représentatives du lot de production. En effet, ces produits granulaires non liés sont très sensibles à la ségrégation.

La préparation doit être réalisée avec le matériau légèrement humide pour éviter la perte d'éléments fins. Si le matériau est sec, il faut l'humidifier légèrement de manière homogène.

La préparation des échantillons au CTPP s'effectue au moyen de diviseurs «échantillonneurs», appareils séparant en parties égales une quantité de matériau déterminée.

La séparation au moyen de diviseurs consiste à :

- Verser le matériau à l'aide de la pelle dans le diviseur (figure 1). Veiller à ce qu'il soit uniformément réparti sur toute la surface de la pelle correspondant à l'appareil utilisé.
- La largeur des couloirs doit être supérieure ou égale à $2D$, D exprimé en millimètres est la plus grande dimension spécifiée.

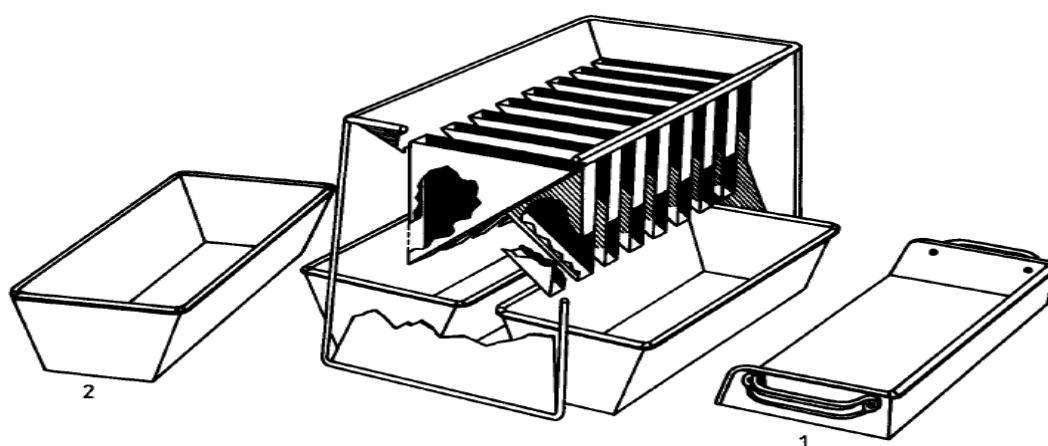


Figure.1.Diviseur échantillonneur à couloirs

1-Pelle correspondante

2- Bac

- S'assurer que le nombre de couloirs est pair (en obstruant au besoin l'un des couloirs extrêmes), supérieur ou égal à 14 et que leur largeur est identique.
- Si la quantité obtenue dans chaque bac est trop importante pour l'essai envisagé, recommencer l'opération avec le matériau d'un des deux bacs.

Pour obtenir la quantité nécessaire à la réalisation « m » du ou des essais prévus, on utilise une quantité initiale de « $3m$ » en effectuant les opérations montrées sur la figure (2) :

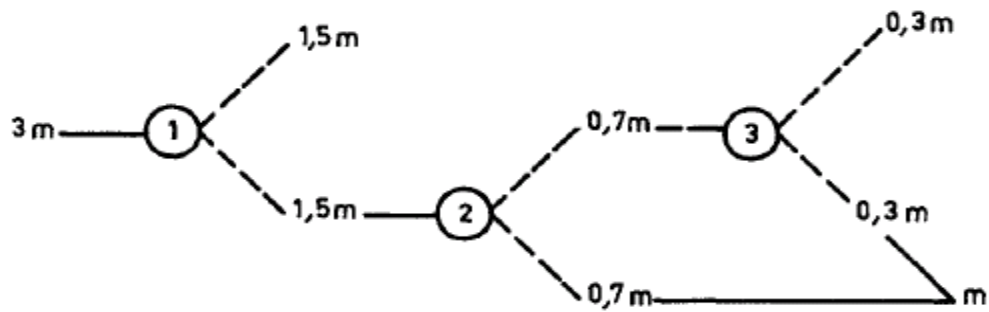


Figure.2. Nombre de partages

I.2. Analyse granulométrique par tamisage NA 2607

I.2.1. Objet

La présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination de la granularité des granulats dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 80 mm.

I.2.2. Domaine d'application

La présente norme s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle, utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil.

I.2.3. Généralités

I.2.3.1. Définitions

Granularité : distribution dimensionnelle des grains.

Refus sur un tamis : matériau qui est retenu sur le tamis.

Tamisât (ou passant) : matériau qui passe à travers le tamis.

I.2.3.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue. Les masses des différents refus ou celles des différents tamisats sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

I.2.3.3. Appareillage

I.2.3.3.1. Appareillage d'usage courant

- Appareillage spécifique à la norme P 18-553.
- **Bacs, brosses, pinceaux.**
- **Balance** dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1 %.
- **Étuve** ventilée réglée à $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.
- Un dispositif de lavage.

I.2.3.3.2. Appareillage spécifique

Tamis dont l'ouverture est conforme à la norme NF X 11-501 et de diamètre 250 mm. Parmi les tamis de contrôle définis dans cette norme, on utilise généralement ceux donnés par la norme NF P 18-101 pour la classification des granulats.

Le contrôle des tamis sera effectué suivant les indications données dans la norme NF X 11-504.

I.2.4. Préparation de l'échantillon pour l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme P 18-553. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à 0,2 D, avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

I.2.5. Exécution de l'essai

I.2.5.1. Détermination de la masse sèche de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique

L'essai s'effectue sur le matériau à la teneur en eau à laquelle il se trouve avant l'analyse afin d'éviter un séchage qui présente des inconvénients : perte de temps due au séchage avant tamisage, risque d'agglomération des particules par séchage. À partir de l'échantillon pour laboratoire, il est donc préparé deux échantillons pour essai.

L'un de masse M_{1h} pour déterminer la masse sèche de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique, l'autre de masse M_h pour effectuer l'analyse granulométrique.

- pesée des deux échantillons M_{1h} et M_h ;
- séchage à l'étuve jusqu'à masse constante (c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives de l'échantillon, séparées d'une heure, ne diffèrent pas de plus de 0,1 %) du premier échantillon M_{1h} et pesée, soit M_{1s} sa masse sèche.

La masse sèche (M_s) de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique est calculée de la manière suivante :

$$M_s = \frac{M_{1s}}{M_{1h}} M_h$$

I.2.5.2. Tamisage

- Verser le matériau lavé et séché dans la colonne de tamis. Cette colonne est constituée par l'emboîtement des tamis, en les classant de haut en bas dans l'ordre de mailles décroissantes.
- Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne, puis reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture en adaptant un fond et un couvercle. On agite chaque tamis en donnant à la main des coups réguliers sur la monture. D'une manière générale, on peut considérer qu'un tamisage est terminé lorsque le refus sur un tamis ne se modifie pas de plus de 1 % en une minute de tamisage.
- Verser le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur.

I.2.5.3. Les Pesées

- Le refus maximum admissible sur chaque tamis doit être inférieur à : 100 g si d < 1 mm, 200 g si d compris entre 1 et 4 mm et 700 g si d > 4 mm.

- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille. Soit R1 la masse de ce refus.
- Reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur ; ajouter le refus obtenu à R1 et peser l'ensemble. Soit R2 la masse des deux refus cumulés.
- Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés R3, R4, ..., Ri, ..., Rn.
- Peser s'il y en a, le tamisât au dernier tamis. Soit Tn sa masse.
- Si après essai, les résultats montrent qu'un (ou plusieurs) tamis a (ont) été surchargé(s), l'essai doit être refait manuellement à partir de ce tamis.

I.2.6. Expression des résultats

Les résultats des différentes pesées cumulées sont portés sur une feuille d'essai.

Les masses des différents refus cumulés Ri, sont rapportées à la masse totale calculée de l'échantillon pour essai sec Ms et les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus,

$$\frac{R_i}{M_s} 100$$

Inscrits sur la feuille d'essai. Les pourcentages de tamisats correspondants sont égaux à

$$100 - \left(\frac{R_i}{M_s} 100 \right)$$

I.2.7. Présentation des résultats

Les pourcentages de tamisats cumulés ou ceux des refus peuvent être présentés soit sous forme de tableau (exploitation statistique), soit le plus souvent sous forme de courbe.

Tracé de la courbe :

Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisats ou des différents refus cumulés sur la feuille de papier semi-logarithmique.

En abscisse : les dimensions des mailles, sur une échelle logarithmique.

En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.

La courbe représentant la distribution granulométrique des éléments doit être tracée de manière continue et peut ne pas passer rigoureusement par tous les points.

I.3. Mesure du coefficient d'aplatissement NA 256 / 1990

I.3.1. Objet

La présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination du coefficient d'aplatissement d'un échantillon de granulats dont les dimensions sont comprises entre 4 et 50 mm.

I.3.2. Domaine d'application

La présente norme s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle, utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil.

I.3.3. Généralités

I.3.3.1. Définitions

La forme d'un élément est définie par trois dimensions principales :

Longueur L = le plus grand écartement d'un couple de plans tangents parallèles.

Épaisseur E = le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles.

Grosseur G = dimension de la maille carrée minimale à travers laquelle passe l'élément.

Le coefficient d'aplatissement A d'un lot de granulats soumis à l'essai est, par définition, le pourcentage des éléments tels que : $(G/E > 1.58)$

I.3.3.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à effectuer un double tamisage :

- Tamisage sur tamis à mailles carrées, pour classer l'échantillon étudié en différentes classes d/D (avec $D = 1,25 d$), suivant leur grosseur G.
- Puis tamisage des différentes classes granulaires d/D, sur des grilles à fentes parallèles d'écartement : $(d/1.58)$

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire d/D correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes d'écartement $d/1,58$, exprimé en pourcentage.

Le coefficient d'aplatissement global de l'échantillon est égal à la somme pondérée des coefficients d'aplatissement des différentes classes granulaires d/D composant l'échantillon.

I.3.3.3. Appareillage

I.3.3.4. Appareillage d'usage courant

Appareillage courant et spécifique de la norme P 18-553.

La détermination des classes granulaires s'effectue sur les tamis à mailles carrées utilisés pour l'analyse granulométrique définie par la norme P 18-560. On utilise les tamis de dimensions d'ouverture de maille de :

50 - 40 - 31,5 - 25 - 20 - 16 - 14 - 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 5 et 4 mm.

I.3.3.5. Appareillage spécifique

Pour la détermination du coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire, on utilise une série de grilles, constituées par des barres cylindriques parallèles fixées dans un châssis carré. Les écartements intérieurs des barres sont respectivement de :

31,5 - 25 - 20 - 16 - 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 5 - 4 - 3,15 et 2,5 mm.

Pour chaque grille, l'ouverture des fentes ainsi définies doivent satisfaire aux conditions suivantes ;

Il ne doit pas y avoir plus de 10 % de la longueur totale des fentes dont l'écartement diffère de 0,25 mm de l'écartement nominal.

En aucun point des fentes, la largeur de fente ne doit s'écarter de 0,5 mm de la dimension nominale.

I.3.4. Préparation de l'échantillon pour l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme P 18-553. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0,2D$, avec M exprimé en kilogrammes et D , plus grande dimension spécifiée, exprimé en millimètres.

L'échantillon est passé sur un tamis de 4 mm, la masse M_0 du refus est déterminée avec une précision relative de 0,1 %.

I.3.5. Exécution de l'essai

I.3.5.1. Tamisage sur tamis à mailles carrées

Procéder au tamisage de l'échantillon par voie sèche sur les tamis en se conformant aux prescriptions de la norme P 18-560.

Recueillir les différentes fractions d/D ; peser chaque classe granulaire avec une précision relative de 0,1 %.

I.3.5.2. Tamisage sur grilles à fentes :

Tamiser chaque classe granulaire obtenue par l'opération précédente sur une grille dont l'écartement E entre les barres est défini par le tableau de correspondance ci-dessous :

Tableau.I.1.L'écartement entre les barres des séries des grilles

Classe granulaire d/D		Écartement E
	> 50	31,5
40	— 50	25
31,5	— 40	20
25	— 31,5	16
20	— 25	12,5
16	— 20	10
12,5	— 16 (1)	8
10	— 12,5	6,3
8	— 10	5
6,3	— 8	4
5	— 6,3	3,15
4	— 5	2,5

(1) Ou 14 pour le 10 — 14 mm.

Le tamisage sur les grilles se fait manuellement.

Peser avec une précision relative de 0,1 % le passant sur la grille correspondante à chaque classe granulaire d/D.

I.3.6. Expression des résultats

Les résultats sont portés sur des feuilles d'essai dont un exemple est donné en annexe

A. Les notations suivantes sont utilisées :

M_g = Masse de chaque classe granulaire d/D, en grammes.

$M = \sum M_g$ (ce chiffre peut être légèrement inférieur à M_0 mais ne doit pas s'en écarter de plus de 2 %).

M_e = Masse des éléments de chaque classe granulaire d/D passant sur la grille correspondante, définie par le tableau du paragraphe 6.2.

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par :

$$\frac{M_e}{M_g} 100$$

Le coefficient d'aplatissement global A est donné par :

$$A = \frac{\sum M_e}{M} 100$$

I.4. Los Angeles NA 5130

I.4.1. Objet

La mesure de la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats.

I.4.2. Domaine d'application

Elle s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil.

I.4.3. Mode opératoire

I.4.4. Préparation de l'échantillon

- ✓ Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.
- ✓ Laver le matériau tamisé et le séché à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante. La masse pour essai sera de 5000 g \pm 5 g.

I.4.5. Exécution de l'essai

Introduire avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour essai dans le cylindre de la machine. Faire effectuer à la machine 500 rotations (15 mn). La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci-après :

Tableau.I.2.Masse de la charge et nombre de boulets correspondant aux différentes classes granulaires

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)	
4 - 6,3	7	3080	+ 20 à -150
6,3 - 10	9	3960	
10 - 14	11	4840	
10 - 25	11	4840	+20 à -150
16 - 31,5	12	5280	
25 - 50	12	5280	

I.4.6. Résultats

- ✓ Recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil ;
- ✓ Tamiser le matériau sur le tamis de 1,6 mm et le laver;
- ✓ Egoutter et sécher à l'étuve à 105 °C ;
- ✓ Peser le refus une fois séché soit m' le résultat de la pesée.

I.4.7. Equipement

- ✓ Tamis de 1,6-4-6,3-10-14-16-20-25-31,5-40-50 ;
- ✓ Appareil Los Angeles ;
- ✓ Un bac ;
- ✓ Etuve ;
- ✓ Balance de précision.

I.4.8. Formule de calcul

$$LA = 100 \frac{m}{M}$$

M : masse du matériau soumis à l'essai

$m = (5000 - m')$: masse sèche des éléments inférieur à 1,6 mm produits au cours de l'essai

I.5. Micro-Deval NA 5129

I.5.1. Objet

La mesure de la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats produite par frottements mutuels, en présence d'eau et d'une charge abrasive, dans un cylindre en rotation.

I.5.2. Périmètre

Elle s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

I.5.3. Mode opératoire

I.5.3.1. Préparation de l'échantillon

- ✓ Laver l'échantillon et le séché à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.
- ✓ Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand. La masse pour essai sera de 500 g \pm 2 g.
- ✓ L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme NF P 18-553 (préparation d'un échantillon pour essai).

I.5.3.2. Exécution de l'essai

Introduire dans le cylindre d'essai, disposé ouverture vers le haut, la charge abrasive correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour essai et 2,5 litre d'eau. Faire effectuer à la machine 12000 rotations (soit 2 heures).

La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci-après :

Classes granulaires (mm)	la charge abrasive (g)
4 - 6,3	2 000 \pm 5
6,3 - 10	4 000 \pm 5
10 - 14	5 000 \pm 5

I.5.4. Résultats

- ✓ Recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac en ayant soin d'éviter les pertes de granulat ;
- ✓ Laver soigneusement à la pissette l'intérieur du cylindre en recueillant l'eau et les parties minérales ;

- ✓ Tamiser le matériau sur le tamis de 1,6 mm et le laver; la charge abrasive sera retenue sur un tamis de 8 mm ;
- ✓ Egoutter et sécher le refus à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante; Peser le refus une fois séché au gramme près ; soit m' le résultat de la pesée.

I.5.5. Equipement

- ✓ Tamis de 1,6 - 4 - 6,3 - 10-14 et 14 mm ;
- ✓ Appareil Micro – Deval, Charges abrasives ;
- ✓ Un bac, Etuve ;
- ✓ Balance de précision.

I.5.6. Formule de calcul

$$\text{MDE} = 100 m/500$$

$m = (500 - m')$: masse sèche des éléments inférieur à 1,6 mm produits au cours de l'essai.

ANNEXE.II.

ESSAIS SUR BITUME

II.1. Essai de pénétrabilité NA 5192

II.1.1. Objet

Le présent mode opératoire a pour objet la détermination de la pénétrabilité à l'aiguille des produits bitumineux.

II.1.2. Mode opératoire

II.1.2.1. Préparation de l'échantillon

- ✓ Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il soit fluide ;
- ✓ Verser l'échantillon dans le gobelet préchauffé (La hauteur de l'échantillon doit être ≥ 10 mm à la profondeur à laquelle l'aiguille est susceptible de pénétrer ;
- ✓ Protéger le gobelet et son contenu de la poussière par un couvercle et le laisser à la température 20°C-30°C pendant 1h30-2h00 ;
- ✓ Placer ensuite le gobelet dans un bain d'eau à 25°C pendant 1h30 à 2h00.

II.1.2.2. Exécution de l'essai :

- ✓ Placer la prise d'essai dans le récipient de transfert et le mettre sur le plateau du pénétromètre ;
- ✓ Déplacer l'aiguille chargée (100grs \pm 0.1grs) pour qu'elle affleure la surface de la prise d'essai ;
- ✓ Ramener à 0 l'aiguille du cadran ;
- ✓ Libérer l'aiguille pendant la durée spécifiée de 5s \pm 0.1s et la bloquer aussitôt et mesurer la profondeur ;
- ✓ Effectuer 3 mesures avec la même aiguille ;
- ✓ A chaque mesure, replacer la prise d'essai et le récipient de » transfert dans le bain d'eau.

II.1.3. Résultats

Noter la moyenne arrondie à l'unité de la plus proche des résultats de 3 mesures effectuées.

II.1.4. Equipement

- ✓ Gobelets ;
- ✓ Aiguilles conforme aux spécifications ;
- ✓ Pénétromètre ;
- ✓ Bain d'eau thermostatique ;
- ✓ Thermomètre ;
- ✓ Récipient à gobelet.

II.1.5. Formule de calcul

La moyenne des 3 mesures

II.2. Essai de ductilité NA 5223

II.2.1. Objet

Le présent mode opératoire a pour objet la détermination de la ductilité des produits bitumineux.

II.2.2. Mode opératoire

II.2.2.1. Préparation de l'échantillon

- ✓ Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il devient fluide ;
- ✓ Enduire le moule d'un mélange de dextrine et de glycérine ;
- ✓ Verser l'échantillon dans le moule et le laisser refroidir pendant 30min à 40 min ;
- ✓ Placer le moule dans un bain d'eau pendant 30min à 25°C ;
- ✓ Eliminer l'excès avec un couteau ;
- ✓ Placer le moule dans le ductilimètre et le laisser pendant 1h30 à 25°C.

II.2.2.2. Exécution de l'essai

Effectuer l'étirage à une vitesse de 50mm/min jusqu'à la rupture.

II.2.3. Résultats

- ✓ Mesurer en cm la distance dont il a fallu écarter les pattes d'attache pour provoquer la rupture ;
- ✓ volume occupé par cet échantillon.

II.2.4. Equipement

- ✓ Moule ;
- ✓ Appareil d'essai ;
- ✓ Bain thermostatique.

II.2.5. Formule de calcul

C'est la valeur mesurée en cm

II.3. Essai de ramollissement billes et anneaux NA 2617

II.3.1. Objet

Le présent mode opératoire a pour objet la détermination de la pénétrabilité à l'aiguille des produits bitumineux.

II.3.2. Mode opératoire

II.3.2.1. Préparation de l'échantillon

- ✓ Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il soit fluide ;
- ✓ Verser l'échantillon dans deux anneaux préchauffés et reposants sur une plaque enduite d'un mélange de glycérine et de dextrine pour éviter l'adhérence du produit ;
- ✓ Laisser refroidir 30min au moins ;
- ✓ Enlever l'excès du produit par arasement avec une spatule chauffée.

II.3.2.2. Exécution de l'essai

- ✓ Assembler l'appareillage avec les anneaux, les guides et thermomètre spécifié en position correcte ;
- ✓ Remplir le vase avec de l'eau distillée ;
- ✓ Placer les billes d'acier au centre de chaque anneau ;
- ✓ Chauffer à vitesse de 5°C/min.

II.3.2.3. Résultats :

Noter la température à laquelle l'échantillon enveloppant la bille touche la plaque du support.

II.3.3. Equipement

- ✓ Anneaux ;
- ✓ Support d'anneaux -Bain thermostatique ;
- ✓ Guides ;
- ✓ Thermomètre ;
- ✓ Billes en acier.

II.3.4. Formule de calcul

La moyenne des 2 mesures

ANNEXE.III.
CLASSIFICATION DES
MATERIAUX

III.1. Les catégories de sable et de gravillon

Les différentes catégories des sables et des gravillons sont présentés dans les tableaux :

Tableau.III.1. Les catégories des sables

Catégorie	Granularité		ES 10%	VB si ES10% Non obtenu
	Position du fuseau	Etendue maximale du fuseau		
a	refus à $1.58D=0$	10% à D et à 0.5mm 15% à 2mm et 4mm	≥ 60	≤ 1
b			≥ 50	≤ 1.5
c			≥ 40	≤ 2

Tableau.III.2. Les catégories des gravillons

catégorie	Granularité		A* ou Em		propreté	
	Fuseau de spécification (position)	Fuseau de régulation (étendue)				
I	Refus à $1.25D=0\%$.Refus à D 1 à 15% (1 à 20 % si $>D1.58d$)	Etendue maximale 10% à d	≤ 10	$\geq (D+d)/3$	≤ 0.50
Ibis		.Tamisât à d	10% à D	≤ 15	$\geq (D+d)/3.5$	≤ 1
II		.tamisât à $0.63d < 3\%$ ($< 5\%$ si $D \leq 5mm$)	25% à $(D+d)/2$	≤ 20		≤ 2
III	Refus à $1.58D=0\%$	si $D \geq 2.5d$ tamisât à $(D+d)/2=33$ à 66%		≤ 30		≤ 3

III.2. Classement des granulats

A partir des essais de **Los Angles** et **Micro-Deval** sur les granulats destinés aux travaux routiers, les gravillons sont classés suivant les cinq catégories de résistance mécanique du tableau (1).

L'appartenance à une catégorie, nécessite de satisfaire simultanément :

- ✓ A la somme des valeurs de LA et de MDE
- ✓ Aux valeurs de LA et MDE du tableau

Tableau.III.3. Classement des granulats selon la norme P18-101

catégorie	LA +MDE	LA	MDE
A	≤25	≤20	≤15
B	≤35	≤25	≤20
C	≤45	≤30	≤25
D	≤55	≤35	≤30
E	≤80	≤45	≤45
F	>80	>45	>45

Lorsque la catégorie F est retenue, les limites supérieures doivent obligatoirement être fixées

III.3. Classification des bitumes purs

Le tableau (4) présente la classification des bitumes purs suivant leur pénétrabilité :

Tableau.III.4. Classification des bitumes purs

Spécifications des bitumes routiers de grades 20/30 à 160/220	Unité	Désignation des classes appropriées				
		20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Pénétrabilité à 25 °C	0,1mm	20-30	35-50	50-70	70-100	160-220
Point de ramollissement	°C	55-63	50-58	46-54	43-51	35-43
Densité relative à 25°C	-	1.00 à 1.10			1.00 à 1.07	
Ductilité à 25°C	cm	> 25	>60	>80	>100	>100
pénétrabilité restante après durcissement, minimum	%	55	53	50	46	37
point de ramollissement après durcissement, minimum	°C	57	52	48	45	37
augmentation du point de ramollissement, maximum	°C	8	8	9	9	11
Point d'éclair, minimum	°C	240	240	230	230	220
Solubilité, minimum	%	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Teneur en paraffines, maximum	%	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

ANNEXE.IV.

ESSAIS SUR ENROBES

BITUMINEUX

IV.1. Essai Marshall NF P 98-251-2

IV.1.1. Objet

Ces essais et déterminations sont effectués d'une part en vue de l'étude préalable de recherche de la meilleure composition à adopter pour la confection d'un enrobé ou béton hydrocarboné, d'autre part, en vue du contrôle de la constante du produit en cours de fabrication.

IV.1.2. Contrôles de Fabrication

L'étude du matériau enrobé avec des teneurs en liant variables permet de déterminer l'évolution de la compacité en fonction de la teneur en liant. On montre aisément que celle-ci varie assez rapidement dans le domaine des teneurs en liant usuelles. On peut donc en sens inverse déduire la teneur en liant de la compacité des éprouvettes Marshall confectionnées avec des matériaux prélevés sur la fabrication, d'un poste d'enrobage : c'est un moyen de contrôle commode, qui suppose cependant qu'on est assuré d'une constante suffisante de la composition de l'agrégat. La mesure des stabilités Marshall de telles éprouvettes peut fournir un second élément, de contrôle, se rapportant davantage à l'agrégat qu'à la teneur en liant.

IV.1.3. Principe et définition

L'essai de stabilité Marshall est un essai de compression exercée suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique semi-frettée. Cette compression est appliquée sur l'éprouvette après 1/2 h d'immersion dans l'eau à 60 °C, et à la vitesse de 0,846 mm/s.

On appelle « stabilité Marshall » la charge en Kilogrammes, atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette.

En même temps que l'on applique l'effort de compression, on mesure la déformation à l'aide d'un appareil se composant d'un manchon de guidage et d'un indicateur de fluage.

On appelle déformation Marshall, la diminution du diamètre vertical qui est atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette. Cette déformation est exprimée en 1/10 de mm.

Par des mesures de dimensions et de poids de l'éprouvette après confection on détermine la densité apparente et, connaissant la densité du liant et des agrégats, on calcule le pourcentage de vides occupé par le liant.

On appelle proportion des vides occupés par le liant, le pourcentage volumique des vides de l'agrégat comblé par le liant.

IV.1.4. Le domaine d'application

Les essais Marshall peuvent être effectués pour tous les enrobés hydrocarbonés. Il y a cependant une restriction en ce qui concerne la dimension maximum des agrégats, ceux qui doivent tous passer au module 45 (tamis de 25 mm ou passoire 31,5 mm).

Il y a lieu aussi de tenir compte de la nature du liant pour la confection des éprouvettes, le mode opératoire n'étant décrit que pour un matériau enrobé à chaud au bitume pur.

IV.1.5. Appareillage

- ✓ 1 presse développant 2 tonnes, sensible au Kilogramme, équipée d'un dispositif d'application de la compression à la vitesse de 0,846 mm/s ;
- ✓ Généralement on emploie une presse C.B.R. équipée d'un anneau dynamométrique d'une tonne (dans le cas où la pression d'écrasement est supérieure à une tonne, on utilisera de préférence un anneau des 2 tonnes, plutôt que d'extrapoler la courbe de l'étalonnage de l'anneau d'une tonne), d'un piston de compression à appui à billes, d'un indicateur de cadence à 0,846 mm/s complété par un « contrôleur de cadence »
- ✓ 1 appareillage Marshall ou mieux, 2 moules de compactage, 2 dames, 1 piston extracteur, 2 appareils de stabilité, d'un appareil pour mesurer la déformation (indicateur de fluage).

L'appareillage Marshall comprend :

1 moule de compactage (1 hausse, 1 moule, 1 paquet de base).

La plaque de base et la hausse s'adapte indifféremment aux 2 ouvertures du moule proprement dit ;

- 1 piston extracteur ;
- 1 dame de comptage

Le comptage est réalisé par les coups répétés du marteau pesant 4,5 Kg et tombant verticalement d'une hauteur de 45 cm. Chaque coup porte sur la presque totalité de la surface de l'éprouvette.

- 1 appareil de stabilité Marshall.

La mâchoire semi-cylindrique supérieure coulisse librement sur les 2 tiges de guidage.

Lorsqu'une éprouvette est placée entre les mâchoires les extrémités en regard de ces dernières doivent être à 19,1 mm l'une de l'autre.

- 1 indicateur de fluage petit appareil à vernier coulissant, gradué en 0,5mm, qui s'adapte lors de la mesure à une des tiges de guidage.
- Bain d'eau thermostatique réglé à 60 °C. +/- 0,5 et pouvant contenir simultanément sur un support perforé au moins 4 éprouvettes complètement immergées et 2 appareils de stabilité Marshall.
- 2 étuves, l'une réglée entre 175 °C et 190 °C, l'autre réglée à 140 °C ;
- Récipients de 2 000 m³ de capacité pour le chauffage et le malaxage des agrégats et du liant ;
- Spatules ou grandes cuillers en métal ;
- 1 balance de portée minimum 3 Kg et sensible à 5 dg ;
- 1 paire de gants appropriée à la manipulation à chaud du matériel
- Disques papier filtre de diamètre 10 cm, texture moyenne de préférence ;
- Glycérine technique ;
- 1 thermomètre industriel 0°C à 200 °C avec tige plongeante et 13 cm pour le contrôle de la température de l'enrobé ;

IV.1.6. Mode opératoire

En raison de la dispersion de l'essai, on confectionnera au moins quatre éprouvettes pour chaque formule étudiée.

IV.1.7. Préparation des éprouvettes

Dans un récipient métallique de 2 000 m³ de capacité environ, placé sur le plateau d'une balance on pèse successivement les quantités fixées des différents agrégats, filler compris. Ces quantités sont calculées de manière à obtenir une gâchée de 1 200 g environ (liant compris). On mélange énergiquement et on porte le récipient et son contenu dans une étuve réglée à 175-190 °C où ils séjourneront une heure.

Dans le dernier quart d'heure du chauffage des agrégats, on porte dans une étuve réglée à 140 °C les moules à confection (base, cylindre et hausse montés), la dame de compactage, le piston extracteur.

Dans un second récipient, de 2 000 cm³, on pèse la quantité prévue de liant, et on chauffe celui-ci par exemple dans l'étuve réglée à 140 °C, de manière à lui conférer la fluidité nécessaire à l'enrobage, sans qu'il atteigne la température où la vaporisation des huiles devient excessive (le bitume ne doit pas émettre de vapeurs).

On retire d'abord de son étuve, le récipient contenant le liant, puis les agrégats, et l'on verse ceux-ci dans le récipient du liant. On mélange la totalité à la cuiller. La

température du mélange ne doit pas être tombée au-dessous de 150 °C à la fin du malaxage. Si la température tombe au-dessous de cette valeur, on ne doit en aucun cas réchauffer le mélange, qui doit être rebuté.

Variante Tolérée

Le mélange pourra être effectué dans un malaxeur mécanique convenable par exemple du type à axe verticale et à contre-courant. Le malaxeur devra être tel que la ségrégation des matériaux soit réduite au minimum. Dans ce cas, on confectionnera 6 éprouvettes pour chaque mesure, au lieu de 4. On portera dans le malaxeur les agrégats chauffés à 175-190 °C, comme il a été indiqué, puis la quantité voulue de bitume. On vérifiera que la température ne tombe pas au-dessous de 125 °C à la fin du remplissage du dernier moule. On pourra utiliser un malaxeur chauffant, mais dans ce cas, on doit vérifier avec le plus grand soin qu'il ne se produit pas de surchauffe au sein du matériau durant le malaxage, et le chauffage du malaxeur devra être aussi modéré que possible.

Dans le cas où l'on utilise un malaxeur mécanique, on devra avoir un jeu complet de 6 moules, bases et pistons.

Dans ce cas, pour éviter un refroidissement excessif du mélange on pourra réintroduire celui-ci dans l'étuve à 140 °C, après malaxage pour une durée de 15 minutes au maximum.

On sort de l'étuve le moule à confection. On l'enduit intérieurement d'une légère couche d'oléate de soude de glycérine, puis on place dans le fond 2 disques de papier filtre.

On verse plusieurs fois la gâchée, en tassant à chaque fois avec la cuiller.

On égalise la surface avec la surface extracteur, auquel on communique un léger mouvement de rotation. On place un disque de papier filtre sur le mélange et on dame à raison de 50 coups sur chaque 2 bases de l'éprouvette. Pour cela, il est préférable de placer le moule sur un support de fixation, à 50 cm au-dessus du sol. On maintient fermement à la verticale la tige de la dame et on laisse tomber 50 fois sur le marteau. On démonte et remonte le moule en intervertissant la base et la hausse. On répète à nouveau le damage.

On enlève la base.

On place l'éprouvette toujours dans son moule sous un robinet d'eau pendant 5 minutes, afin d'accélérer le refroidissement. (L'éprouvette est couchée et l'eau coule sous le moule.)

Pour démouler, on fait passer l'éprouvette dans la hausse, dont le diamètre est légèrement plus grand que celui du moule proprement dit, en s'aidant du piston extracteur et de la presse.

L'éprouvette, qui doit être manipulée avec soin, est numérotée et laissée pendant une heure au moins à l'air libre afin d'être amenée à la température ambiante. Elle doit avoir une hauteur de 63,5 mm à 5 mm près. Si on utilise des gâchées de 1 150 à 1 175 g les hauteurs des éprouvettes sont presque toujours dans ces limites.

Si cette tolérance n'est pas respectée, on doit modifier en conséquence le poids de la gâchée à placer dans le moule. Les disques de papier filtres qui restent collés sur les bases ne sont pas retirés.

Pendant ce temps, on passe à la confection des autres éprouvettes. Il est pratique d'avoir 2 dames et 2 moules à confection.

Un jeu peut alors être placé en étuve pendant que l'autre est utilisé. Le bitume et les agrégats sont, bien entendu, laissés en étuve durant les temps morts de confection des éprouvettes. Le nettoyage de la base et de l'intérieur des moules se fait au moyen d'un chiffon imbibé de pétrole.

IV.2. Détermination de la Densité apparente

Après refroidissement, on mesure au 1/10 de mm près les dimensions des éprouvettes (au moins 6 hauteurs et 3 diamètres) et on pèse à 5 dg près. Le rapport poids sur volume donne la densité apparente. Dans le cas où la surface est irrégulière, il est recommandé de déterminer la densité apparente par la méthode de la balance hydrostatique (pesées dans l'air et dans l'eau, mais sans paraffinage de l'éprouvette). Cette méthode peut cependant échouer si la surface est trop poreuse.

IV.3. Essai de stabilité et de déformation

Après confection des éprouvettes, celles-ci sont conservées pendant 5 heures (heure) à la température ambiante puis on les immerge dans le bain thermostatique réglé à 60 °C 0,5 °C avec l'appareil d'essai, pour une durée de 30 mn (± 1 min).

Pendant ce temps, on donne, entre le plateau et l'appui à bille de la presse C.B.R. l'écartement juste nécessaire pour placer l'appareil Marshall. On installe également le dispositif contrôleur de cadence réglé pour une vitesse de 0,846 mm/s. On retire de l'eau l'appareil Marshall.

On lubrifie à la glycérine les tiges de guidage et la mâchoire supérieure devra pouvoir glisser sans heurts sur les tiges de guidages. On enlève cette dernière.

Ces préparatifs préliminaires sont indispensables car le temps écoulé entre l'instant où l'éprouvette est retirée du bain d'eau et celui de la mesure de la stabilité doit être inférieur à 30 secondes.

L'éprouvette retirée de l'eau est placée immédiatement dans la mâchoire inférieure de l'appareil d'essai, couchée et bien centrée. On adapte la mâchoire supérieure et on place le tout sur la presse C.B.R. en veillant à tout ce que l'appui à bille soit juste en regard de son point d'appui sur la mâchoire (petite concavité). On amène en contact la bille et la mâchoire ; le comparateur de l'anneau dynamométrique permet d'apprécier ce contact.

On règle le comparateur au zéro. On adapte l'indicateur de fluage sur l'une des tiges de guidages, en assurant fermement son contact avec la mâchoire supérieure. On note la division indiquée. Deux opérateurs sont nécessaires pour cette phase de l'essai ; l'un manœuvre la presse à la cadence imposée, l'autre surveille le comparateur de l'anneau dynamométrique tout en maintenant appuyé l'appareil pour la mesure de la déformation. Quand tout est prêt, on manœuvre le volant de la presse pour suivre la cadence. La rupture se produit au moment où le comparateur de l'anneau dynamométrique indique un maximum. En lisant ce maximum, il faut libérer en même temps, l'appareil de mesure de déformation.

La courbe d'étalonnage de l'anneau dynamométrique permet de convertir le chiffre maximum relevé sur le comparateur en charge exprimée en Kg.

Cette valeur est corrigée, pour tenir compte du volume de l'éprouvette, il suffit de la multiplier par un coefficient de corrélation, celui-ci correspond à la hauteur de l'éprouvette

IV.4. Tenue à l'eau des enrobés bitumineux à chaud

IV.4.1. Mode opératoire de CTTP

IV.4.1.1. Objet

La présente mode opératoire spécifier une méthode d'essai ayant pour but de déterminer la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud à partir des rapports de stabilité avec et sans immersion des éprouvettes mesure par l'essai Marshall selon la norme (ASTM-D1559).

IV.4.1.2. Domaine d'application

Le mode opératoire s'applique aux mélanges hydrocarbonés à chaud fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier utilisés dans le domaine de travaux publics.

IV.4.1.3. Principe de l'essai

Les éprouvettes utilisées à réalisation de l'essai sont fabriqués selon la norme Marshall (ASTM-D1559).concernant la phase d'écrasement pour la mesure des stabilités, les éprouvettes sont soumises à l'essai Marshall après conservation dans des conditions définies, après 24 h à l'air pour certaine éprouvettes, après 7 jours d'immersion pour d'autres éprouvettes.

IV.4.1.4. Mode opératoire

Le nombre des éprouvettes utilisé pour l'essai est de 6.

IV.4.1.5. Conservation des éprouvettes sans immersion

3 éprouvettes sont conservées sans immersion sur une surface plane à la température ambiante pendant 24h.

IV.4.1.6. Conservation des éprouvettes avec immersion

Les 3 autres éprouvettes de mémé composition, après la phase de maturation sont soumises à un traitement de dégazage qui consiste à appliquer une pression résiduelle de 120mm Hg \pm 5%.l'eau est ensuite introduite jusqu'à l'immersion complète des éprouvette tout en maintenant la pression résiduelle de 120mm Hg \pm 5%.ces éprouvettes sont maintenues immergées durant 2h sous la même pression. À la fin de cette opération le volume des éprouvettes est mesurées éprouvettes sont ensuite immergées dans l'eau à la température pouvant varier de 18°C à 25°C pendant 7 jours.

A la fin de cette opération on mesure le volume des éprouvettes.

IV.4.1.7. Mesure des stabilités

Les éprouvettes sont soumises à l'essai Marshall. Qu'elles aient été conservées avec ou sans immersion.

Les éprouvettes et les mâchoires sont immergées dans l'eau à $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ pendant $30\text{min}\pm 1\text{min}$.

La vitesse de plateau de la presse est réglée à 0.85mm/s.

IV.4.2. Expression des résultats

On établit le rapport de la stabilité avec 7 jours en immersion (RCimm) à la stabilité sans immersion (RCsec).

Le rapport (RCimm/RCsec) est exprimé avec deux chiffres significatifs.

IV.4.3. Les spécifications Algérienne sur les enrobés bitumineux

Les spécifications relatives aux caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux à chaud sont données, selon la classe du bitume, dans le tableau suivant :

Tableau.IV.1.Les performances mécaniques des BBSG 0/14 et GB 0/20

Caractéristiques	Classes de bitume							
	80/100		60/70		40/50		20/30	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Sm	8.5	-	9.5	-	10.5	-	12.5	-
Fm	-	4	-	4	-	4	-	4
%vide des BB SG 0/14	3	5	3	5	3	5	3	5

Les spécifications liées à la tenue à l'eau des enrobés bitumineux à chaud sont données, en fonction des zones climatique et du trafic.

Tableau.IV.2.Performances liées à la tenue à l'eau des BB 0/14 (zones 1 et 2)

Type d'enrobé	Caractéristiques	Zones I et II	
		Trafic (PL.JMA) <150	Trafic (PL.JMA) ≥150
BB 0/14	RC_{imm}/RC_{sec}	>0.70	>0.75

Tableau.IV.3.Performances liées à la tenue à l'eau des BB 0/14 (zones 3)

Type d'enrobé	Caractéristiques	Zones 3	
		Trafic (PL.JMA) <150	Trafic (PL.JMA) ≥150
BB 0/14	RC_{imm}/RC_{sec}	>0.40	>0.45