

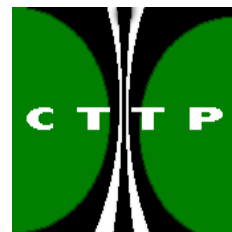
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil

Laboratoire Construction et Environnement



Mémoire de Magister en Génie Civil

Option: Construction et Environnement

Présenté Par :

RAHAB Khedidja

Ingénieur d'Etat en Génie Civil de l'ENP

Intitulé

Recyclage d'agrégats d'enrobés à divers taux, dans de nouvelles formulations d'enrobés

Soutenu publiquement le 30 septembre 2012 devant le jury composé de :

Président :	M ^r BELKACEMI	Smain	Professeur, ENP
Rapporteur :	M ^{me} MORSLI	Meriem	Maitre de conférences A, ENP
Examineurs :	M ^{me} KETTAB	Ratiba	Professeur, ENP
	M ^r HADDADI	Smail	Maitre de conférences A, USTHB
Invité :	M ^r MAGRAMANE	Djamel	Chargé de Recherche, CTTP, Alger

ENP 2012

Ecole Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères oudek, Hassan Badi, BP, 182, 16200. El-Harrach. Alger, Algerie.
www.enp.edu.dz

Remerciements

Au terme de cette étude, je tiens tout d'abord :

A remercier **ALLAH** pour m'avoir donné la force, la santé, la patience, les moyens et l'aide pour que je puisse accomplir ce modeste travail.

Je tiens à exprimer, en premier lieu, ma gratitude et ma reconnaissance à M^{me} Morsli Meriem, Maître de conférences à l'ENP d'Alger et qui m'a encadré et guidé pour l'accomplissement de cette tâche, pour ses conseils instructifs et son soutien moral pendant la préparation de ce mémoire.

Il m'est agréable aussi d'exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements aux personnes qui m'honorent en étant membre du jury, à noter :

Président : S. BELKACEMI, Professeur, ENP

Examineurs : R. KETTAB, Professeur, ENP

: S. HADDADII, Maître de Conférences A, USTHB

Directeur de Thèse : M. MORSLI, Maître de Conférences A, ENP, Alger

Invité : D. MAGRAMANE, Chargé de Recherche, CTTT, Alger

Je remercie aussi M^r Magramane Djamel chef de service produits noirs au CTTT qui m'a encadré et guidé durant la période du stage.

Je remercie très sincèrement, Mademoiselle Souhila Sadoun, doctorante à l'ENP, pour son soutien moral et intellectuel, ainsi que pour son apport très enrichissant dans ce mémoire.

J'adresse un grand remerciement à l'ensemble du personnel du laboratoire produits noirs du CTTT qui a contribué à la réalisation de la partie expérimentale, aussi m'a facilité rapidement l'intégration parmi eux, je citerai en particulier :

- M^r M. Debaghi, M^r D. Tazarourt, M^r H. Aksous, M^r M. Azouz, M^r A. Hadjarsi, M^r S. Deghiche, M^{me} F. Bakat, Ryma, Ali, M^{me} H. Boulmali, M^r Stihi

Aussi Je remercie beaucoup M^r M. Chahrat, Directeur de l'EVSM ainsi M^r Omar et M^r Azeddine d'avoir accepté de faire quelques essais dans le laboratoire.

Je tiens à examiner ma reconnaissance et mes respects à tous les enseignants de l'ENP qui ont contribué à ma bonne formation.

Enfin **J'**adresse mes sincères remerciements à ma famille et aux personnes qui ont contribué à la finalisation de ce modeste mémoire de magister.

Dédicace :

- A ma fierté mon père, qui a été toujours présent pour moi par son soutien et ses encouragements.
- A la source de ma vie, ma mère qui m'a appris l'éducation avant le savoir et qui n'a pas cessé de me soutenir durant toutes mes études.
- Que ce travail soit pour eux le symbole de ma reconnaissance pour leur aide qu'ils m'ont apporté durant toute ma vie.
- A mes chers frères et sœurs : Kamel, Samia, Khaled, Souad
- A ma chère belle sœur Farroudja et ses deux filles : Melissa, Yasmine.
- A mon oncle Nouar et sa petite famille.
- A mes tantes : Houria, Hassina, Nawel
- A ma grand-mère.
- A toute ma grande famille sans exception.
- A tous mes amis (ies)
- A tous ceux qui m'aiment

Je dédie ce modeste travail.

ملخص:

تركز الدراسة على تأثير معدل إعادة تدوير الركام الأسفلت على أداء المزيج النهائي. واستهدفت الأسفلت المستصلحة (AE) من طحن طبقات الرصف في المواد الهيدروكربونية، والأداء مارشال الاستقرار، زحف، نسبة الفراغ، ومقاومة للماء ومقاومة الشد غير المباشر.

والهدف من إعادة التدوير هو إنتاج المغلفة المغلفة مع الصفات مماثلة لتلك التي من الأسفلت الجديد إعادة استخدام قدر ممكن المواد المعاد تدويرها. لتلبية الأداء المتوقع، فمن الضروري أن يكون تعافى ممثل الأسفلت للموقع، حدد الكلي وكمية كافية الموثق للحصول على أقرب ما يمكن إلى صياغة ما يعادل الأسفلت الجديد.

كلمات البحث: إعادة التدوير والركام، الموثق، صياغة، والشيخوخة، المضروب، اختبار الميكانيكية

Résumé:

L'étude porte sur l'influence du taux de recyclage des agrégats d'enrobés sur les performances de l'enrobé final. Les agrégats d'enrobés (AE) proviennent du fraisage des couches de chaussée en matériaux hydrocarbonés ; les performances ciblées sont la stabilité Marshall, le fluage, le pourcentage de vide, la tenue à l'eau et la résistance à la traction indirecte.

L'objectif du recyclage des enrobés est de fabriquer un enrobé ayant des qualités comparables à celles d'un enrobé neuf en réutilisant le plus possible de matériaux récupérés. Pour répondre aux exigences de performances attendues, il est indispensable de disposer d'enrobés récupérés représentatifs du chantier, de choisir des granulats et un liant d'apport adéquats afin de se rapprocher le plus possible de la formulation de l'enrobé neuf équivalent.

Mots clés : Recyclage, Agrégats, Liant, Formulation, Vieillesse, Fraisât, Essais mécaniques

Abstract

The study focuses on the influence of the rate of recycling of asphalt aggregates on the performance of the final mix. The reclaimed asphalt (AE) from the milling of pavement layers in hydrocarbon materials, are targeted performance Marshall stability, creep, the percentage of void, the water resistance and the indirect tensile strength.

The aim of recycling is to produce a coated coated with qualities comparable to those of a new asphalt reusing as much as possible recycled materials. To meet expected performance, it is essential to have recovered asphalt representative of the site, select the aggregate and a binder intake adequate to get as close as possible to the formulation of new asphalt equivalent.

Keywords: Recycling, aggregates, binder, Formulation, Aging, milled, Mechanical Testing

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES CHAUSSEES.....	3
I.1.Historique.....	3
I.2.Constitution D'une Structure Routière.....	3
I.3.Les différents types de structures de chaussées.....	5
I.3.1. Les chaussées souples.....	5
I.3.2. Les chaussées semi rigides.....	6
I.3.3. Les chaussées rigides.....	6
I.4. Types d'endommagement d'une chaussée souple.....	6
I.5.Solutions aux dégradations.....	11
I.6. Les facteurs influençant sur les dégradations de la chaussée.....	12
I.6.1. Effet du trafic.....	12
I.6.2 Effet de la température.....	13
I.7.Conclusion.....	14
CHAPITRE II : LES ENROBES BITUMINEUX.....	15
II.1.Définition.....	15
II.2. Fabrication Des Enrobés Bitumineux.....	16
II.3. Les Moyens De Fabrication.....	16
II.4.Les Principaux Constituants De L'enrobé.....	18
II.4.1.Le Bitume.....	18
II.4.1.1.Origine et application.....	18
II.4.1.2. Composition chimique du bitume.....	19
II.4.1.3.Structures chimiques d'un bitume.....	19
II.4.1.4.Définitions des fractions.....	20
II.4.1.5.Fabrication des bitumes.....	21
II.4.1.6. Les essais de caractérisation des bitumes.....	23
II.4.1.7.Spécifications européennes des bitumes.....	28

Table Des Matières

II.4.1.8. Spécifications algériennes des bitumes.....	29
II.4.1.9. Choix de l'utilisation d'une classe de bitume.....	30
II.4.1.10. Évolution du bitume routier avec le temps.....	33
II.4.2. Les Granulats.....	34
II.4.2.1. Définition.....	35
II.4.2.2. Échantillonnage des granulats.....	35
II.4.2.3. Caractéristiques des granulats.....	36
II.5. Les Essais Sur Les Enrobés Bitumineux.....	37
II.5.1. Essai Duriez.....	37
II.5.2. L'essai Marshall.....	38
II.5.3. La Presse à Cisaillement Giratoire.....	39
II.5.4. L'essai de traction indirecte.....	40
II.5.5. L'essai d'orniérage.....	40
II.5.6. Essai de fluage statique uniaxial.....	41
II.5.7. les essais de module.....	41
II.5.8. Les essais de fatigue.....	43
II.6. Classification Des Enrobés Bitumineux.....	44
II.6.1. Classification Selon La Granulométrie.....	44
II.6.1.1. Les enrobés denses.....	44
II.6.1.2. Les enrobés semis – denses.....	45
II.6.1.3. Les enrobés ouverts.....	45
II.7. Formulation D'un Enrobé Bitumineux.....	45
II.7.1. Mélange granulaire.....	45
II.7.2. Teneur en liant.....	46
II.7.3. Quelques méthodes de formulation.....	47
II.7.3.1. Méthode CTTP (Algérie).....	47
II.7.3.2. Méthode LCPC (France).....	47
II.7.3.3. Facteurs influençant sur la formulation.....	50
II.8. Conclusion.....	51

CHAPITRE III : RECYCLAGE DES AGREGATS D'ENROBES	53
III.1. Introduction.....	53
III.2. Définition Et Origine Des Agrégats D'enrobes Bitumineux.....	54
III.3. Techniques De Recyclage.....	55
III.3.1 Les principaux types de recyclage des agrégats d'enrobes bitumineux.....	55
III.3.1.1 Le retraitement à froid.....	55
III.3.1.2. Le recyclage à chaud.....	56
III.4. Les Différents Types De Centrales D'enrobage.....	58
III.5. Enrobé Recyclé.....	59
III.5.1. Composition d'un enrobé contenant des agrégats d'enrobé.....	59
III.5.2.Taux de recyclage des enrobés recyclés.....	60
III.5.3. Formulation des enrobés recyclés.....	61
III.5.3.1.Correction des caractéristiques du liant d'agrégats d'enrobé par l'ajustement des caractéristiques du liant d'apport.....	61
1) Le principe.....	61
2) Les règles existantes.....	62
III.5.3.2. Correctionde granulométrie des granulats d'agrégats d'enrobé par l'ajout de granulats d'apport.....	63
III.5.3.3.Etude en laboratoire des enrobés bitumineux.....	63
III.5.3.4.Fabrication industrielle des enrobés recyclés.....	64
III.5.4.Rôle de bitume recyclé et du liant d'apport.....	66
III.6. Performances Mécaniques Des Enrobés Recyclés.....	68
III.6.1. Performance des enrobes recycles avec modification du liant d'apport.....	68
III.6.2. Performance des enrobes recycles avec modification du liant d'apport.....	68
II.7. Conclusion.....	69
CHAPITRE IV : IDENTIFICATION DES MATERIAUX	71
IV.1. Les Granulats.....	72
IV.1.1. Origine des granulats.....	72
IV.1.2. Caractéristiques intrinsèques des granulats.....	73
IV.1.3. Caractéristiques de fabrications des granulats.....	75

Table Des Matières

IV.1.4. Analyse granulométrique.....	76
IV.2. Le Bitume.....	78
IV.3. Les Agrégats d'Enrobés ou Fraisâts.....	81
IV.3.1. Etude granulométrique des fraisâts sans extraction du liant.....	82
IV.3.2. Etude granulométrique après extraction du liant.....	83
IV.3.3. Détermination de la teneur en liant.....	83
IV.3.4. Essais de caractérisation du liant (Pénétrabilité, TBA).....	85
IV.4. Conclusion.....	86
CHAPITRE V : FORMULATION D'UN ENROBE BITUMINEUX CLASSIQUE.....	87
V.1. Formulation Du Béton Bitumineux Semi Grenu 0/14.....	87
V.1.1. Choix du mélange granulaire.....	88
V.1.2. Détermination de la teneur optimale en bitume.....	90
V.1.3. Application numérique pour notre cas.....	90
1) Calcul de la surface spécifique des granulats.....	90
2) Calcul de la masse volumique réelle des granulats MVRg.....	91
3) Calcul du coefficient α	91
4) Calcul de la teneur en bitume.....	91
V.1.4. Essais de performances mécaniques.....	92
V.1.4.1. Essai Marshall.....	92
V.1.4.2. Essai Duriez.....	96
V.1.4.3. Essai de traction indirecte.....	99
V.1.5. choix de la formulation optimale.....	100
V.2. Conclusion.....	106
CHAPITRE VI : FORMULATION D'UN ENROBE BITUMINEUX RECYCLE.....	107
VI.1. Correction de la granulométrie des agrégats d'enrobé par ajout de granulats d'apport.....	108
VI.2. Correction des caractéristiques du liant d'agrégats d'enrobé par l'ajustement des caractéristiques du liant d'apport.....	109

Table Des Matières

VI.2.1. Quantité de liant d'apport.....	109
VI.2.2. Caractéristiques du liant d'apport.....	109
VI.3. Différents Formulations d'Enrobés Recyclé.....	111
VI.4. Conclusion.....	122
CHAPITRE VII : ANALYSE DES RESULTATS.....	123
VII. 1. Introduction.....	123
VII.2. Résultats Et Interprétations Des Essais Marshall.....	124
VII.2.1. Influence du taux des AE sur la stabilité Marshall.....	124
VII.2.2. Influence du taux des AE sur la masse volumique apparente de l'enrobé.....	125
VII.2.3 .Influence du taux des AE sur le fluage Marshall.....	126
VII.2.4. Influence du taux des AE sur le quotient Marshall.....	127
VII.2.5. Influence du taux des AE sur la compacité Marshall.....	128
VII.3. Résultats Et Interprétations Des Essais Duriez.....	129
VII.3.1. Influence du taux des AE sur la résistance à la compression à sec (18°C).....	129
VII.3.2. Influence du taux des AE sur la résistance à la compression en immersion.....	130
VII.3.3. Influence du taux des AE sur la tenue à l'eau.....	131
VII.4. Influence du taux des AE sur la Traction Indirecte.....	132
VII.5. Résumé Des Résultats Des Essais Marshall Et Duriez.....	133
VII.6. Conclusion.....	134
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	1

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Constitution d'une structure routière.....	4
Figure I.2. Chaussée souple [catalogue des chaussées, 1998].....	5
Figure I.3. Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques [Catalogue des chaussées, 1998].	6
Figure I.4.Orniérage.....	7
Figure I.5. Fissures de centre.....	7
Figure I.6.Fissures longitudinales.....	8
Figure I.7.Fissure transversale.....	8
Figure I.8.Fissures latérales.....	9
Figure I.9.Fissures polygonales.....	9
Figure I.10.Fissures sous forme de nid de poule.....	10
Figure I.11. Arrachement ou Déchaussement.....	10
Figure I.12.Ressuage.....	11
Figure I.13. Schématisation des sollicitations induites par le trafic [8].....	12
Figure II.1.vue en coupe d'un enrobé bitumineux montrant les granulats formant un squelette granulaire (gris) et le bitume liant ce squelette (noir).....	15
Figure II.2. Centrale d'enrobage discontinue de la marque ERMONT.....	17
Figure II.3. Centrale d'enrobage continue de la marque ERMONT.....	18
Figure II.4. Définition des fractions d'un bitume.....	20
Figure II.5.Composition du bitume.....	21
Figure II.6.Principe de fabrication des bitumes.....	22
Figure II.7. Essai de pénétrabilité.....	23
Figure II.8. Essai bille et anneau.....	24
Figure II.9.Essai densité relative.....	25
Figure II.10. Essai RTFOT.....	25
Figure II.11.Essai perte de masse au chauffage.....	26
Figure II.12.Essai FRAASS.....	27
Figure II.13.Essai point d'éclair.....	27
Figure II.14. Représentation des zones climatiques de l'Algérie.....	32
Figure II.15. Principe de l'essai Duriez.....	38
Figure II.16. Principe d'essai Marshall.....	38

Figure II.17. Droite de compactage PCG.....	39
Figure II.18. Principe de compactage à la PCG.....	39
Figure II.19. Principe de l'essai de traction indirecte.....	40
Figure II.20. Principe d'essai d'orniérage.....	40
Figure II.21. Variation de la déformation relative en fonction du temps.....	41
Figure II.22. Principe de l'essai de compression cyclique uniaxial sous confinement.....	41
Figure II.23. a) Exemple d'isothermes.....	42
b) Translation isothermes le long de l'axe des temps de charge	
Figure II.24.Exemple de la courbe maitresse à 15°C.....	42
Figure II.25. Exemple d'un essai de fatigue.....	43
Figure II.26. Essai de fatigue en flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales.....	43
Figure II.27. Procédure de formulation en France.....	48
Figure II.28. Pyramide des niveaux de l'épreuve de formulation.....	49
Figure III.1. Plaque d'enrobés.....	54
Figure III.2. Agrégat d'enrobés après concassage.....	54
Figure III.3. Présentation des possibilités de techniques de recyclage des chaussées bitumineuses Images empruntées (Serfass 2008).....	58
Figure III.4. Composition d'un enrobé recyclé et répartition de la participation des agrégats d'enrobé au liant et aux granulats de l'enrobé recyclé.....	60
Figure III.5. Principe de mélange de liants bitumineux possédants des caractéristiques différentes LAE et LA.....	62
Figure III.6.Couverture des lots d'agrégats d'enrobé pour limiter humidité et ensoleillement	65
Figure III.7.Principe du poste continu TSE avec recyclage à contre-courant.....	66
Figure III.8. Principe du poste continu TSE avec recyclage à équicourant.....	66
Figure IV.1. Les trois fractions granulaires.....	73
Figure IV.2. Essai de la masse volumique.....	74
Figure IV.3. Jarre Micro Deval.....	74
Figure IV.4. Machine Micro Deval.....	74
Figure IV.5. Machine Los Angeles.....	75
Figure IV.6. Série de tamis (0,08-20mm).....	76
Figure IV.7. Série de grille.....	77
Figure IV.8. Courbes granulométriques des fractions granulaires.....	77
Figure IV.9. Essai de densité relative.....	79

Figure IV.10. Appareil de l'essai de pénétrabilité.....	79
Figure IV.11. Appareil de l'essai Bille-Anneau.....	80
Figure IV.12. Essai de ductilité.....	80
Figure IV.13. Résultat d'essai d'adhésivité.....	81
Figure IV.14. Echantillon du fraisâts.....	81
Figure IV.15. Courbe granulométrique du fraisât avant extraction de bitume.....	82
Figure IV.16. Courbe granulométrique du fraisât après extraction de bitume.....	83
Figure IV.17. Appareil KUMAGAWA.....	84
Figure IV.18. Appareil d'extraction du perchlorure de la solution contenant le bitume vieilli.....	85
Figure V.1. Courbe granulométrique du mélange granulaire BBSG 0/14.....	89
Figure V.2. Etuve de chauffage.....	93
Figure V.3. Enrobé après malaxage.....	94
Figure V.4. Remplissage des moules Marshall.....	94
Figure V.5. Dame Marshall.....	95
Figure V.6. Eprouvettes Marshall.....	95
Figure V.7. Bain-Marie.....	96
Figure V.8. Presse Marshall.....	96
Figure V.9. Remplissage des moules Duriez.....	98
Figure V.10. Presse Duriez.....	98
Figure V.11. Eprouvettes Duriez.....	99
Figure V.12. Essai de traction indirecte.....	100
Figure VI.1. Courbe granulométrique du mélange granulaire avec 10% de fraisât.....	111
Figure VI.3. Courbe granulométrique du mélange granulaire avec 20% de fraisât.....	113
Figure VI.4. Courbe granulométrique du mélange granulaire avec 30% de fraisât.....	115
Figure VI.5. Courbe granulométrique du mélange granulaire avec 40% de fraisât.....	117
Figure VI.6. Courbe granulométrique du mélange granulaire avec 50% de fraisât.....	119
Figure VI.7. Eprouvettes après essai de traction indirecte à 20°C.....	121
Figure VI.8. Eprouvettes après essai de traction indirecte à 15°C.....	121
Figure VII.1. Stabilité Marshall en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât.....	124
Figure VII.2. Masse volumique apparente en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât.....	125
Figure VII.3. fluage Marshall en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât.....	126
Figure VII.4. Quotient Marshall en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât.....	127
Figure VII.5. Compactage d'un enrobé bitumineux.....	128

Liste Des Figures

Figure VII.6. Compacité Marshall en fonction de pourcentage de fraisât.....	128
Figure VII.7. Variation de la résistance à la compression à sec à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât.....	129
Figure VII.8. Variation de la résistance à la compression en immersion à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât.....	130
Figure VII.9. Variation de la tenue à l'eau en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât....	131
Figure VII.10. Variation de la traction indirecte en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât.....	132

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1. Spécifications européennes pour bitumes purs applicable pour la France.....	28
Tableau II.2. Caractéristiques des bitumes selon les spécifications du CTPP.....	29
Tableau II.3. Choix de la classe du bitume.....	31
Tableau II.4. Caractéristiques des zones climatiques.....	32
Tableau II.5. La masse minimale d'un échantillon global en fonction de la grande dimension D des éléments.....	36
Tableau IV.1. Provenance des granulats utilisés.....	72
Tableau IV.2. Caractéristiques intrinsèques des granulats.....	75
Tableau IV.3. Caractéristiques de fabrication des granulats.....	76
Tableau IV.4. Caractéristique du bitume.....	78
Tableau IV.5. Teneur en liant des fraisât.....	84
Tableau IV.6. Caractéristique du liant vieilli.....	86
Tableau V.1. Le fuseau de référence BB 0/14.....	88
Tableau V.2. Composition du mélange granulométrique.....	89
Tableau V.3. Calcul de la surface spécifique.....	91
Tableau V.4. Teneurs en bitume retenues.....	92
Tableau V. 5. % de vide (TL1).....	101
Tableau V.6. Résultats de stabilité et fluage Marshall.....	101
Tableau V.7. Résultats de la tenue à l'eau.....	102
Tableau V. 8. % de vide (TL2).....	102
Tableau V.9. Résultats de stabilité et fluage Marshall.....	103
Tableau V.10. Résultats de la tenue à l'eau.....	103
Tableau V.11. % de vide (TL3).....	104
Tableau V.12. Résultats de stabilité et fluage Marshall.....	104
Tableau V.13. Résultats de la tenue à l'eau.....	104
Tableau V.14. Résultat des essais Marshall.....	105
Tableau V.15. Résultat des essais Duriez.....	105
Tableau V.16. Tableau récapitulatif de la formulation optimale.....	106
Tableau VI.1. Caractéristiques de l'enrobé BBSG 0/14.....	108
Tableau VI.2. Classe de liant d'apport en fonction du taux d'agrégats.....	110
Tableau VI.3. Composition du mélange granulométrique avec 10% de fraisât.....	111
Tableau VI.4. Résultat d'essai Marshall avec 10% de fraisât.....	112
Tableau VI.5. Résultat d'essai Duriez avec 10% de fraisât.....	112
Tableau VI.6. Résultat d'essai de traction indirecte.....	112
Tableau VI.6. Composition du mélange granulométrique avec 20% de fraisât.....	113
Tableau VI.7. Résultat d'essai Marshall avec 20% de fraisât.....	114
Tableau VI.8. Résultat d'essai Duriez avec 20% de fraisât.....	114

Tableau VI.9. Résultat d'essai de traction indirecte.....	114
Tableau VI.10. Composition du mélange granulométrique avec 30% de fraisât.....	115
Tableau VI.11. Résultat d'essai Marshall avec 30% de fraisât.....	116
Tableau VI.12. Résultat d'essai Duriez avec 30% de fraisât.....	116
Tableau VI.13. Résultat d'essai de traction indirecte.....	116
Tableau VI.14. Composition du mélange granulométrique avec 40% de fraisât.....	117
Tableau VI.15. Résultat d'essai Marshall avec 40% de fraisât.....	118
Tableau VI.16. Résultat d'essai Duriez avec 40% de fraisât.....	118
Tableau VI.17. Résultat d'essai de traction indirecte.....	118
Tableau VI.18. Composition du mélange granulométrique avec 50% de fraisât.....	119
Tableau VI.19. Résultat d'essai Marshall avec 50% de fraisât.....	120
Tableau VI.20. Résultat d'essai Duriez avec 50% de fraisât.....	120
Tableau VI.21. Résultat d'essai de traction indirecte.....	120
Tableau VII.1. Résultats de stabilité Marshall en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât.....	124
Tableau VII.2. Résultats de densité apparente en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât.....	125
Tableau VII.3. Variation du fluage Marshall en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât.....	126
Tableau VII.4. Résultat du quotient Marshall en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât.....	127
Tableau VII.5. Variation de la compacité en fonction de pourcentage de fraisât.....	128
Tableau VII.6. Variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât.....	129
Tableau VII.7. Variation de la résistance à la compression en immersion, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât.....	130
Tableau VII.8. Variation de la tenue à l'eau en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât...	131
Tableau VII.9. Résultats des essais de traction indirecte pour différent pourcentage de fraisât et à différent température.....	132
Tableau VII.10. Résultats des essais Marshall pour différent pourcentage de fraisât.....	133
Tableau VII.11. Résultats des essais Duriez pour différent pourcentage de fraisât.....	133
Tableau VII.12. Résultats des différents essais sur fraisât.....	134

Abréviations et symboles

CTTP: Organisme de Control Technique des Travaux Publics

SONATRO: Société Nationale des Travaux Routiers

TBA : Température de ramollissement Bille et Anneau

BB : Bétons Bitumineux

BBSG : Bétons Bitumineux Semi-Grenus

RN : Routes Nationales

MTB : Matériaux Traités au Bitume

MTLH : Matériaux Traités aux Liants Hydrauliques

MNT : Matériaux Non Traités

GB : Grave Bitume

GNT : Grave Non Traitée

RTFOT: Rolling Thin Film Oven Test

PAV: Pressure Aging Vessel

NF : Norme Française

NA : Norme Algérienne

EN : Européen Norme

P.C.G : Presse à Cisaillement Giratoire

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

SETRA : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

NAT : Nottingham Asphalt Tester

TSE : Centrale de type tambour Sécheur Enrobeur

R_{sec} : Résistance à l'air (compression)
 R_{imm} : Résistance à l'eau (immersion)
 Σ : Surface Spécifique des granulats
G : Pourcentage de gros gravillons
g : Pourcentage de petits gravillons
S : Pourcentage de gros sable
s : Pourcentage de sable fin
f : Pourcentage de filler
 α : Facteur dépendant du type de granulats
K : Module de richesse
V.B : Valeur au Bleu de méthylène
LA : Los Angeles
M.D.E : Micro Deval Humide
TBA : Température de ramollissement
LT : Teneur en liant
MVA : Masse Volumique Apparente
MVR : Masse Volumique Réelle
GA : Granulat d'apport
LA : Liant d'apport
GER : Granulat d'enrobé recyclé
LER: Liant d'enrobé recyclé
AE: Agrégats d'enrobé
 Pen_{LER} : Pénétrabilité du liant d'enrobé recyclé
 TBA_{LER} : Température de ramollissement du liant d'enrobé recyclé
 Pen_{LA} : Pénétrabilité du liant d'apport
 TBA_{LA} : Température de ramollissement du liant d'apport
 Pen_{LAR} : Pénétrabilité du liant d'agrégat d'enrobé
 TBA_{LAR} : Température de ramollissement du liant d'agrégat d'enrobé

INTRODUCTION

Le recyclage des « fraisât » ou « Agrégats d'Enrobés », remontent à plusieurs décennies. Sa généralisation est plus récente. En effet, depuis 2009, beaucoup d'entreprises dans différents pays se sont engagés, à développer et à généraliser le recyclage des fraisât. Des engagements rendus possibles par l'arrivée à maturité des techniques de recyclage des enrobés. En centrale ou sur site, à chaud ou à froid, elles conjuguent économie de matériaux et d'énergie par rapport aux techniques traditionnelles. Parallèlement, des axes forts de recherche sont lancés dans le monde pour augmenter le taux de recyclage des agrégats d'enrobés et associer le recyclage à d'autres techniques environnementales performantes. Le seuil visé de réutilisation des matériaux bitumineux est ainsi porté à 99 %, tout en cherchant à maximiser le taux d'agrégats dans les couches neuves. 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) [1] 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.

L'objectif du recyclage des enrobés est de fabriquer un enrobé ayant des qualités comparables à celles d'un enrobé neuf en réutilisant le plus possible de matériaux récupérés. Pour répondre aux exigences de performances attendues, il est indispensable de disposer d'enrobés récupérés représentatifs du chantier, de choisir des granulats et un liant d'apport adéquats afin de se rapprocher le plus possible de la formulation de l'enrobé neuf équivalent. Sur le plan technique, il est généralement possible de recomposer une courbe granulométrique identique à celle de l'enrobé neuf. Les pourcentages pondéraux des fractions granulaires d'apport ne doivent pas être trop faibles (minimum de l'ordre de 10 %) pour que la qualité de la recomposition en centrale soit bonne. Le choix de la nature et de la quantité du liant d'ajout est plus difficile. Le liant vieilli n'a plus le comportement rhéologique d'un liant neuf, sa

pénétrabilité a diminué et sa composition chimique évolué (baisse de teneur en huiles aromatiques et accroissement de la teneur en asphaltènes). Il faut donc le régénérer par mélange intime avec un liant d'ajout qui ramènera la pénétrabilité et la composition chimique du mélange au voisinage de celles d'un bitume routier classique.

Le travail envisagé dans ce mémoire porte sur la « Valorisation des agrégats d'enrobés, à divers taux, dans de nouvelles formulations d'enrobés ». L'étude porte sur l'influence du taux de recyclage des agrégats sur les performances de l'enrobé final. Les agrégats d'enrobés (AE) proviennent du fraisage des couches de chaussée en matériaux hydrocarbonés ; les performances ciblées sont la stabilité Marshall, le fluage, le pourcentage de vide, la tenue à l'eau et la résistance à la traction indirecte.

Le travail comporte deux parties: une partie bibliographique et une partie expérimentale.

La partie bibliographique comprend trois chapitres :

Le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les chaussées, type de chaussée ainsi que leurs types d'endommagement,

Le deuxième chapitre, porte sur les enrobés bitumineux, leurs constituants, leurs caractéristiques, ainsi leurs formulations,

Le troisième chapitre : nous présentons un Etat de l'Art sur le recyclage des enrobés bitumineux, les différentes techniques et postes d'enrobages utilisées ainsi la méthode de formulation d'un enrobé recyclé,

La partie expérimentale suit avec un **chapitre quatre** l'identification des matériaux utilisés dans l'étude expérimentale,

Le cinquième chapitre est consacré pour l'étude de la formulation d'un enrobé classique ainsi les différents essais, tout en montrant le but de chaque essai, le mode opératoire, l'appareillage, et les résultats obtenues sont donnés sous forme de tableaux,

Le sixième chapitre est consacré à l'étude de la formulation d'un enrobé recyclé à différents taux de recyclage, les résultats obtenues sont donnés sous forme de tableaux et de graphes,

Le dernier chapitre est un chapitre récapitulatif contenant tout les résultats des différents essais réalisés exprimés avec des tableaux et des graphes avec leurs interprétations.

Une conclusion générale et recommandation clôturent notre travail.

CHAPITRE I.

GENERALITES SUR LES CHAUSSEES.

I.1. Historique

L'histoire des routes est liée aux besoins des armées des nations ; à savoir la circulation des chars. La civilisation romaine a marqué une partie de l'Europe par l'aménagement d'infrastructures routières. Les romains utilisaient des matériaux minéraux sous forme de cailloux et pierre. Le dallage était constitué d'une superposition de couches de différentes épaisseurs, le tout était lié à la chaux terme qui a donné le mot « chaussée », l'idée est restée avec les chaussées actuelles, qui sont des structures multicouches. Cette technique était utilisée pendant près de 20 siècles [2].

I.2. Constitution d'Une Structure Routière

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches, qui sont mises en œuvre pour répartir les charges induites par le trafic que le sol support seul ne pourrait pas soutenir. La chaussée doit normalement assurer, pendant un temps relativement long, des qualités de surface satisfaisantes : uniformité du profil en long et absence d'orniérage du profil en travers. Classiquement, une structure routière est constituée de trois couches (Figure. I.1) dont les fonctions propres garantissent conjointement la pérennité mécanique de l'ouvrage ainsi qu'un niveau constant de sécurité et de confort pour l'utilisateur [3].

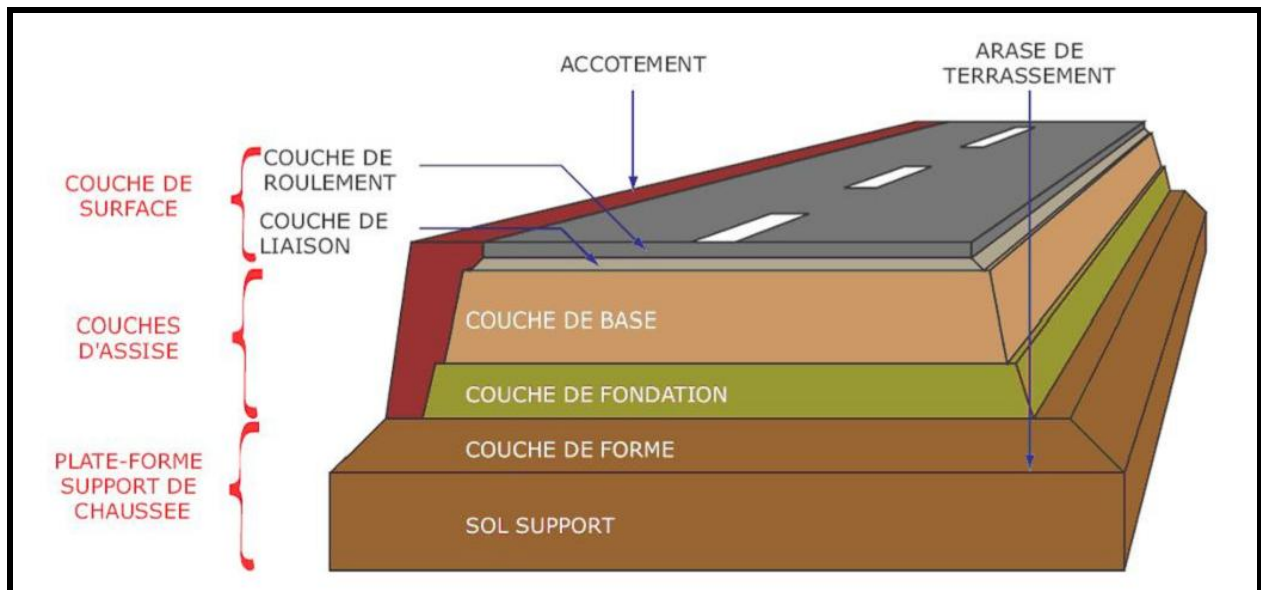


Figure I.1.constitution d'une structure routière [2]

Chacune des couches mentionnées dans le schéma ci-dessus joue un rôle bien précis :

- **La couche de roulement** : elle a une fonction de service. Elle est en contact direct avec les pneumatiques, assure la sécurité et garantit le confort des utilisateurs. La pérennité d'une adhérence satisfaisante de la couche de roulement est tributaire de la qualité des granulats qui la compose.
- **la couche de liaison** : protège la couche d'assise en assurant une protection mécanique (transfert de charge), thermique (atténuation des variations de température) et hydrique (imperméabilisation).

Ces deux premières couches sont appelées *couches de surface*.

- **La couche de base et la couche de fondation** : forment l'assise de chaussée, elles répartissent la charge verticale induite par le trafic sur la plate forme support de chaussée afin d'en limiter la déformation dans un domaine admissible. Elles participent à la résistance mécanique de la structure à la charge et assurent une fonction structurelle.
- **La couche de forme** : c'est un élément de transition permettant d'adapter les caractéristiques des matériaux de remblai ou de sols en place aux fonctions essentielles d'une plate-forme support de chaussée ou de voie.

Une structure routière est conditionnée par une résistance mécanique initiale et une durée de vie de l'ordre de 15 à 20 ans [4].

Une procédure de dimensionnement permet de déterminer les caractéristiques physiques et dimensionnelles de chacune des couches de la structure routière afin que cette dernière supporte durablement la charge induite par le trafic des véhicules.

La technique routière se caractérise par l'utilisation d'une grande variété de matériaux de construction. Ces matériaux sont composés de granulats (roches massives, granulats alluvionnaires, matériaux fins en technique routière saharienne, ...) fragmentés et calibrés, liés entre eux (matériaux traités), ou non liés (matériaux non traités) [4].

La liaison des granulats est obtenue par l'utilisation d'un liant hydrocarboné (exemple : bitume) ou hydraulique (exemple : ciment).

1.1. I.3. Les Différents Types De Structures De Chaussées

En fonction de l'utilisation faite de ces matériaux lors de la construction d'une structure routière, plusieurs familles de structure sont définies dont trois principales :

I.3.1. Les chaussées souples [5]

1.2. Les chaussées souples comportent une couverture bitumineuse mince (moins de 15cm), parfois réduite à un simple enduit superficiel, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30 et 60 cm.

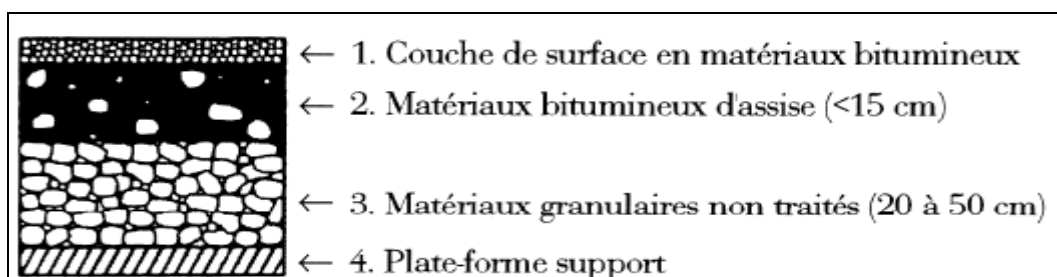


Figure I.2. Chaussée souple [catalogue des chaussées, 1998]

1.3. I.3.2. Les chaussées semi rigides [5]

Ces structures comportent une couverture bitumineuse mince (moins de 15cm), parfois réduite à un simple enduit superficiel, reposant sur une ou plusieurs couches traitées aux liants hydrauliques. L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30 et 60 cm.

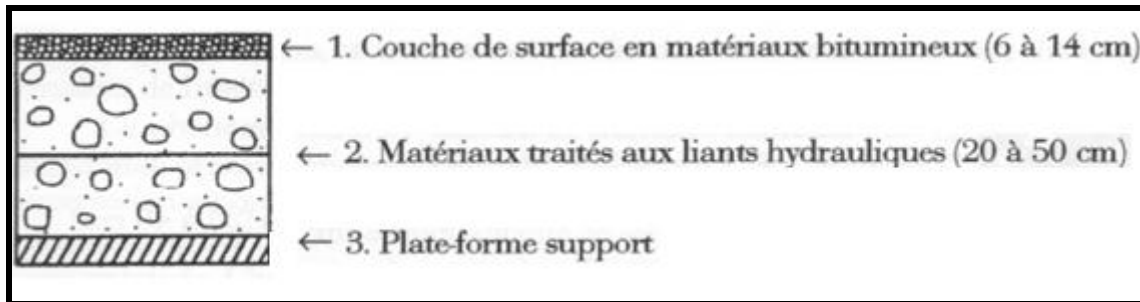


Figure I.3. Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques [Catalogue des chaussées, 1998]

1.4. I.3.3. Les chaussées rigides

La chaussée est constituée par une couche de fondation en grave ciment d'environ 15cm d'épaisseur, surmontée par une dalle de béton de 25cm d'épaisseur environ. Des joints transversaux sont effectués tous les 4 à 5m pour éviter une fissuration anarchique du béton, ainsi que des joints longitudinaux.

Remarque :

Les chaussées bitumineuses épaisses sont conçues pour des trafics importants (>150PL/J/Sens). Elles sont largement utilisées dans les constructions routières et autoroutières. C'est le type de chaussée retenu dans la réalisation de plusieurs tronçons de l'autoroute EST-OUEST et de la deuxième rocade d'Alger.

I.4. Types D'endommagement D'une Chaussée Souple [6]

L'évaluation périodique du comportement des chaussées en service permet de révéler les sections déficientes du réseau routier et fournit les renseignements nécessaires à la programmation des investissements et de l'entretien.

Il existe une grande variété de facteurs affectant le comportement et la durée de vie d'une

route. D'un côté, les facteurs liés directement à un mauvais revêtement ou d'une construction déficiente, d'un autre côté les facteurs climatiques. Cet ensemble de facteurs contribue au processus de vieillissement et d'endommagement d'une chaussée.

Le vieillissement se traduit à la surface du revêtement de béton bitumineux par des défauts qui peuvent être cités comme suit :

- *Ornières* : Ce sont des dépressions laissées par le passage des roues des véhicules.

Les ornières dont la profondeur est inférieure à 12 mm ne posent pas de problème sérieux, mais celle dont la profondeur est supérieure à 25 mm peuvent en poser.



Figure I.4. Orniérage

- *Fissures de centre* : Elles se rencontrent le long de la ligne centrale de la route dus à un manque d'adhésion au centre entre deux couches adjacentes. (Figure I.8)



Figure I.5. Fissures de centre

- *Fissures longitudinales* : Apparaissent suite à un manque de matériel et une ségrégation prononcée correspondant à la partie centrale du finisseur. Ce phénomène est observé au niveau des couches de base et de liaison ou le granulat est plus gros.



Figure I.6. Fissures longitudinales

- *Fissures transversales* : Ces fissures sont perpendiculaires à la route et la traversent complètement ou partiellement. Ils sont dus soit à l'abaissement de la température, soit à l'infiltration de l'eau, soit à l'action non uniforme du gel dans les sols ou à un tassement non uniforme.



Figure I.7. Fissure transversale

- *Fissures latérales* : Ces fissures sont longitudinales et situées près du bord du revêtement. Elles sont dues à une mauvaise géométrie de la chaussée (accotements non

larges et les pentes vers les fossés sont trop rapides), d'où l'infiltration des eaux sous le revêtement.



Figure I.8. Fissures latérales

- *Fissuration polygonale* : On les appelle aussi peaux de crocodile. Elles se rencontrent surtout sous le passage des roues et sont dues à la faiblesse des fondations.



Figure I.9. Fissures polygonales

- *Nid de poule*: Se sont des trous de forme arrondie à la surface d'une chaussée. Ce phénomène apparaît surtout durant l'hiver lors d'un dégel inattendu. D'autres facteurs peuvent aussi causer ce type de dégradations à savoir ; une mauvaise granularité des granulats, une densité insuffisante du mélange.



Figure I.10. Fissures sous forme de nid de poule

- *Désenrobage* : Dans ce cas la surface devient rugueuse. Ce phénomène est dû à l'enlèvement des fines et du bitume sous l'action des intempéries et ceci est dû à une mauvaise adhérence entre le liant et les granulats.
- *Arrachement ou déchaussement* : Dans ce cas les gros granulats sont arrachés.

La cause est la même que pour le désenrobage.



Figure I.11. Arrachement ou Déchaussement

- *Placards* : Lorsque le mélange bitumineux contient un excès de bitume, le liant remonte vers la surface du revêtement sous forme de plaques plus foncées. Un placard crée un danger de dérapage lorsque la chaussée est mouillée.
- *Ressuage* : c'est la remontée de bitume à la surface du revêtement, accentuée dans les pistes de roues.



Figure I.12. Ressuage

En Algérie, les types de dégradations observées en général sont l'orniérage et la fissuration.

1.5. Solutions Aux Dégradations

Des travaux d'entretien permettent de remédier aux dégradations superficielles ou structurelles. Ils consistent au remplacement de toute ou partie de la structure routière. Cette opération débute par la déconstruction ou la démolition des couches concernées par les dégradations et se termine par la mise en œuvre d'enrobé bitumineux en lieu et place des couches retirées.

Si l'on considère une opération d'entretien visant à corriger des dégradations structurelles, la déconstruction de la chaussée par couches successives permet de séparer les granulats de la couche de roulement (sélectionnés pour pérenniser le contact route / pneumatique) et les granulats des couches inférieures. Ainsi, à la différence de la démolition, la déconstruction permet de trier qualitativement les déchets bitumineux en fonction des caractéristiques fonctionnelles des couches concernées. [7]

I.6. Les Facteurs Influençant Les Dégradations De La Chaussée

I.6.1. Effet du trafic

Chaque couche de chaussée subit des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic (Figure I.13). Le calcul des efforts et des déformations qui s'effectue traditionnellement en considérant des multicouches élastiques linéaires isotropes, nécessite, en premier lieu, la connaissance du module de Young et éventuellement du coefficient de Poisson. C'est précisément à partir de ces deux coefficients, que le logiciel *Alizé* basé sur le modèle de Burmister (1943) permet la résolution du problème considéré comme élastique.

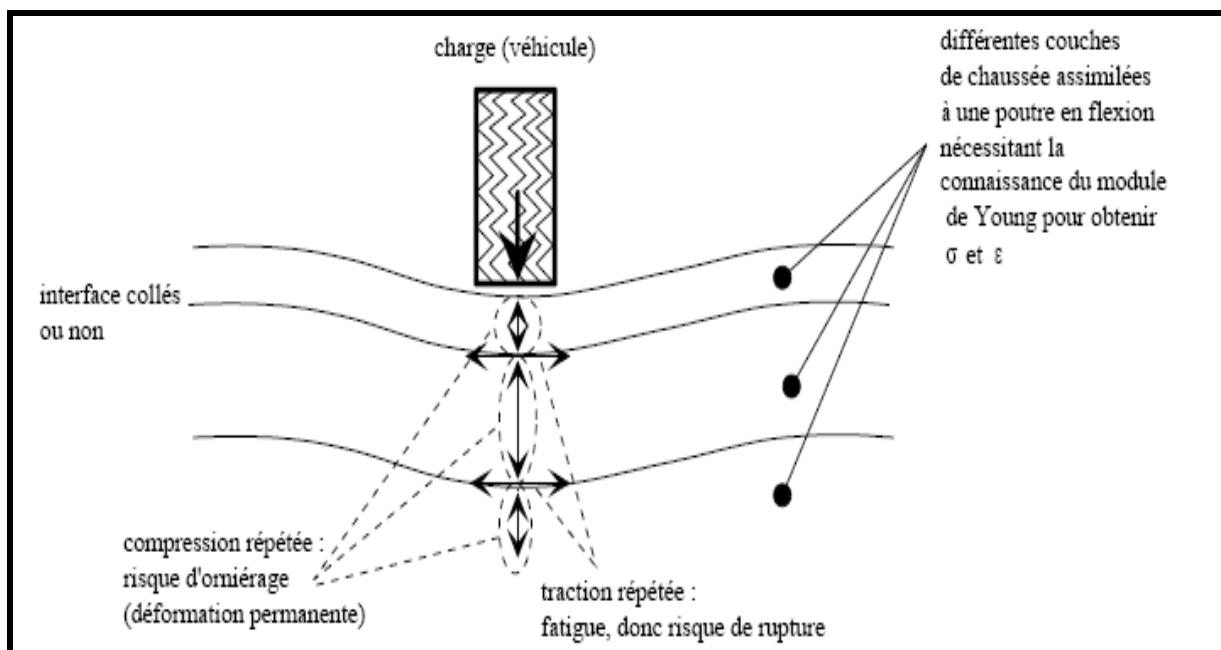


Figure I.13. Schématisation des sollicitations induites par le trafic [8].

Les tractions répétées à la base des couches, sous l'effet du passage des véhicules, créent des micro-dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Il s'agit du phénomène de fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux. Une fissure peut également apparaître et se propager dans la chaussée.

Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû au tassement des couches de béton bitumineux mais peut aussi être dû éventuellement aux déformations de couches inférieures non traitées.

Nous pouvons également souligner qu'en raison des propriétés particulières apportées par le

liant bitumineux, les enrobés possèdent un comportement (donc un module) fortement dépendant de la température et de la vitesse de chargement [9] [2] [10]

1.6.2. Effet De La Température [11], [12], [13]

A basse température le bitume possède un comportement fragile. La chaussée est, par voie de conséquence, susceptible de se fissurer sous l'effet conjugué des conditions climatiques et des contraintes de trafic. Cependant, la fissuration thermique peut être facilement évitée à basse température si l'on utilise un bitume de grade élevé, c'est-à-dire un bitume moins "dur", et donc moins "cassant" à basse température.

Néanmoins, un bitume de grade trop élevé se révèle néfaste vis-à-vis des problèmes d'orniérage (déformations permanentes de la chaussée) à température élevée. Le bitume idéal doit donc être à la fois le moins susceptible possible aux phénomènes de *fissuration thermique* (à basse température) et d'*orniérage* (à température élevée).

Plus simplement, on doit donc exiger des enrobés qui ont deux qualités principales en rapport direct avec la dépendance du liant utilisé vis-à-vis de la température :

- la stabilité : la résistance à la déformation permanente qui est aggravée à haute température,
- la flexibilité : soit l'aptitude à supporter sans fissures thermiques les basses températures.

Ces conditions ont notamment amené les différents groupes pétroliers à développer de nouveaux bitumes pour couvrir ce large intervalle de température (-30°C à 60°C) : les bitumes modifiés aux polymères.

Pour résumer, d'après Di Benedetto (2004) [8], outre le vieillissement du matériau, la température a deux effets mécaniques principaux :

- changement du module du matériau. Un béton bitumineux que l'on chauffe devient plus "mou". Plus généralement, ces matériaux sont dits "thermosensibles", c'est-à dire que leur comportement viscoplastique change selon la température considérée,
- création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations ou contractions thermiques lors des changements de température.

Le premier effet est, en général, caractérisé par la dépendance du module de rigidité vis-à-vis de la température et de la vitesse de chargement.

Le deuxième effet est particulièrement néfaste :

- lors d'un refroidissement, par exemple, la chaussée a tendance à se contracter. Or, les mouvements de contraction sont empêchés dans le sens longitudinal de la chaussée.

Cela revient donc à exercer une traction sur cette chaussée dans le sens longitudinal, d'où l'amorçage éventuel de fissures transversales. Ces dernières sont ensuite susceptibles de se propager à travers la structure lors de cycles thermiques (journaliers ou autres).

- lorsqu'une couche de base traitée aux liants hydrauliques existe dans la chaussée (structures semi-rigides). En effet, cette couche traitée aux liants hydrauliques est sujette au retrait thermique et de prise. Le retrait, empêché par le frottement à l'interface, peut provoquer une fissure dans la couche en béton bitumineux. Cette fissure évolue avec les cycles thermiques et peut progressivement traverser la couche.

1.7. Conclusion

De part leur constitution et les conditions d'exploitation, les chaussées bitumineuses subissent divers types de dégradations, notamment le ressuage qui nuit à la qualité de service de la chaussée. Le bitume reste l'élément le plus actif du mélange ; ses propriétés sont déterminantes dans le comportement de l'enrobé.

CHAPITRE II.

LES ENROBES BITUMINEUX

II.1. Définition

Les enrobés bitumineux se composent de granulats formant un squelette granulaire calibré lié par un liant bitumineux dans des proportions massiques maîtrisées de l'ordre de 95 à 93 % de granulats pour environ 5 à 7 % de liant qui assure la cohésion, les granulats assurent la rigidité de l'ensemble. Un additif peut éventuellement être associé à la composition [3].

De la couleur du liant bitumineux, les enrobés bitumineux ont hérité du nom générique de « produits noirs ». Cette dénomination est utilisée par opposition aux matériaux traités au liant hydraulique appelés « produits blancs » [7].

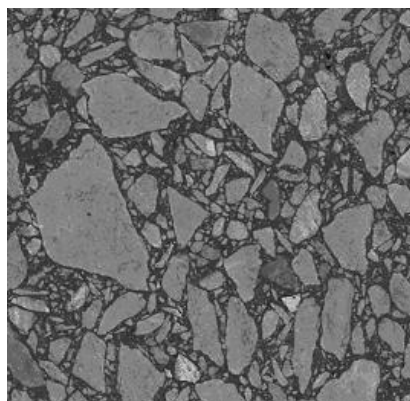


Figure II.1. Vue en coupe d'un enrobé bitumineux montrant les granulats formant un squelette granulaire (gris) et le bitume liant ce squelette (noir) [7]

II.2. 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.

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 [7]

II.3. Les Moyens De Fabrication

La fabrication des enrobés bitumineux s'est développée de manière industrielle à partir des années 1930. Les principes fondamentaux de l'enrobage restent, depuis l'origine, marqués par la coexistence de deux systèmes de fabrication : continu ou discontinu.

Discontinu (figure II.2) :

- granulats et bitume sont pesés par gâchée
- le malaxage se fait par gâchée
- centrale fixe

- fourniture avec multiples formules de type épïc

Continu (figure II.3) :

- granulats et bitume sont dosés en continu
- le malaxage se fait en continu
- centrale fixe ou mobile
- formule unique à grand rendement

La production industrielle des enrobés à chaud est réalisée dans une centrale d'enrobage. Cette méthode comprend le séchage et le chauffage des granulats à l'aide de tambour sécheur rotatif.



Figure II.2. Centrale d'enrobage discontinue de la marque ERMONT [14]



Figure II.3. Centrale d'enrobage continue de la marque ERMONT [14]

II.4. Les Principaux Constituants De l'Enrobé

Les constituants des enrobés bitumineux sont essentiellement le bitume, les granulats et les agrégats d'enrobé, ce dernier composant fera l'objet d'un traitement à part dans le chapitre

consacré aux enrobés recyclés

II.4.1. Le bitume

II.4.1.1 Origine et application

Le bitume, connu depuis la plus haute antiquité sous forme naturelle, provient, de nos jours, presque exclusivement de la distillation des pétroles bruts. Ses qualités physiques et chimiques en ont fait un matériau de toute première importance. La consommation mondiale en bitume est de 102 millions de tonnes par an. Il est utilisé à 90% pour la construction des routes. 95% des routes sont réalisées avec des enrobés ou des enduits superficiels. Il possède un grand pouvoir agglomérant car il adhère à la majorité des matériaux usuels : pierre, béton, bois, métal, verre. Il est léger, ductile et souple. Du point de vue mécanique, il se comporte comme un matériau plastique ou élastique. Il est insoluble dans l'eau, mais l'on peut en obtenir des solutions dans de nombreux solvants organiques. Il est pratiquement inerte vis-à-vis de la plupart des agents chimiques usuels. Le bitume se présente, à température ambiante, sous l'aspect d'un corps visqueux, plus ou moins viscoélastique, de couleur noire. Il est liquide à des températures supérieures à 100°C. Les propriétés viscoélastiques des bitumes déterminent le comportement dynamique des couches bitumineuses sous l'action des véhicules. [15], [2]

Les bitumes sont surtout composés de carbone et d'hydrogène, d'où leurs nom d'hydrocarbures. En effet, le liant hydrocarboné peut être bitumineux, goudronneux, à base de bitume fluidifié... [12]

II.4.1.2. Composition chimique du bitume

Les bitumes sont essentiellement produits en raffinerie à partir de la distillation fractionnée de certaines pétroles bruts dits « brut à bitume ». Les différentes fractions sont discriminées par leur point d'ébullition. Les produits de base sont soumis dans une ou plusieurs colonnes à une élévation de température telle que les éléments les plus légers se retrouvent en tête de colonne, suivis par des fractions de plus en plus lourdes. [15].

L'analyse élémentaire d'un bitume met en évidence :

- des atomes de carbone (80 à 87 % en masse),
- des atomes d'hydrogène (8 à 12 %).

En outre, des hétéroatomes tels que :

- le soufre (1-9 %),
- l'azote (0 à 1,5 %),
- l'oxygène (0,5 à 1,5 %),

On trouve également dans les bitumes des métaux (essentiellement vanadium (10-2000 ppm) ou nickel (20-200 ppm) mais aussi aluminium, silicium, chrome, cuivre, zinc, plomb, ...) à l'état de traces [16].

II.4.1.3. 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 naphéniques. 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 %. [2]

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 qui suit :

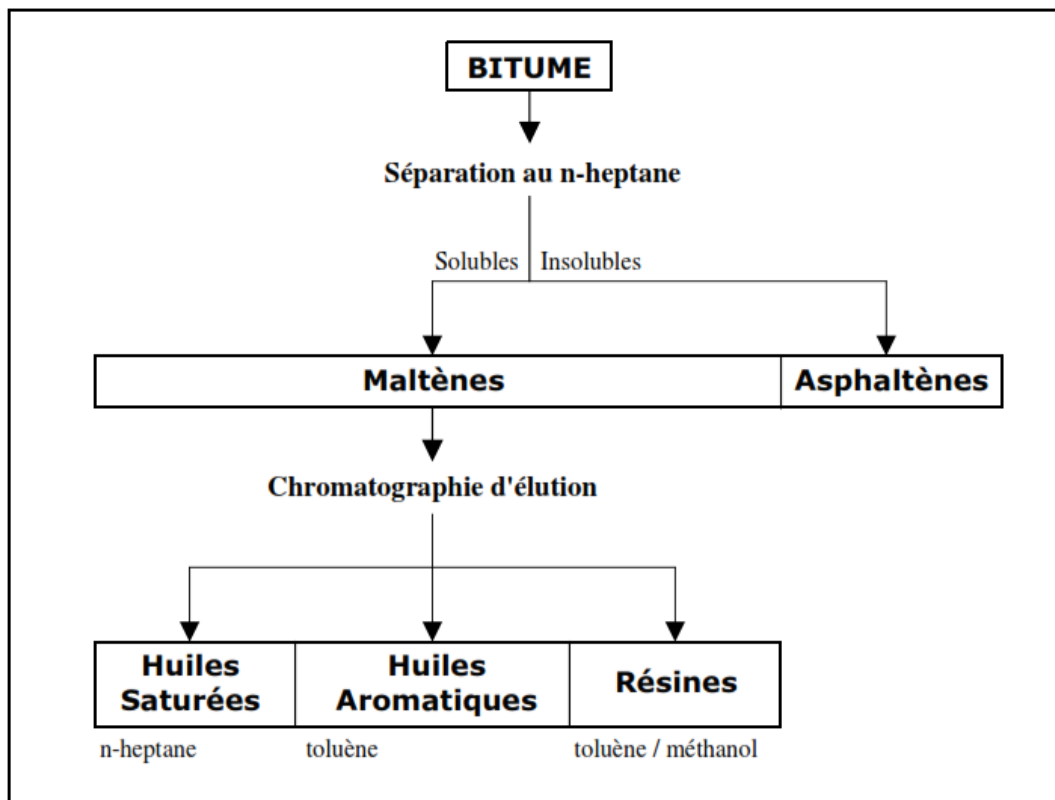


Figure II.4. Définition des fractions d'un bitume [10]

II.4.1.4. Définitions des fractions SARA

- **Les asphaltènes** : Sont des matières aromatiques solides, friable brun à noir, d'un poids moléculaire > 2000 Dalton. Elles sont composées de carbone, d'hydrogène, de soufre, d'oxygène et d'Azote.
- **Les maltènes** : Constitués principalement d'huiles saturées, d'huiles aromatiques et de résines.
- **Les résines** : Contiennent les mêmes composants que les asphaltènes mais semi-solide, visqueuses et polarisées, d'un poids moléculaire variant de 1000 à 2000 Dalton.
- **Les huiles saturées** : Sont ramifiées et/ou cycliques, visqueuses et même solides, d'un poids moléculaire variant de 500 à 1000 Dalton.
- **Les huiles aromatiques** : Sont de structure naphthénique-aromatique, d'un poids moléculaire variant de 500 à 1000 Dalton. Elles contiennent du carbone, de l'hydrogène, du soufre d'oxygène en petite quantité et d'azote. [16]

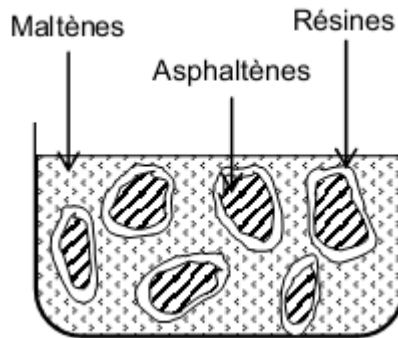


Figure II.5. Composition du bitume [17]

II.4.1.5. Fabrication des bitumes

Les modes de fabrication ont évolué. Avant la crise pétrolière des années 1970, on faisait appel presque exclusivement à des bruts lourds de forte densité, (faible degré API), permettant de fabriquer les différentes classes de bitume par distillation directe, sans qu'il soit nécessaire d'utiliser une colonne sous-vide de grande efficacité. Actuellement les bruts à bitume ont des origines diverses mais la plupart d'entre eux proviennent du Moyen-Orient, le reste venant du Venezuela et du Mexique. Ces bruts sont caractérisés par des densités moins élevées (degrés API plus forts). Il existe plusieurs techniques pour fabriquer le bitume, reposant principalement sur la distillation directe du pétrole. Lorsque le choix d'un brut et celui d'une technique ont été décidés, le fabricant suit rigoureusement le processus et s'y maintient. Ces choix font l'objet pour chaque fabricant de procédures d'homologation très sévères, dans le souci de fournir des produits industriels d'une qualité constante et conformes aux spécifications [2]

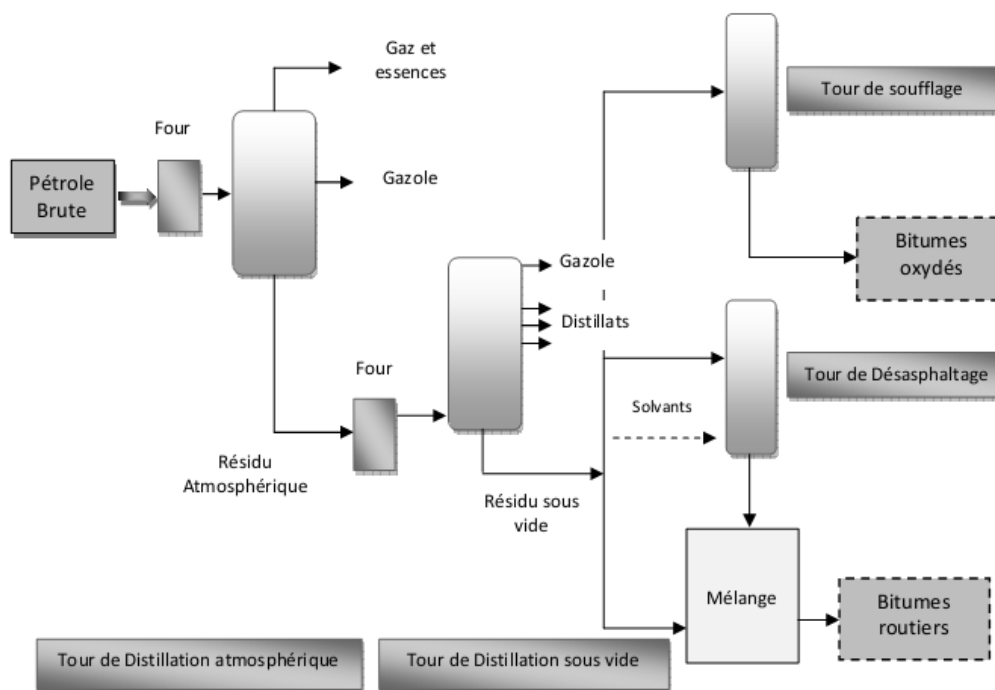


Figure II.6.Principe de fabrication des bitumes [3]

En Algérie, il existe trois procédés de fabrication des bitumes routiers :

- **La distillation sous vide ou directe** : Consiste à créer un vide de 30 à 10 mmHg obtenu à l'aide d'éjecteurs de vapeur. La température est de l'ordre de 340°C à 360°C et ne doit jamais dépasser 400°C à la sortie du four. Ce procédé existe aux 02 raffineries de Skikda et Arzew qui fabriquent tous les grades de bitumes;
- **Le semi-soufflage** : Le résidu appelé « base molle » récupéré du procédé sous vide est traité dans la colonne de soufflage où l'air est injecté à des températures comprises entre 240-280°C et un débit de 1 000 Nm³/h pour obtenir un bitume routier. Ce procédé existe à la raffinerie de Arzew (Algérie) ;
- **Le désasphaltage au solvant** : Il est employé comme complément dans le raffinage des bruts à huile, il est souvent effectué sur le fond de distillation sous-vide qui ne peut être employé comme bitume étant donné sa forte teneur en fractions lubrifiantes. Ce procédé existe à la raffinerie de Arzew, le brut à bitume ainsi que l'asphalte récupéré par désasphaltage au propane sont fractionnés en gazoles et sont traités ensuite dans la section de soufflage à l'air pour obtenir un bitume routier 40/50. [15]

Les bitumes issus de la distillation directe présentent la plus faible susceptibilité au vieillissement en comparaison aux bitumes fabriqués selon les autres procédés et dont la

susceptibilité est plus grande à cause de leur faible homogénéité colloïdale.

Il existe un quatrième procédé utilisé dans d'autres pays, qui est le procédé des bitumes reconstitués (mélange de résidus lourds avec des concentrats aromatiques résultant de l'extraction des lubrifiants).

II.4.1.6. Les essais de caractérisation des bitumes

- **l'essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF T 66-004) (NA 5192)** qui consiste à mesurer l'enfoncement dans un échantillon de bitume à une température donnée, d'une aiguille standard au bout de 5s. Plus la valeur de pénétration est grande et plus le bitume est mou ; c'est une mesure de dureté, elle sert de base à la classification des bitumes ;

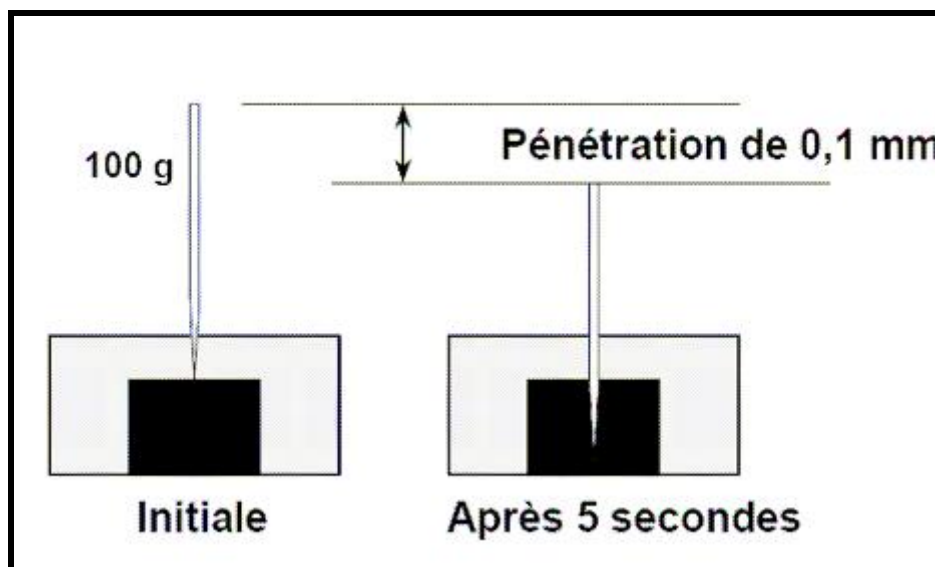


Figure II.7. Essai de pénétrabilité [3]

L'essai de pénétrabilité à l'aiguille permet, par le calcul d'un indice de pénétrabilité, d'accéder à la susceptibilité thermique d'un bitume. Notons que l'indice de pénétrabilité (IP) peut se calculer par la mesure de pénétrabilités à deux températures différentes (IP dit « LCPC ») et l'application de la formule :

$$(\log P_1 - \log P_2) / (T_1 - T_2) = 1/50 * (20 - IP) / (10 + IP). \quad \text{Eq II.1}$$

L'IP dit LCPC nécessite la détermination de la pénétrabilité à plusieurs températures. [11]

- **le point de ramollissement bille et anneau (NF T 66-008) (NA 2617)**, qui consiste à déterminer la température pour laquelle une bille normalisée d'acier traverse un

échantillon de bitume maintenu dans un anneau métallique. Plus la température bille et anneau est faible plus le bitume est susceptible ;

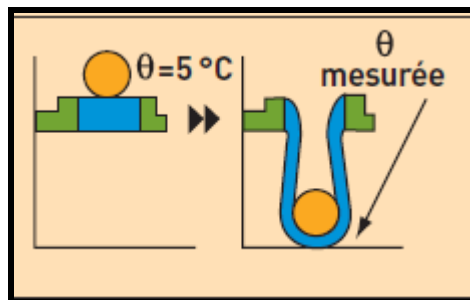


Figure II.8. Essai bille et anneau

Ces deux derniers essais permettent de définir à quelle classe de pénétrabilité (ou grade) le bitume appartient

- **La densité relative à 25°C (NF T66-007) (NA 5224) :** La densité des bitumes est mesurée au pycnomètre de 25°C [2] ;

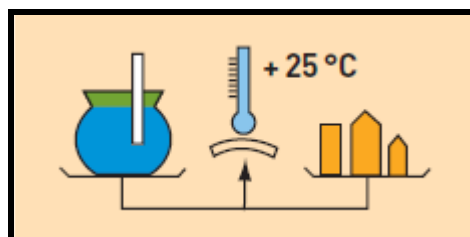


Figure II.9. Essai densité relative

- **L'essai RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) (essai de résistance au vieillissement) (ASTM D2872-85) (NF 12607-1) :** Lors de la fabrication des enrobés bitumineux, le bitume, chauffé à une température variant de 160-170°C en présence d'air, subit un choc thermique qui entraîne un vieillissement rapide mais limité. La simulation du vieillissement en laboratoire est inspiré du vieillissement naturel à l'enrobage en centrale, elle s'effectue à l'aide de l'essai **RTFOT**. Cette méthode permet de mesurer les actions de la chaleur et de l'air sur un film mince de bitume. Celui-ci étant en mouvement doit être chauffé dans un four pendant 75 mn à une température de 163°C, à une vitesse de 15 tours par minute et un débit d'air de 4000 ml/mn [17].

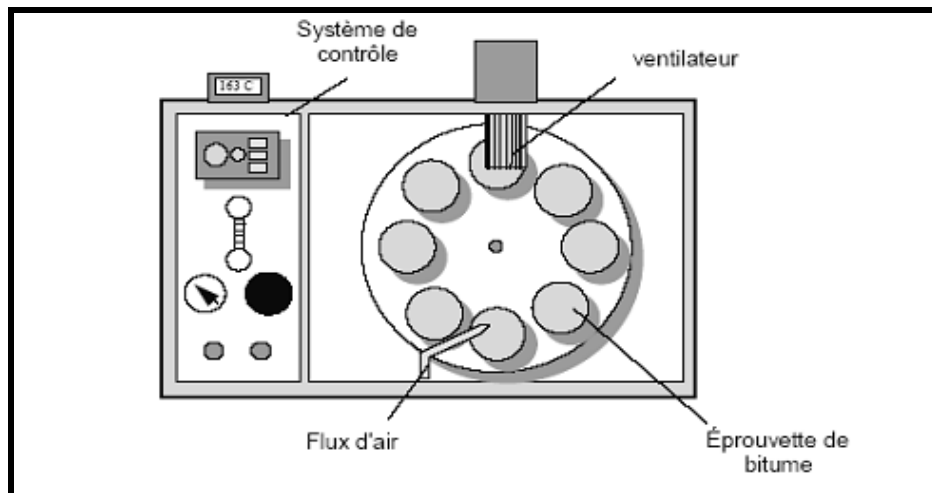


Figure II.10. Essai RTFOT [18]

- **L'essai de PAV (Pressure Aging Vessel) « AASHTO PPI »** : Il est employé pour caractériser le vieillissement du bitume in-situ. Les éprouvettes de cet essai sont récupérées du résidu de l'essai **RTFOT** qui est chauffé et versé dans des plateaux métalliques qui ont rangés dans un rack placé dans un récipient dans une enceinte thermique. Une pression d'air est appliquée. Après une durée de 20h, la pression est diminuée lentement. Le plateau d'éprouvettes est ensuite placé dans un four à 160°C pendant 30 mn. Les propriétés du liant sont ensuite mesurés (pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau). Ces valeurs sont appelées **PAV** et comparées aux valeurs initiales, et aux valeurs obtenues après **RTFOT** [18];
- **La perte de masse au chauffage (EN 13303 T66-011) (NA 5193)** : Cet essai permet de s'assurer de l'absence d'une fraction volatile liée à une pollution (il s'effectue à l'aide de l'appareil RTFOT) ;

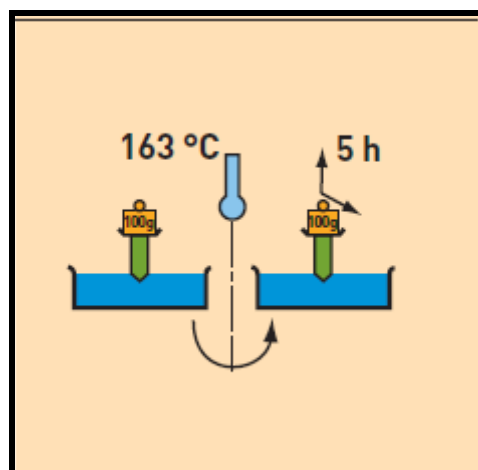


Figure II.11. Essai perte de masse au chauffage [2]

- **Le point de fragilité FRAASS (NF T 66-026) (NA 5272) :** Il caractérise la fragilité du liant à basse température. Il correspond à la température à laquelle un film de bitume déposé sur une lamelle d'acier se fissure lorsque cette lamelle est pliée à basse température [2] ;

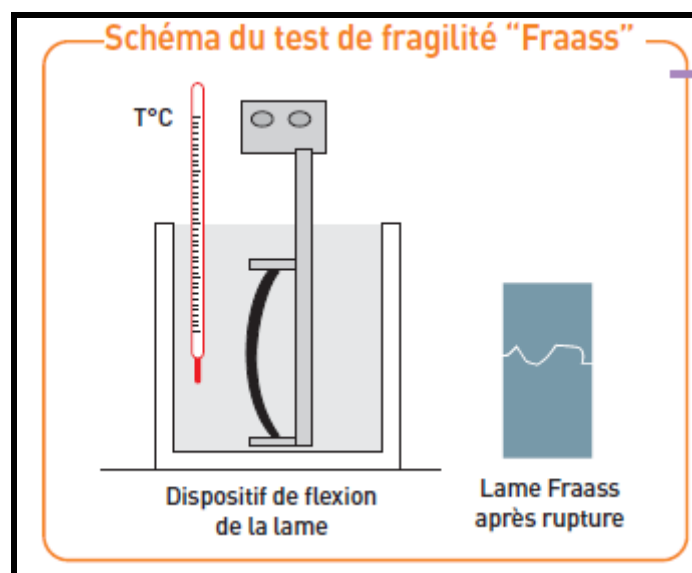


Figure II.12.Essai FRAASS [2]

- **Le point d'éclair en vase clos (NF T60-118) :** Cette température intéresse la sécurité liée au transport et à la manipulation des produits inflammables [2] ;

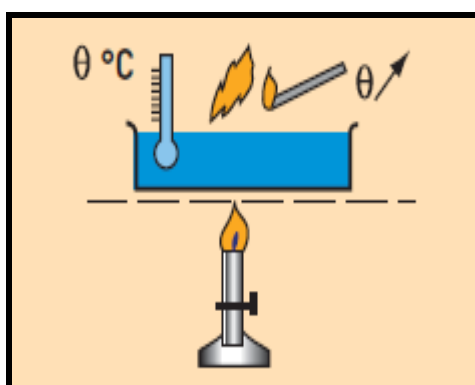


Figure II.13.Essai point d'éclair [2]

- **La ductilité à 25°C (NF T66-006) :** C'est la longueur atteinte à la rupture du fil dans des conditions normalisés.

En Algérie, les essais utilisés actuellement pour la caractérisation des bitumes sont : la pénétrabilité et la température bille et anneau.

Etant donné que le phénomène du vieillissement qui existe dans les centrales d'enrobage n'est pas pris en considération par nos laboratoires, il est important d'introduire l'essai RTFOT dans les essais de caractérisation des bitumes [15].

II.4.1.7. Spécifications européennes des bitumes

Les spécifications européennes sur les bitumes « purs » (norme EN 12591) (tableau II.1) sont basées sur des caractéristiques empiriques qui servent d'une part à identifier le liant et d'autre part à appréhender ses propriétés mécaniques : la pénétrabilité à 25°C (EN 1426), dont l'intervalle de variation exprimé en 1/10 mm définit des grades (20/30, 50/70, 70/100, ...) pour lesquels la température de ramollissement bille et anneau (EN 1427) doit aussi respecter un certain intervalle [9].

Tableau II.1. Spécifications européennes pour bitumes purs applicables pour la France

Caractéristiques	Unités	Méthodes	Désignation des classes appropriées				
			20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Pénétrabilité à 25°C	×0,1 mm	EN 1426	20-30	35-50	50-70	70-100	160-220
Point de ramollissement	°C	EN 1427	55 - 63	50 - 58	46 - 54	43 - 51	35 - 43
Résistance au durcissement RTFOT à 163°C		EN 12607-1					
• variation de masse, maximum, ±	%	EN 12607-1	0,5				
• pénétrabilité restante après durcissement, minimum	%	EN 1426	55	53	50	46	37
• point de ramollissement après durcissement, minimum	°C	EN 1427	57	52	48	45	37
• augmentation du point de ramollissement, maximum	°C	EN 1427	8		9		11
Point d'éclair, minimum	°C	EN 22592	240		230		220
Solubilité, minimum	% (m/m)	EN 12592	99,0				
Teneur en paraffines, maximum	% (m/m)	EN 12606-2	4,5				

II.4.1.8. Spécifications Algériennes des bitumes

Tenant compte du climat algérien, du procédé de fabrication du bitume et de certains critères de performances des chaussées liées à l'ornièrage, à la fatigue et à la fissuration à basse température, l'Organisme de Contrôle Technique des Travaux publics "CTTP", après des études spécifiques in-situ et en laboratoire, recommande depuis 2004 de nouvelles limites de spécifications des bitumes. Ces limites de spécifications sont données selon deux groupes de bitumes à savoir, ceux fabriqués par soufflage [$1 < I_p < 3,5$] ainsi que par distillation directe [$-1 \leq I_p \leq +1$] [9]:

Tableau II.2. Caractéristiques des bitumes selon les spécifications du CTTP.

Caractéristiques		Normes	Liants			
			20/30	40/50	60/70	80/100
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)		NA 5192	20 à 30	40 à 50	60 à 70	80 à 100
Température bille et anneau (°C)		NA 2617	57 à 62	52 à 57	47 à 52	41 à 47
Température bille et anneau (°C)	Bitume soufflé	NA 5192	62 à 68	57 à 61	52 à 56	46 à 51
Ductilité à 25°C (cm)		NF T66-006	≥ 25	≥ 60	≥ 80	≥ 80
Différence de TBA après RTFOT (ΔTBA)		ASTM D 2872-85	≤ 8	≤ 9	≤ 9	≤ 9
Perte de masse au chauffage (%)		NA 5193	-	< 1	< 1	< 2
Point d'éclair (°C)		NF T60-118	≥ 250	> 230	> 230	> 230
Densité à 25°C		NA 5224	1 à 1,1	1 à 1,1	1 à 1,1	1 à 0,07

Plus le grade d'un bitume est élevé, plus sa consistance (dureté) est faible.

II.4.1. 9. Choix de l'utilisation d'une classe de bitume [9]

Soumise aux sollicitations du trafic et du climat, la chaussée peut subir des dégradations telles que :

- les déformations à haute température (orniéage) ;
- les fissurations par fatigue sous le passage répété des véhicules ;
- les fissurations aux basses températures.

La résistance de la chaussée vis-à-vis de ces dégradations dépend de la performance du mélange et notamment du grade du bitume utilisé.

Afin de se rapprocher du meilleur comportement de la chaussée, le choix de la classe de bitume tient compte des paramètres suivants :

- les sollicitations appliquées à la chaussée (trafic et climat) ;
- la susceptibilité du bitume à la température qui est fonction de son mode de fabrication;
- l'augmentation de la température de ramollissement du bitume Bille et Anneau (ΔTBA) due essentiellement à son vieillissement lors de la fabrication de l'enrobé en centrale.

- **Choix selon le trafic et l'altitude**

Les classes recommandées selon le trafic et l'altitude sont présentées dans le tableau II.3.

Tableau II.3. Choix de la classe du bitume

Zone	Altitude (m)	Classe / trafic (PL.MJA)		
		trafic < 150	150 ≤ trafic < 500	trafic ≥ 500
I	alt ≤ 500	60/70	40/50 ou 60/70	40/50
	alt > 500	80/100	60/70 ou 80/100	60/70
II	alt ≤ 500	40/50	20/30 ou 40/50	20/30
	500 < alt ≤ 1000	60/70	40/50 ou 60/70	40/50
	alt > 1000	80/100	60/70 ou 80/100	60/70
III	500 ≤ alt ≤ 1000	40/50	20/30 ou 40/50	20/30
	alt > 1000	60/70	40/50 ou 60/70	40/50

- *Choix selon le climat*

Une étude spécifique sur la diversité du climat algérien a permis de faire un découpage de l'Algérie en trois principales zones climatiques (figure II.14).

➤ zone I

Il s'agit de la région septentrionale du Tell. Elle est dominée par un climat méditerranéen caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et pluvieux. Elle représente la zone la plus humide de l'Algérie.

➤ zone II

Elle correspond principalement à la région des Hauts plateaux. Caractérisée par un climat semi-aride, elle présente de longs hivers froids avec de courtes périodes de neige et des étés chauds et courts.

➤ zone III

Il s'agit de la zone du Sahara. C'est une région très aride soumise à des vents fréquents et violents. Les températures y sont extrêmement élevées durant la journée.

Ces zones se distinguent essentiellement par trois caractéristiques (voir tableau II.4) :

- la température maximale moyenne au sol ;
- la température minimale moyenne au sol ;
- la hauteur de précipitation annuelle moyenne.

Tableau II.4. Caractéristiques des zones climatiques

	Température maximale moyenne au sol (°C)	Température minimale moyenne au sol (°C)	Hauteur de la précipitation annuelle moyenne (mm)
Zone I	≤ 45	$- 2,5 \leq T_{min} \leq 2,5$	$h \geq 600$
Zone II	$45 < T_{max} \leq 50$	$< - 2,5$	$h < 600$
Zone III	> 50	$\geq - 5$	$h < 100$

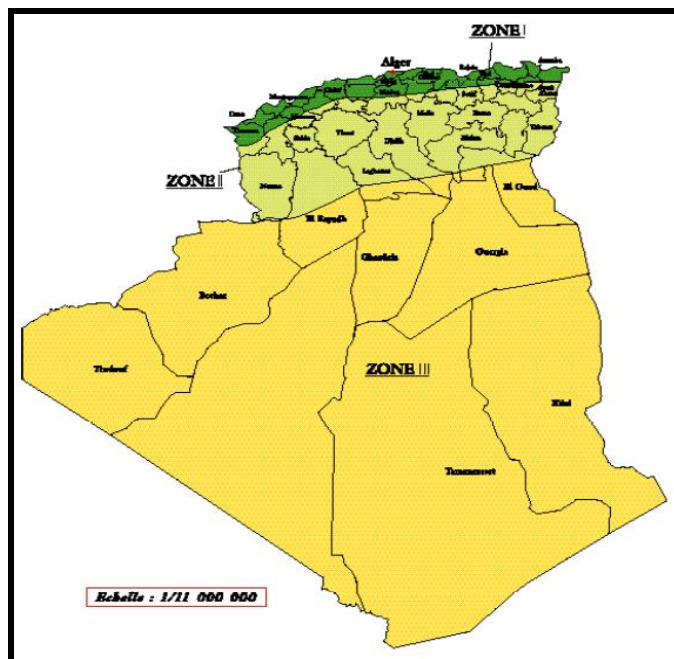


Figure II.14. Représentation des zones climatiques de l'Algérie.

II.4.1.10. Évolution du bitume routier avec le temps [3]

Le bitume évolue dans le sens d'un durcissement progressif du matériau depuis le stade du stockage en raffinerie jusqu'au stade ultime de la vie du revêtement en service engendrant certains désordres de chaussées et donc le non-maintien de propriétés d'usage satisfaisantes. Notamment, lorsque le bitume a atteint un niveau important de durcissement, il devient fragile et cet état aux fortes tensions, se manifestant aux surfaces d'adhésion avec le minéral de l'enrobé, peut entraîner des phénomènes de fissuration de surface principalement par fatigue thermique.

Le vieillissement peut se produire à trois stades du cycle de vie du matériau, à des rythmes différents :

- au cours du stockage et du transport (entre 160 et 180°C) ;
- au cours de l'enrobage (aux environs de 160-170°C : 160°C pour les bitumes purs et 170°C pour les bitumes-polymères) et de la mise en œuvre (aux alentours de 130°C) : A l'enrobage, les granulats chauffés aux environs de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui se répartit en film mince autour du granulat, favorisant ainsi un vieillissement du liant.
- Sur site au cours de l'utilisation routière.

L'évolution du bitume s'opère suivant des mécanismes complexes à la fois physiques (tels que l'évaporation des fractions les plus volatiles et le réarrangement du système colloïdal au cours du refroidissement après mise en œuvre) et chimiques mais c'est l'oxydation des

composants du bitume qui est la cause principale du durcissement.

- **Principaux facteurs du vieillissement du bitume**

Les principaux facteurs responsables de l'oxydation du bitume, tant à haute température dans les différents procédés de mise en œuvre, qu'à plus basse température au niveau de la chaussée sont les suivants :

- *le climat* : la vitesse d'oxydation augmente avec la température et les rayons ultra-violetts accélèrent le vieillissement en surface :
- *l'oxygène*: il pénètre très lentement dans le bitume par diffusion. A des températures très élevées, les composantes de fortes masses moléculaires sont déshydrogénées et il y a formation d'eau. La quantité d'oxygène qui demeure liée au bitume est faible. A des températures peu élevées ou ambiantes, l'oxygène est chimiquement lié au bitume.
- *l'épaisseur du film de bitume autour des matières minérales* : l'oxygène diffuse au sein du bitume, de façon progressive et d'autant plus fortement (à des profondeurs d'autant plus importantes) que la viscosité du bitume est faible.
- *la nature du bitume*, en particulier sa réactivité vis-à-vis de l'oxygène,
- *les polluants externes* tels que l'ozone, provenant de la dissociation des oxydes d'azote (pollution par les automobiles et les industries).

- **Mécanismes de vieillissement**

Les réactions d'oxydation modifient les proportions relatives des différentes fractions contenues dans le bitume. L'étude des fractions génériques en fonction du vieillissement montre en effet une augmentation de la teneur en asphaltènes et parallèlement une diminution de la teneur en maltènes dans des proportions identiques. Au sein des maltènes, cette évolution se traduit par une diminution de la fraction naphthéno-aromatique alors que les teneurs en saturés et résines restent constantes. Il semblerait donc que l'origine du processus de vieillissement se situe dans les maltènes. L'évolution possible peut être la suivante :

Aromatiques → Résines → Asphaltènes.

II.4.2 Les Granulats

Les granulats constituent un des éléments principaux composant d'un enrobé bitumineux.

Les granulats se répartissent suivant leur taille moyenne en plusieurs familles : fines, sables, gravillons et cailloux. Les diamètres minimaux et maximaux de ces familles sont normalisés. Leur origine peut être artificielle (argile expansée, déchets, scories, produits de recyclage) ou naturelle. L'aspect physique des granulats naturels est lié à leur mode d'obtention : ils seront roulés s'ils proviennent du creusement d'un gisement (gravière, alluvions) et concassés s'ils sont obtenus par extractions à partir d'une roche mère compacte (carrière). La qualité de l'enrobé sera tributaire du type de granulat utilisé et de sa qualité. [19]

II.4.2.1. Définition

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

Ces dimensions correspondent à la grosseur des grains définie dans NF P18-561 déterminés par l'analyse granulométrique par tamisage selon NF P18-560-1990 (NA 2607).

Plusieurs familles de granulats sont distinguées selon NF P18-101. [19]

- Fines : $D \geq 0.08$ mm ;
- Sables : $D \leq 6.3$ mm ;
- Gravillons : $d \geq 2$ mm et $D \leq 31.5$ mm ;
- Graves : $6.3 \text{ mm} < D \leq 80$ mm

II.4.2.2. Échantillonnage des granulats

Il s'agit de sélectionner une fraction réduite de matériau, représentative de l'ensemble du matériau de façon aussi fiable que possible.

Les méthodes d'échantillonnage telles prescrites dans les normes françaises (NF P18-551, NF P18-552-1990 et NF P18-553) sont données comme suit :

- *La phase de prélèvement des granulats* : Les prélèvements élémentaires, constituant l'échantillon global, s'effectuent en surface de façon aléatoire, concernant les lots à trois dimensions (tas, camion ou wagon) ;
- *La phase de préparation de l'échantillon global des granulats* : L'échantillon global destiné au laboratoire doit être constitué d'au moins dix prélèvements élémentaires de masses voisines obtenues dans les mêmes conditions opératoires. La masse minimale d'un échantillon global de granulats est donnée comme suit :

Tableau II.5. La masse minimale d'un échantillon global en fonction de la grande dimension D des éléments.

D (mm)	3	8	14	20
M (Kg)	10	15	30	40

- *La phase de préparation de l'échantillon d'essai* : Elle consiste à prélever, par réduction un échantillon pour essai à partir de l'échantillon global et cela soit par : quartage, fractionnement manuel de la quantité de matériau (quantités > 50kg) à préparer, soit par l'utilisation de diviseurs échantillonneurs à couloirs (quantités < 50kg).

II.4.2.3. Caractéristiques des granulats

Il existe deux types de caractéristiques :

- a) *Caractéristiques intrinsèques*, elles sont liées à la qualité de la roche exploitée :
 - Masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau.
 - Los Angeles : Résistance des granulats à la fragmentation (chocs) sous l'action du trafic.
 - Micro-Deval : Résistance à l'attrition et à l'usure, à sec ou en présence d'eau, il s'agit de mesurer l'usure qui se produit d'une part ; entre les gravillons entre eux et d'autre part ; entre le pneumatique et le granulat à la surface des revêtements.
 - Friabilité des sables : son but est de déterminer la résistance à l'attrition du sable en présence d'eau.
- b) *Caractéristiques de fabrication [20]*, elles dépendent des conditions de fabrication :
 - 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 échelle logarithmique) ;
 - Aplatissement : elle joue un rôle important, à la fois pour les granulats de la couche de roulement, des gravillons plats ayant tendance à se coucher au moment du compactage, et pour les matériaux d'assise, des granulats plats réduisant la compacité

et la stabilité, elle consiste à déterminer la masse de granulats plats exprimée en pourcentage de la masse de l'échantillon, est appelée indice d'aplatissement;

- Angularité: Applicable aux granulats d'origine alluvionnaire, elle représente les arrêtes vives obtenus après concassage;
- 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 à 10% de fines [20].

II.5. Les Essais Sur Les Enrobés Bitumineux [21], [22], [23], [17]

Les essais de laboratoire utilisés sur les mélanges bitumineux sont divers suivant les normes adoptés par chaque pays. Dans ce paragraphe, nous citerons et décrirons les principaux essais sur enrobés et dans le chapitre suivant nous citerons les essais exigés dans une formulation d'enrobés en Algérie et en France.

II.5.1. Essai Duriez

Cet essai consiste à compacter l'enrobé dans un moule cylindrique par une pression statique à double effet. Une partie des éprouvettes est conservée sans immersion à une température de 18°C et une hygrométrie contrôlée, l'autre partie est conservée immergée. Chaque groupe d'éprouvettes est écrasé en compression simple.

Le rapport de la résistance après immersion à la résistance à sec donne la tenue à l'eau du mélange.

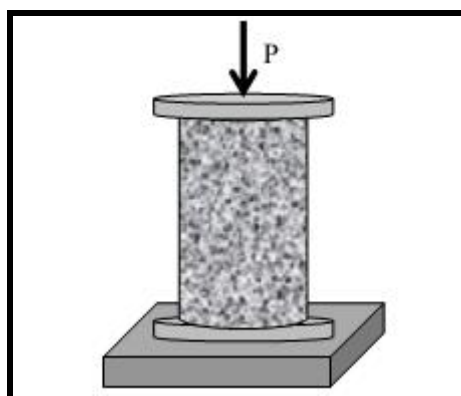


Figure II.15. Principe de l'essai Duriez

II.5.2. L'essai Marshall

Les enrobés bitumineux sont compactés dans des moules à l'aide d'une dame en vue de réaliser des éprouvettes cylindriques.

Ces éprouvettes (température : 60°C) sont placées entre les deux mâchoires semi-cylindriques d'une presse qui se rapprochent l'une de l'autre à une vitesse constante.

Au cours de l'essai, la charge et la déformation sont enregistrées jusqu'à la rupture.

Cet essai rentre dans la catégorie des essais empiriques à chargement unique qui, vu la complexité des sollicitations engendrées, ne permet pas la détermination d'une propriété intrinsèque du matériau. Il conduit à la détermination directe de deux grandeurs : le fluage (mm) et la stabilité Marshall (KN), deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'orniérage.

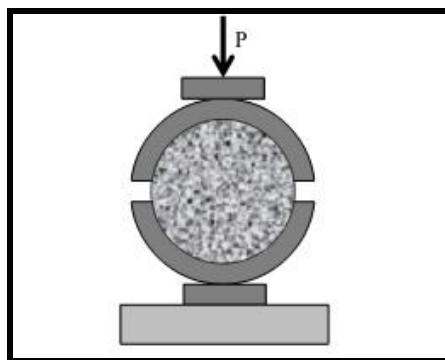


Figure II.16. Principe d'essai Marshall

II.5.3. La Presse à Cisaillement Giratoire

La presse à cisaillement giratoire permet d'étudier l'aptitude au compactage des enrobés hydrocarbonés par l'estimation du pourcentage de vides en fonction de l'épaisseur de la couche d'enrobé.

Le mélange hydrocarboné préparé en laboratoire, est placé dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre.

On applique sur le sommet de l'éprouvette une pression, verticale de 0,6 MPa. En même temps, l'éprouvette est inclinée d'un angle faible de l'ordre de 1° (externe) ou 0,82° (interne) et soumise à un mouvement circulaire.

Ces différentes actions exercent un compactage. On observe l'augmentation de compacité en fonction du nombre de tours.

Ce mode de compactage traduit la relation linéaire qui existe entre le nombre de passes d'un

rouleau compacteur de chantier et le nombre de girations. Alors que la méthode Marshall ne permet la mesure d'un pourcentage de vides que pour un effort de compactage unique, l'essai à la PCG permet de mesurer l'évolution du pourcentage de vides dans le mélange en fonction du nombre de giration. Cette courbe du pourcentage de vides en fonction du nombre de girations décrit la maniabilité du mélange (figure II.18), qui permet d'exercer une discrimination entre :

- Des mélanges trop maniables, qui auront tendance à présenter des ornières,
- Des mélanges peu maniables, qui seront perméables et peu durables.

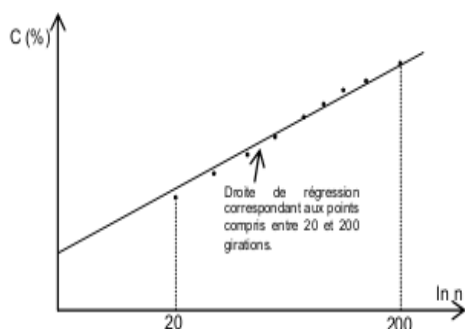


Figure II.17. Droite de compactage PCG

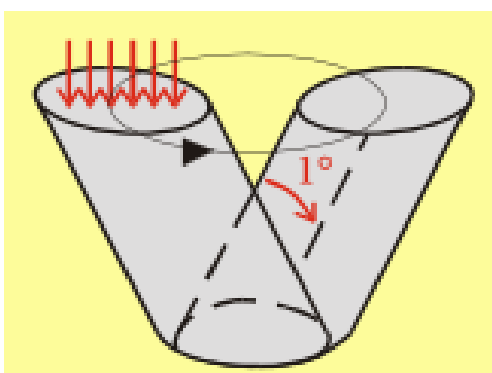


Figure II.18. Principe de compactage à la PCG

II.5.4. L'essai de traction indirecte

Cet essai a pour but d'atteindre un état de traction dans la zone centrale d'un échantillon cylindrique de faible épaisseur. La grandeur mesurée au cours de l'essai est la force d'application, à partir de laquelle est déduit par calcul la résistance à la traction du matériau. Il est encore appelé essai de « traction indirecte » ou encore « essai brésilien ».

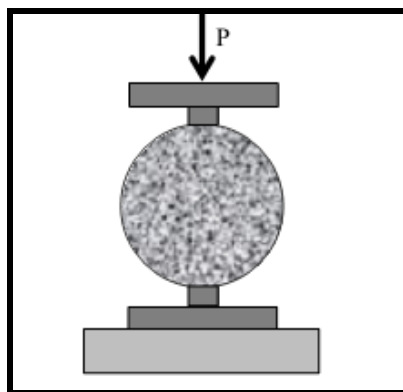


Figure II.19. Principe de l'essai de traction indirecte

II.5. 5. L'essai d'orniérage

Le corps d'épreuve est une plaque parallélépipédique de 5cm ou de 10cm d'épaisseur, selon que l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé est inférieure ou supérieure à 5cm. Cette plaque est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique (fréquence: 1Hz, charge: 5kN, pression: 6bars), dans des conditions sévères de température (60 °C).

La profondeur de la déformation produite dans le passage de la roue, est notée en fonction du nombre de cycles. Les spécifications portent sur un pourcentage d'ornière à un nombre de cycles donné, qui dépend du type de matériau, et de sa classe.

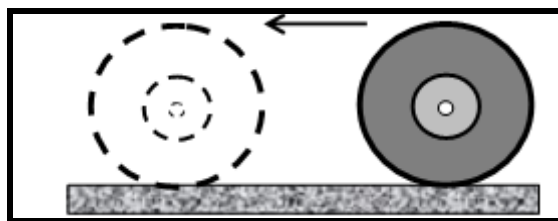


Figure II.20. Principe d'essai d'orniérage

II.5.6. Essai de fluage statique uniaxial

L'essai consiste à charger axialement, avec une charge constante des éprouvettes cylindriques d'enrobés afin de déterminer la déformation résultante dans la direction de la charge (figure II.22). La déformation relative « ϵ » égale au rapport « $\Delta H/H$ » peut être représentée en fonction du temps (figure II.21).

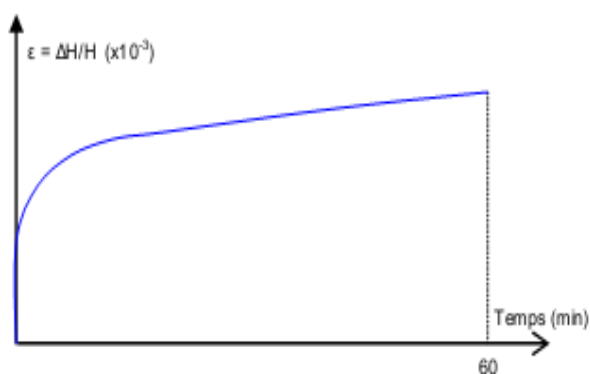


Figure II.21. Variation de la déformation relative en fonction du temps

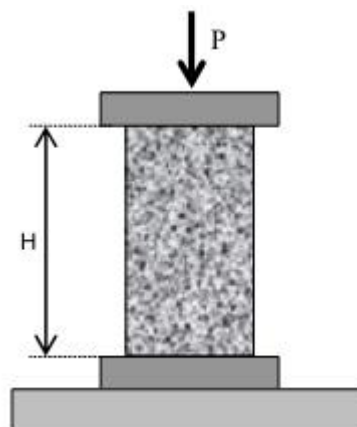


Figure II.22. Principe de l'essai de compression cyclique uniaxial sous confinement

Les conditions d'essai sont :

$$P = 500\text{N} ; \sigma = 0,1 \text{ MPa},$$

$$T = 40^\circ\text{C},$$

$t = 1 \text{ h}$ (la durée de chargement).

II.5.7. les essais de module

La rigidité du mélange est déterminée soit par un essai de module complexe (solicitation sinusoïdale sur éprouvette trapézoïdale) soit par un essai de traction directe (sur éprouvette cylindrique ou parallélépipédique). La charge est appliquée dans un domaine de petites déformations, en contrôlant le temps ou la fréquence, la température, la loi de chargement. Le module (rapport de la contrainte à la déformation) est calculé pour chaque essai élémentaire (température, fréquence).

Les valeurs de la rigidité sont présentées graphiquement en échelle logarithmique, sous forme d'isothermes dont la rigidité varie en fonction des temps de charge (figure II.23.a).

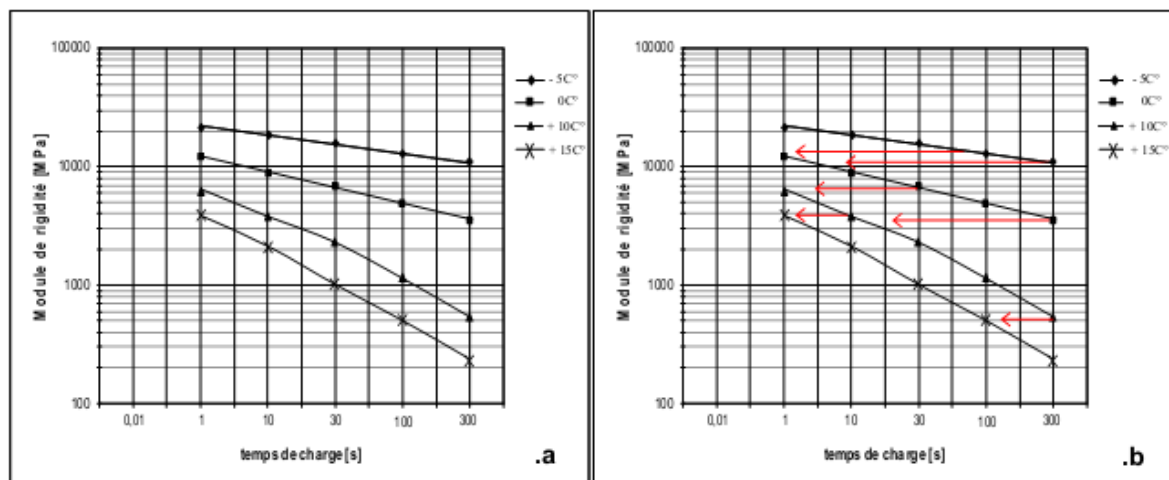


Figure II.23. a) Exemple d'isothermes [22]

b) Translation isothermes le long de l'axe des temps de charge [22]

L'équivalence temps – température permet de réduire les courbes isothermes en une seule courbe de référence (pour une température de référence) et de définir le module pour une plage de temps de charge (ou fréquences) beaucoup plus vaste que celle des essais (figure II.24).

La construction de la courbe de référence ou « courbe maîtresse » se fait par des translations parallèles à l'axe des temps de charge (ou fréquences) (figure II.23.b).

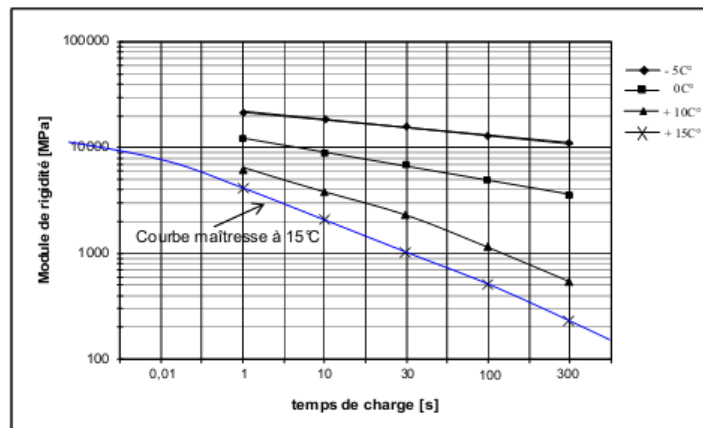


Figure II.24. Exemple de la courbe maitresse à 15°C [22]

II.5.8. Les essais de fatigue

Une éprouvette trapézoïdale est soumise, à une température et pour une fréquence de chargement fixées, à une déformation imposée. Lorsque la contrainte appliquée pour maintenir la déformation constante est diminuée de moitié, l'éprouvette est considérée comme endommagée au nombre de cycles considéré.

Sur un graphique, les différents couples (niveau de chargement, nombre de cycles jusqu'à l'endommagement), se placent sur une droite de fatigue (figure II.25).

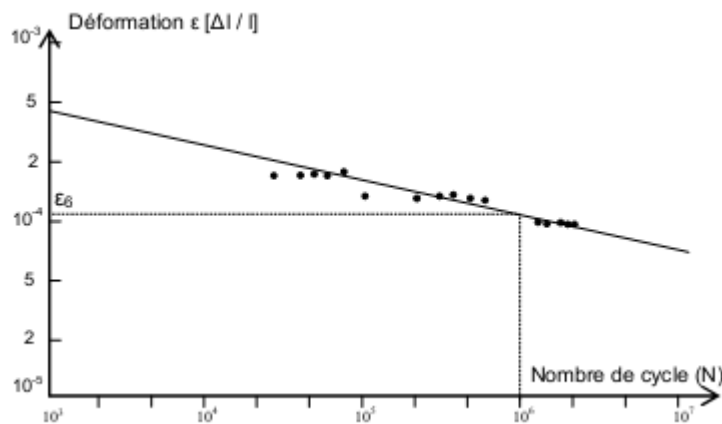


Figure II.25. Exemple d'un essai de fatigue [17].

A 10^6 cycles, le seuil de chargement relevé sur la droite est la valeur caractéristique de la résistance en fatigue dite : « ϵ_δ ».



Figure II.26. Essai de fatigue en flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales [21].

II.6. Classification Des Enrobés Bitumineux

Elle se fait de différentes manières : selon leur granularité, selon leur épaisseur d'utilisation (épais, mince, très mince, ultra mince) et plus récemment selon leurs performances mécaniques (module élastique, résistance en fatigue, acoustiques, adhérence, couleur). La classification selon la granulométrie est la plus courante lors de la formulation d'un enrobé.

II.6.1. Classification Selon La Granulométrie

On distingue : les enrobés à granulométrie continue (dense) ; semi grenue ; grenue, discontinue et drainante. La composition granulométrique est définie pour chaque catégorie d'enrobé hydrocarboné, par les pourcentages de passant aux tamis. Le choix de la classe est déterminé par la compacité (ou % de vides) à atteindre lors de la mise en œuvre de l'enrobé.

II.6.1.1 Les enrobés denses (Traités à chaud)

La teneur en vide est faible et inférieure à 8% soit une compacité comprise entre 92 % et 97%. Il existe deux types d'enrobé bitumineux denses.

➤ Le béton bitumineux (BB)

Il est constitué d'un squelette minéral à granulométrie continue tel que les dimensions des fillers du sable et du gravier sont de telle sorte que les vides des uns sont comblés par les autres avec un niveau de compactage optimum formant une structure minérale dense avec une faible teneur en vide.

➤ *Les graves bitumes (GB)*

Les graves bitumes sont moins dosés en bitume que les bétons-bitumineux destinées essentiellement à la réalisation des assises de chaussées des couches de base et des couches de fondation. Pour le grave bitume, la dimension maximale des gros éléments sont :

- $14 \text{ mm} \leq D \leq 20 \text{ mm}$ pour une couche de base, une couche de renforcement et une couche de fondation de chaussées en béton.
- $14 \text{ mm} \leq D \leq 31,5 \text{ mm}$ pour une couche de fondation souple.

II.6.1.2. Les enrobés semis – denses

La teneur en vide varie entre 8 % et 12 % soit une compacité entre 88 % et 92%.

II.6.1.3. Les enrobés ouverts

La teneur en vide est supérieure à 12 % et la compacité est inférieure à 88 %.

II.7. Formulation D'un Enrobé Bitumineux [10], [17], [15]

L'étude de la formulation des enrobés bitumineux consiste à chercher la teneur optimale en liant pour assurer un certain seuil de stabilité, de compacité, de résistance à l'eau (désherbage) et au fluage.

Les démarches d'une formulation, après avoir fixé la classe de l'enrobé à concevoir, passent par trois étapes:

Etape 1 : Identification des constituants.

Etape 2 : Détermination des proportions des composants du mélange de base.

Etape 3 : Détermination de la teneur en liant optimale par des essais de performances mécaniques.

II.7.1. Mélange granulaire

La distribution de la taille des différents grains (des plus gros au plus petit) constitue la courbe granulométrique du mélange. Celle-ci peut être continue ou discontinue (c'est à dire qu'une ou plusieurs fractions granulaires peuvent manquer), selon la destination du mélange et les propriétés visées.

Le mélange granulaire des enrobés bitumineux se fait par combinaison des fractions granulaires utilisées de manière à ce que la courbe granulométrique de mélange s'insère dans le fuseau de référence.

II.7.2. Teneur en liant

Le liant bitumineux transmet naturellement son comportement viscoélastique à l'enrobé. Il faut donc définir une teneur en liant optimale afin d'assurer la cohésion du mélange et le bon enrobage de tous les grains du mélange par un film mince de bitume, et ce, tout en évitant des problèmes de fluage et d'orniérage trop prononcés à haute température (dans le cas d'une trop forte teneur en bitume).

$$TL(\%) = K \times \alpha \sqrt[5]{\Sigma} \quad \text{Eq II.2}$$

Où :

TL : Teneur en liant (%).

K : Module de richesse.

α : Coefficient correcteur relatif à la masse volumique des granulats.

$\alpha = 2,65 / MVR_G$ avec MVR_G : masse volumique des granulats en grammes par centimètre cube (cm^3)

Σ : est la surface spécifique, exprimée en mètres carrés par kilogramme, déterminée par la relation :

$$100 \Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f \quad \text{Eq II.3}$$

Avec:

G : proportion d'éléments supérieur à 6,3 mm

S : proportion d'éléments compris entre 6,3 mm et 0,250 mm

s : proportion d'éléments compris entre 0,250 mm et 0,063 mm

f : proportion des éléments inférieurs à 0,063 mm

Module de richesse K :

Le module de richesse **K** est une grandeur proportionnelle à l'épaisseur conventionnelle du film de liant hydrocarboné enrobant le granulat. K est indépendant de la masse volumique du mélange granulaire, il varie pour un enrobé bitumineux 0/14 de 3,3 à 3,9.

II.7.3. Quelques méthodes de formulation [5], [15]

A partir des années 1960 ont été établis les principes encore en vigueur de la formulation des enrobés et améliorés au fil du temps. L'étude de formulation consiste en une série de compromis, puisque le comportement de l'enrobé oscille entre sensibilité aux déformations permanentes et à la fissuration par fatigue ou au désenrobage par arrachement des granulats.

L'objet de l'étude de formulation est de définir les dosages des divers constituants capables d'atteindre et d'assurer, au cours de la vie de l'ouvrage réalisé, le maintien à un niveau satisfaisant des performances.

II.7.3.1. Méthode CTTP (Algérie)

Ces méthodes traitent un seul aspect du comportement mécanique des enrobés à savoir la rupture plastique d'une éprouvette dans des conditions standard de température, d'humidité et de charge basées sur le principe que le choix de la composition appropriée doit répondre à exigences de résistance. Les essais mécaniques les plus utilisés sont l'essai de fluage Marshall et l'essai Duriez.

Les étapes de travail suivis par les laboratoires Algériens sont :

1. Sélection des composants (selon les exigences établies par les normes)
2. Détermination des caractéristiques physiques des mélanges obtenus pour différentes teneurs en liant.
3. Détermination des performances mécaniques des différents mélanges :
 - De compactage (Fluage et Stabilité Marshall).
 - De tenue à l'eau (Essai Duriez)

4. Choix de la formule optimale

II.7.3.2. Méthode LCPC (France)

C'est une méthode de formulation basée sur les essais mécaniques « modernes »

Les essais « modernes » ont pour but de déterminer les caractéristiques du comportement du matériau. Ces essais peuvent être classés en fonction de quatre propriétés appréhendées à différents temps pour les enrobés bitumineux à savoir : l'aptitude au compactage pour le court terme, l'orniérage et la fatigue pour le moyen terme et la durabilité pour le long terme. Les essais les plus utiles sont : l'essai de module complexe, l'essai de fatigue et l'essai de fluage dynamique.

Dans cette approche, la teneur en liant et l'enveloppe de la courbe ne sont pas fixées.

L'épreuve de formulation est caractérisée par une approche fondée le plus possible sur les performances du mélange. Les considérations volumétriques sont prises en compte au moyen de la presse à cisaillement giratoire. Cet essai est le pivot de la méthode car il est utilisé pour tous les types d'enrobés à chaud. Cette procédure est décrite sur le schéma ci-dessous.

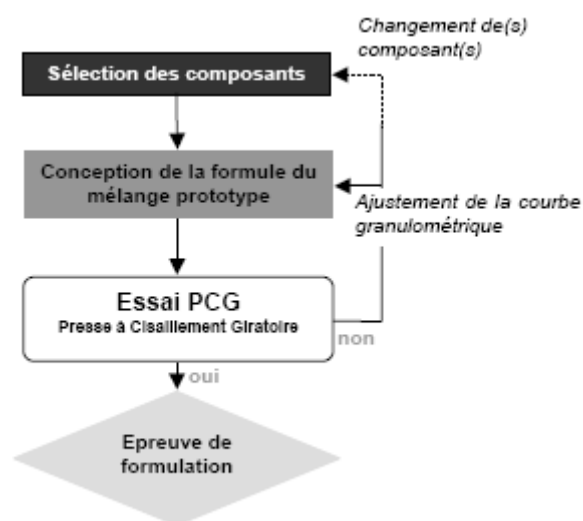


Figure II.27. Procédure de formulation en France [18]

- *Epreuves de formulation LCPC*

Des essais de laboratoire sont réalisés pour décrire le comportement d'un mélange bitumineux. La séquence d'essais est choisie en fonction du niveau d'épreuve. Le niveau dépend généralement du type de mélange, de la position de la couche de mélange hydrocarboné dans la chaussée, de son épaisseur, du trafic prévu, et de la nature des couches inférieurs.

L'épreuve de formulation fait l'objet de prescriptions normatives qui figurent dans les normes produits NF P 98-130 à NF P 98-141, dans la norme générale NF P 98-150. Elle fait également intervenir des prescriptions des normes sur les constituants –granulats (NF EN 13043), bitumes (NF EN 12591), agrégats (XP P 98-135).

Les normes européennes « produits », EN 13108-1 à 8, sont compatibles avec les prescriptions issues des normes françaises. La norme EN 13108-20 « Epreuve de formulation type » impose quelques dispositions complémentaires.

Les niveaux d'épreuves se présentent comme suit (figure II.28) ;

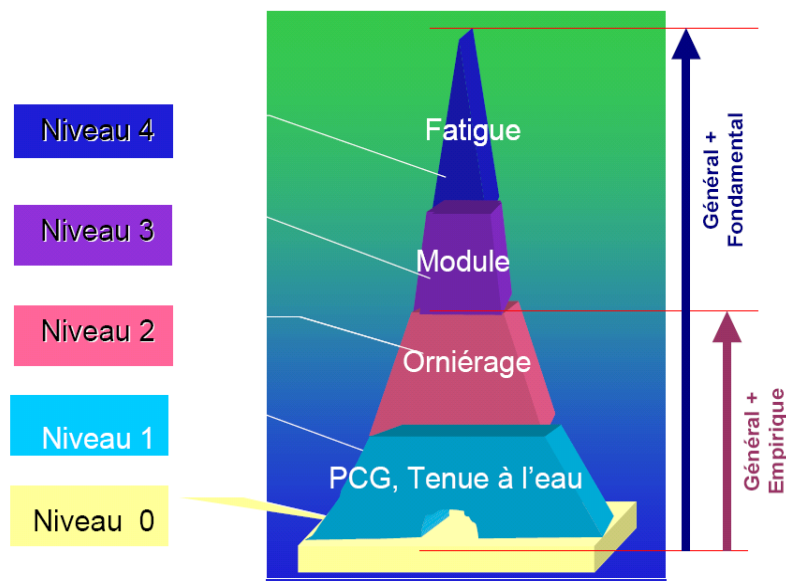


Figure II.28. Pyramide des niveaux de l'épreuve de formulation [25]

- **Niveau 0** : Le niveau 0 (sans essais) correspond aux enrobés destinés aux zones non circulées, et correspond à une description de la formule avec la granularité et la teneur en bitume.
- **Niveau 1** : Ce niveau comporte l'essai de Presse à Cisaillement Giratoire PCG (NF EN 12697-31) ainsi que l'essai de tenue à l'eau à 18°C (NF EN 12697-12) ;

À l'exception du niveau 0, ce niveau est commun à toutes les épreuves. Dans le cas d'applications à faible niveau de sollicitation, le niveau 1 peut être suffisant sans essai complémentaire.

- **Niveau 2** : Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement PCG (NF EN 12697-31) et Essai de tenue à l'eau à 18°C (NF EN 12697-12) ainsi que l'Essai d'orniérage (NF EN 12697-22) ;

- **Niveau 3** : Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement PCG (NF EN 12697-31) et Essai de tenue à l'eau à 18°C (NF EN 12697-12), l'Essai d'orniérage (NF EN 12697-22) ainsi que l'Essai de module complexe (NF EN 12697-26) ;
- **Niveau 4** : Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement PCG (NF EN 12697-31) et Essai de tenue à l'eau à 18°C (NF EN 12697-12), l'Essai d'orniérage (NF EN 12697-22), l'Essai de module complexe (NF EN 12697-26) et Essai de fatigue (NF EN 12697-24).

L'essai de fatigue est à spécifier dans le cas de chantiers très importants et dès que la couche concernée travaille en fatigue.

II.7.3.4. Facteurs influençant sur la formulation

Les matériaux utilisés dans la construction des chaussées bitumineuses étant essentiellement les enrobés, les facteurs de formulation qui interviennent sont essentiellement le liant et les composants minéraux.

A) Le liant

- *Influence de la nature du liant* : des études expérimentales montrent que l'utilisation des liants plus durs et moins susceptibles à la température diminue considérablement les risques d'orniérage, par contre elle peut poser des problèmes de fragilisation du mélange à basses températures.
- *Influence de la teneur en liant* : le niveau d'enrobage des composants minéraux est directement lié à la teneur en liant. L'introduction d'une quantité de liant excessive va saturer le mélange, ce qui réduit les efforts de contact entre des granulats. Par contre, une quantité insuffisante de liant n'assure pas un bon enrobage des granulats et les composants minéraux perdent cette fois l'adhésivité, la teneur en vide augmente et la stabilité du squelette granulaire diminue. Ceci engendre également une forte susceptibilité aux déformations permanentes due au post-compaction, de faibles cohésions et frottement interne.

B) Les composants minéraux

Les composants minéraux forment l'ossature rigide du mélange. Comme ils possèdent une forte hétérogénéité et des propriétés géométriques variables, les caractéristiques et propriétés mécaniques des mélanges, y compris la formation des déformations permanentes, varient

aussi suivant les composants minéraux utilisés.

- *Influence de la granularité et fraction de sable* : la granularité des composants minéraux utilisés est un paramètre important qui influe fortement sur la performance du mélange bitumineux. Les études expérimentales sur différents taux de discontinuité des granulats montrent bien l'influence de la granularité sur l'évolution de l'orniérage. En utilisant une granularité continue, le remplissage des vides entre les grains est assuré par les grains plus petits et le mélange a une meilleure compacité. De plus, ceci peut augmenter les contacts et les blocages intergranulaires. La rigidité, la stabilité et la résistance du mélange sont alors améliorées.

Le rôle du sable dans le mélange est également important. La présence d'une fraction raisonnable de sable contribue au renforcement du mélange contre l'orniérage, car il remplit les vides entre des grains plus gros pour assurer que la quantité de vide ne soit pas trop importante. Par contre, une quantité excessive de sable va diminuer le contact entre des grains plus gros (Les gravillons et les pierres concassées) en créant des rotules entre ces particules qui peuvent favoriser les translations et les rotations des granulats.

- *Influence du filler* : le filler absorbe une partie du liant introduit et forme le mastic qui remplit une partie des vides entre les granulats et réduit la teneur en vide du mélange. le filler est l'un des composants les plus importants du mélange, la présence du filler fait augmenter le temps de relaxation du liant et rigidifie alors le liant. les expériences ont montré que le mastic est sensible au cisaillement et que ses propriétés mécaniques dépendent de l'amplitude et de la durée d'application des charges. Elles sont fonction de l'historique du chargement.

II.8. 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 granulats et le bitume sont enrobés à l'aide d'un poste d'enrobage qui peut être du type « tambour-sécheur-malaxeur » ou « à fournée ». Dans les deux cas, les composants sont amenés à la température appropriée et mélangés dans des proportions bien définies pour constituer des

enrobés.

Chaque type d'enrobés est défini selon la nature et le dosage de ses constituants, par ses performances particulières et par la couche de la chaussée à laquelle il est destiné.

Les paramètres influençant la performance des enrobés sont la granulométrie, l'angularité et 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 à ce jour selon une approche empirique.

CHAPITRE III.

RECYCLAGE DES AGREGATS D'ENROBES

-ETAT DE L'ART-

III.1. Introduction [3], [7]

La construction routière est une grande consommatrice en granulats de qualité. Leur utilisation doit être optimisée pour trois raisons essentielles : la ressource n'est pas inépuisable, les contraintes environnementales deviennent de plus en plus strictes tant dans le domaine de l'ouverture que de l'exploitation des carrières, la mise en décharge des déchets est de plus en plus réglementée et le coût très élevé.

A l'analyse du problème, on constate que la plus grande ressource en granulats de qualité est la route elle-même. Les matériaux issus de la déconstruction des chaussées réalisées en enrobés bitumineux, les agrégats d'enrobés, sont des mélanges constitués de granulats de différentes tailles (pour environ 94 à 96%) et d'un bitume (de l'ordre de 6 à 4%).

Valoriser la totalité de ces matériaux bitumineux dans les techniques routières préserverait les ressources de granulats naturels à hauteur de 5 millions de tonnes et contribuerait à une économie de l'ordre de 250 000 tonnes de bitume (soit 6% de la consommation française aujourd'hui importée). De plus, le volume de déchets ainsi absorbé dans le secteur de la construction routière éviterait une gestion onéreuse et relativement limitée en moyens de l'élimination de ces mêmes déchets.

Cependant, la réutilisation des agrégats d'enrobés en technique routière est subordonnée au respect des exigences technologiques, environnementales et de santé publique. En matière d'environnement, l'accent est mis, selon les techniques, sur les rejets polluants à l'atmosphère ou dans les sols. Sur le plan technique, les précautions d'emploi concernent

principalement les études liées à la connaissance des caractéristiques du bitume vieilli qui se trouve dans les agrégats d'enrobés, et aux possibilités de redonner à ce bitume des caractéristiques désirées, ainsi qu'aux caractéristiques des granulats. Car, bien entendu, le produit fabriqué ne se soustrait pas aux règles élémentaires des contrôles de fabrication.

III.2. Définition Et Origine Des Agrégats D'enrobés Bitumineux

Les agrégats d'enrobés sont des mélanges de granulats, de liant bitumineux et quelquefois d'additifs, voire de déchets. Ce sont des matériaux granulaires provenant essentiellement du fraisage ou de la démolition d'enrobés bitumineux ainsi que des surplus des centrales d'enrobage au sens de la norme européenne NF EN 13108-8 [3].

Les agrégats d'enrobés sont considérés comme des déchets de la construction routière. Par ailleurs, ces agrégats ne sont pas des déchets ultimes.

L'ensemble des agrégats doit désormais être stocké avant valorisation, soit valorisé directement, soit mis en décharge adaptée dans le cas d'agrégats répertoriés comme dangereux.

Dans le cas d'une valorisation, les agrégats d'enrobés 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. [3]



Figure III.1. Plaque d'enrobés



Figure III.2. Agrégat d'enrobés après concassage

III.3. Techniques De Recyclage

Tous les matériaux routiers sont recyclables. Ils peuvent être réutilisés, soit en centrale, soit en place. Le recyclage en place procure des économies de transport supplémentaires.

Il existe tout un éventail de techniques de recyclage dont le choix dépendra de la nature du matériau à réutiliser, de son mode de traitement, et de la destination finale du produit en résultant. Le degré de pénétration des opérations de recyclage est très variable d'un pays à l'autre, et même d'une région à l'autre. Ainsi, en Europe du Nord, le recyclage est quasiment systématique. Aux États-Unis, la situation est fort différente d'un état à l'autre. Quel que soit le pays, le recyclage s'est développé plus tôt et plus vite dans les zones fortement urbanisées, confrontées à l'éloignement croissant des carrières et à la rareté des sites de décharge. [24]

La réutilisation et le recyclage des agrégats permettent de :

- Préserver les terres – la majorité des puits d'extraction et des carrières sont situés près des centres urbains afin de minimiser les coûts de transport des agrégats vers les projets de construction, ce qui entraîne une certaine concurrence et un conflit avec le développement résidentiel, commercial, industriel et récréatif.
- Réduire la consommation d'énergie – la production d'agrégats vierges requiert de l'énergie et le transport vers leur destination ultime, plus encore. Le recyclage permet de conserver l'énergie et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- Réduire les déchets – la réutilisation des agrégats et l'utilisation des autres déchets comme alternatives aux agrégats permettent de réduire la quantité de déchets dirigés vers les sites d'enfouissement.
- Réduire les coûts – dans la majorité des cas, les agrégats recyclés coûtent moins cher que les agrégats vierges. [25]

III.3.1 Les principaux types de recyclage des agrégats d'enrobés bitumineux

III.3.1.1 Le retraitement à froid [3], [26], [27]

Il existe deux possibilités différentes pour recycler à froid une chaussée existante :

- A. *Le traitement en centrale* : après démolition du matériau existant par fraisage, ce dernier est traité en centrale afin d'en améliorer ses caractéristiques mécaniques par correction de la granularité, et par l'ajout d'additifs et de liant d'apport. Cette

technique permet d'assurer une très bonne régularité des performances prévues lors des études en laboratoire par la maîtrise des paramètres lors de la fabrication en centrale.

B. *Le traitement en place* : l'objectif est de recréer, à partir d'une chaussée ancienne et dégradée, une structure stable et homogène. Elle consiste à traiter en place les matériaux existants avec apport éventuel de matériaux complémentaires ; on réalise ainsi une nouvelle assise de chaussée.

Le retraitement en place à froid à l'émulsion ou à la mousse de bitume consiste à fraiser ou fragmenter les matériaux de l'ancienne chaussée, puis dans un même temps ou en une deuxième opération, à incorporer dans le matériau de chaussée fragmenté un liant bitumineux sous forme d'émulsion ou de mousse de bitume afin de stabiliser la couche retraitée et lui donner une certaine cohésion. Le mélange est mis en forme et compacté pour reconstituer la chaussée en place.

Il est aussi employé aux Pays-Bas ou en Allemagne, pour stabiliser des matériaux considérés comme nocifs (enrobés comportant du goudron ou d'autres dérivés de la houille) présents dans certaines chaussées anciennes.

III.3.1.2. Le recyclage à chaud [3], [28], [29]

Le procédé consiste généralement à réutiliser les anciennes couches de surface en enrobés dont les caractéristiques se trouvent dégradées soit sous l'effet du trafic, soit par vieillissement du bitume ou lorsqu'un décollement de couche est observé.

Là aussi, deux techniques permettent de recycler, à chaud, ces couches d'enrobés :

A. *Le traitement en centrale fixe ou mobile après démolition par fraisage des matériaux en place* : l'enrobé, après avoir été fraisé, est transporté sur l'aire de stockage de la centrale où après granulation et criblage, les fraisats sont incorporés suivant un taux variable dans la centrale d'enrobés. La qualité du produit obtenu doit être identique à celle du produit neuf. Le taux de recyclage est de l'ordre de 10 à 25% pour les centrales traditionnelles, et de 20 à 35 % pour les centrales TSE (tambour, sécheur, enrobeur). L'étude de formulation doit permettre d'optimiser la composition granulométrique du mélange, et le dosage optimal en liant régénérant.

B. *Le traitement en place à l'aide d'ateliers multifonctions* : on distingue trois procédés:

- *Le thermoreprofilage* : consiste en une remise au profil d'une chaussée bitumineuse déformée ou avec des caractéristiques de surface médiocres, par chauffage, scarification, mise en forme et recompactage sans enlèvement ni apport d'enrobés neufs.
- *La thermorégénération* : est une remise au profil d'une chaussée bitumineuse déformée ou avec des caractéristiques de surface médiocre, avec enlèvement des matériaux par chauffage, scarification du revêtement sur une épaisseur plus importante, et mise en place d'une couche d'enrobés neufs.
- *Le thermorecyclage* : les matériaux enrobés scarifiés sont malaxés avec les correctifs nécessaires (agent de régénération du liant, bitume, granulats voir même nouveaux matériaux enrobés), avant d'être réglés au profil souhaité et compactés. Le thermorecyclage a, par rapport aux techniques précédentes, moins élaborées, l'avantage de permettre, en modifiant l'ancien enrobé dans sa masse, d'y porter remède à tout défaut de formulation ou d'y résoudre tout problème de vieillissement de son liant. Il convient naturellement de procéder, avant intervention, à une analyse précise des anciens matériaux enrobés de façon à pouvoir déterminer quelle doit être la composition de la correction.

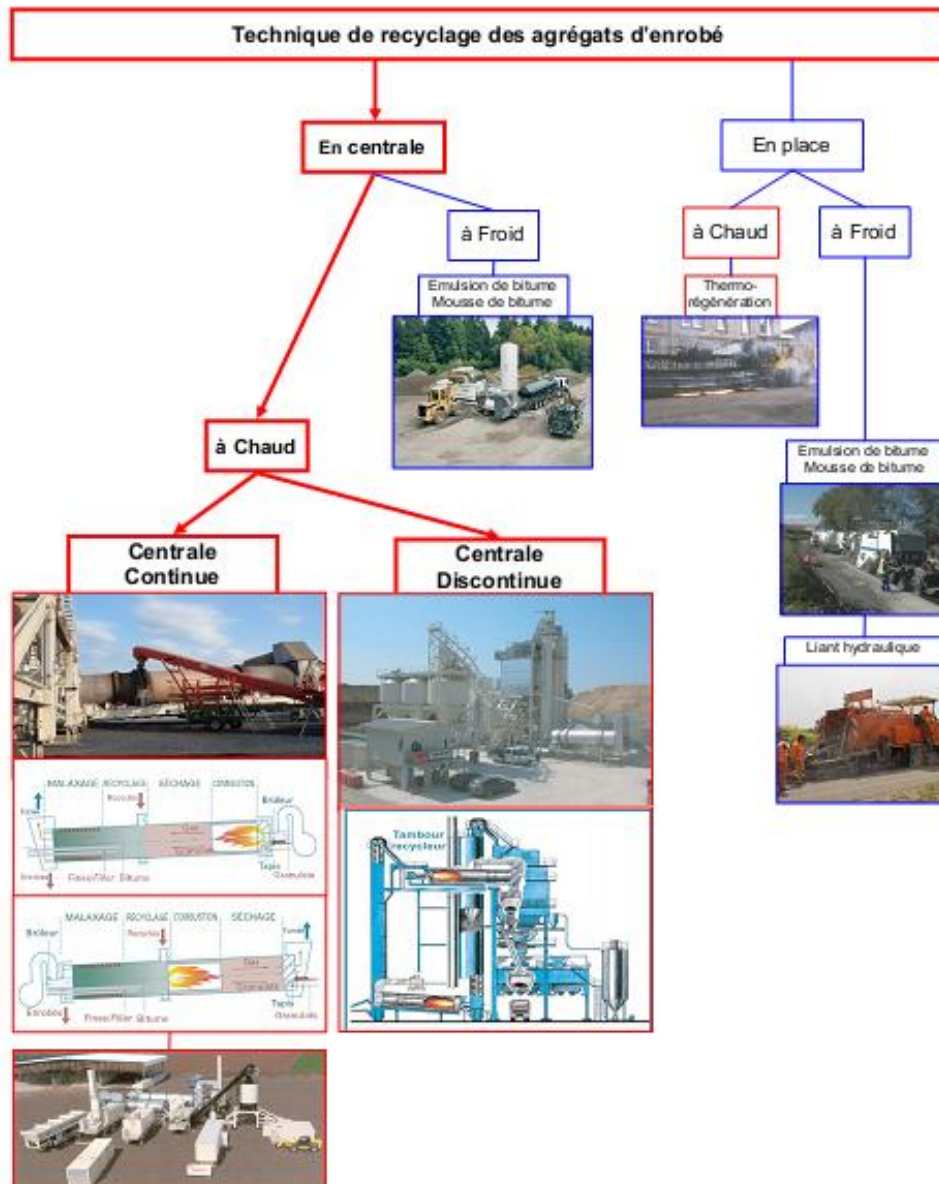


Figure III.3. Présentation des possibilités de techniques de recyclage des chaussées bitumineuses [7].

III.4. Les Différents Types De Centrales D'enrobage [14], [24]

Il existe trois types de centrales d'enrobage : centrale continue, centrale discontinue, centrale à tambour sécheur enrobeur (TSE).

Dans les trois cas, le poste d'enrobage assure les opérations suivantes :

- ✓ Le dosage des gravillons et du sable à l'aide de prédoseurs. Il s'agit de trémies sous lesquelles sont installés des tapis extracteurs. Le réglage de la vitesse de ces

extracteurs permet le dosage des granulats en volume ou bien en poids si les extracteurs sont équipés de système de pesage.

- ✓ Le séchage des matériaux, assuré par le tambour-sécheur. Il s'agit d'un tube d'acier, tournant sur lui-même, à l'intérieur duquel sont installées des auges, équipé d'un brûleur de forte puissance à une extrémité et d'une aspiration d'air à l'autre extrémité.
- ✓ L'air aspiré par le tambour sécheur, chargé de filler, est filtré par un filtre dépoussiéreur. Ce filler de récupération est ensuite réintroduit dans le process.
- ✓ Le malaxage de tous les constituants à l'aide du malaxeur, dans lequel sont injectés le bitume chaud et le filler.
 - pour les postes discontinus, le malaxeur est de type discontinu, c'est à dire que les constituants sont fabriqués par gâchées ;
 - pour les postes continus, le malaxeur est de type continu (le malaxeur malaxe et vide en continu tous les ingrédients introduits) ;
 - les postes TSE sont des postes continus pour lesquels le tambour sécheur réalise également le malaxage.

A la sortie du malaxeur, l'enrobé est transporté vers les trémies de stockage soit par un skip pour les centrales discontinues, soit par un élévateur à raclettes pour les postes TSE.

Un poste d'enrobage comprend également un stockage de bitume, appelé parc à liant, une chaudière nécessaire au réchauffage du bitume et une bascule pour peser les camions.

III.5. Enrobé Recyclé [7]

Le recyclage des agrégats d'enrobé est réalisé par incorporation des agrégats d'enrobé dans le cycle de fabrication des enrobés bitumineux. Nous verrons par la suite que, cet ajout facilement réalisable pour l'incorporation d'un faible taux d'agrégats d'enrobé nécessite de fortes modifications dans le cas du recyclage d'une part plus importante d'agrégats d'enrobé.

III.5.1. 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).

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 III.4 sur laquelle la part de LER est exagérée permettant d'en représenter la répartition en LA et LAE.

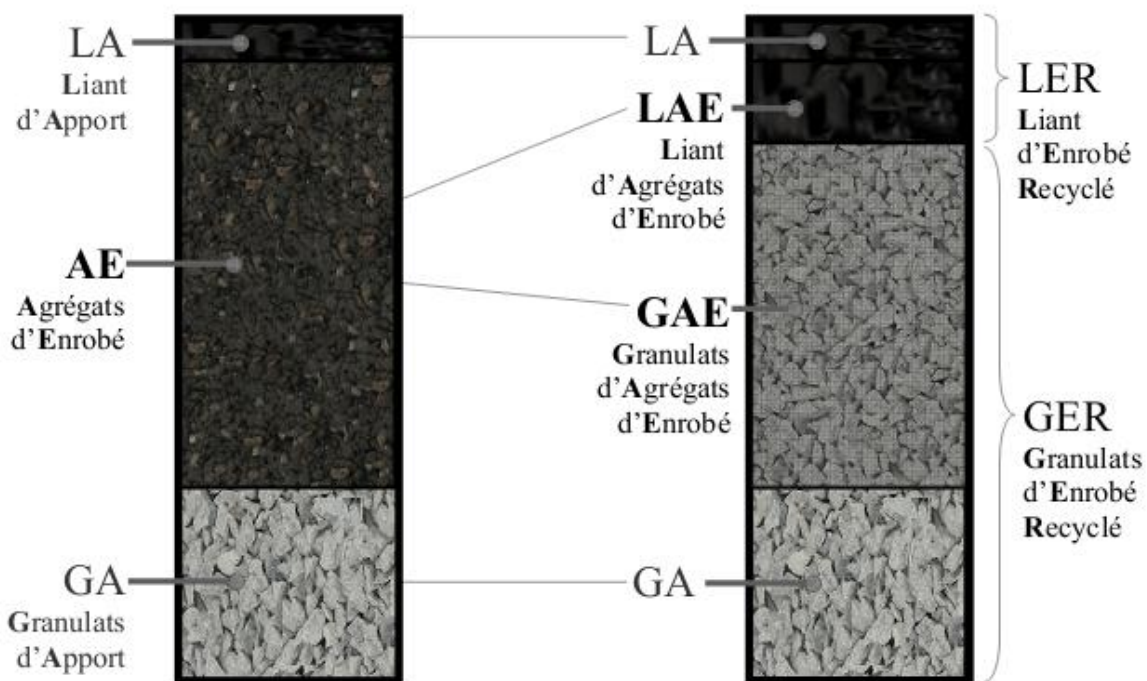


Figure III.4. Composition d'un enrobé recyclé et répartition de la participation des agrégats d'enrobé au liant et aux granulats de l'enrobé recyclé [7]

III.5.2. Taux de recyclage des enrobés recyclés [7]

Les enrobés recyclés sont principalement définis par la part massique d'agrégats d'enrobé qu'ils comportent. Cette part massique est communément appelée « pourcentage de recyclage ». Les enrobés recyclés contenant jusqu'à 20% d'agrégats d'enrobé sont dits à « faible taux de recyclage ». Cette dénomination s'oppose aux enrobés contenant entre 40% et 65% d'agrégats d'enrobé qui sont alors désignés par le terme « fort taux de recyclage ». Ce découpage arbitraire n'interdit en rien de recycler à des taux intermédiaires. Il n'existe pas de

définition stricte de faible et de fort taux. La définition proposée est tirée de l'expérience française du recyclage à fort taux.

➤ Taux de recyclage à faible taux

À faible taux de recyclage, les propriétés d'un enrobé sont peu influencées par la composition des agrégats d'enrobé. C'est pourquoi, sur un plan réglementaire, il n'est pas nécessaire de tenir compte de la composition des AE et de l'influence de celle-ci sur l'enrobé fabriqué dans la limite de 10% d'agrégats d'enrobé. Ce taux est porté à 20% dans le cas des couches de liaison et des couches d'assise.

➤ Taux de recyclage supérieur à 20%

À des taux de recyclage supérieurs, la composition des agrégats d'enrobé doit être prise en compte du fait de son influence sur les propriétés de l'enrobé. La composition des agrégats d'enrobé est alors étudiée afin de déterminer les caractéristiques du squelette granulaire et du liant bitumineux qui le lie.

III.5.3. Formulation des enrobés recyclés [7]

La formulation des enrobés recyclés consiste alors à ajuster les caractéristiques du liant d'apport et des granulats d'apports afin que les caractéristiques du liant et des granulats de l'enrobé recyclés soient comparables à celles d'un enrobé neuf. L'étape de formulation est une phase d'étude nécessitant de fabriquer des enrobés dans des conditions de laboratoire normativement définies.

III.5.3.1. Correction des caractéristiques du liant d'agrégats d'enrobé par l'ajustement des caractéristiques du liant d'apport

1) Le principe

Le principe de l'ajustement des caractéristiques du liant d'apport permet de réduire la rigidité du liant d'agrégat d'enrobé. Le liant d'apport est ainsi adapté afin que le liant de l'enrobé recyclé, résultant du mélange du liant d'apport avec le LAE (liant d'agrégat d'enrobé), possède des caractéristiques (pénétrabilité Pen_{LER} en 1/10mm et TBA_{LER} en °C) comparables avec celles du bitume qui aurait été utilisé pour la formulation d'un enrobé sans agrégats d'enrobé. Les caractéristiques du liant d'apport dépendent donc de la proportion de

liant d'agrégats d'enrobé dans le liant de l'enrobé recyclé et des caractéristiques de chaque liant. Cette proportion s'écrit C_{LAE}^{LER} et définit un taux de recyclage spécifique aux liants. Le principe d'ajustement des caractéristiques du liant d'apport et de correction du liant d'agrégats d'enrobé est présenté sur la figure III.5

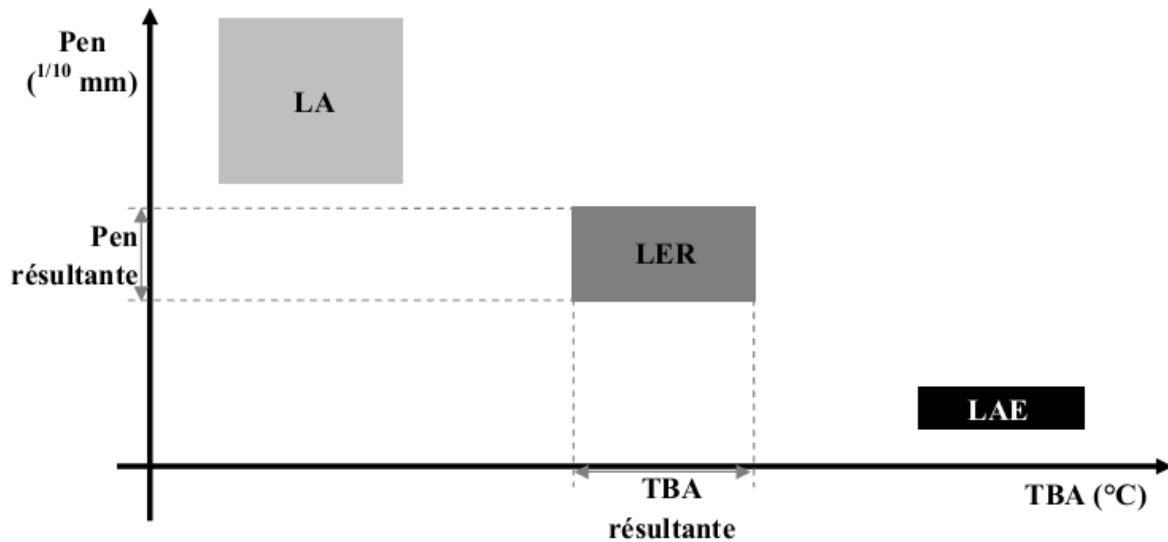


Figure III.5. Principe de mélange de liants bitumineux possédant des caractéristiques différentes LAE et LA.

2) Les règles existantes

Il existe trois règles (NF EN 13108-1 2007) permettant de déterminer les caractéristiques du liant d'apport (Pen_{LA} et TBA_{LA}) à partir des caractéristiques du liant d'agrégats d'enrobé (Pen_{LAE} et TBA_{LAE}) et des caractéristiques résultantes du mélange (Pen_{LER} et TBA_{LER}).

Les règles de mélange applicables aux liants bitumineux sont les suivantes :

- Règle d'addition des pénétrabilités :

$$\log(Pen_{LER}) = C_{LAE}^{LER} \log(Pen_{LAE}) + (1 - C_{LAE}^{LER}) \log(Pen_{LA}) \quad \text{Eq III.1}$$

- Règle d'addition des températures bille - anneau :

$$TBA_{LER} = C_{LAE}^{LER} TBA_{LAE} + (1 - C_{LAE}^{LER}) TBA_{LA} \quad \text{Eq III.2}$$

- Règle d'addition des viscosités :

$$\log(\log(\eta_{LER})) = C_{LAE}^{LER} \log(\log(\eta_{LAE})) + (1 - C_{LAE}^{LER}) \log(\log(\eta_{LA})) \quad \text{Eq III.3}$$

Les règles présentées supposent que la totalité du liant apporté par les AE se mélange parfaitement avec le LA. On parle alors de remobilisation totale du liant d'agrégats d'enrobé

pour imager sa participation au liant de l'enrobé recyclé.

D'autres méthodes de sélection du liant d'apport existent. Cependant, celles-ci dépendent de la méthode de formulation régissant la technique routière du pays concerné et tiennent compte des données climatiques de ce pays.

III.5.3.2. Correction de granulométrie des granulats d'agrégats d'enrobé par l'ajout de granulats d'apport

1) Principe

La formulation de l'enrobé recyclé consiste d'autre part à corriger la granulométrie des GAE (granulats d'agrégats d'enrobé) par l'ajout de granulats d'apport pour obtenir une granulométrie comparable à celle d'un enrobé neuf. La masse de granulats d'apport permet alors de définir un taux de recyclage spécifique aux granulats (C_{GAE}^{GER}). Ce taux est défini comme le rapport entre la masse de granulats d'agrégats d'enrobé (GAE) et la masse de granulats de l'enrobé recyclé (GER).

Il n'existe pas de règle de mélange permettant de prévoir les caractéristiques intrinsèques d'un mélange de granulats. Les granulats d'agrégats d'enrobé (GAE) sont ajoutés au granulats d'apport dans la limite où les caractéristiques intrinsèques de leur mélange restent compatibles avec la fonction de l'enrobé dans la chaussée.

III.5.3.3. Etude en laboratoire des enrobés bitumineux

L'étude en laboratoire des enrobés bitumineux est réalisée dans un cadre normatif. Celui-ci permet de comparer les performances des enrobés et de les garantir. À l'intérieur de ce cadre, la norme NF EN 12697-35 précise des conditions opératoires devant être suivies en laboratoire pour fabriquer un enrobé recyclé. Elle traite des appareillages à utiliser, des modes opératoires à suivre pour préparer les constituants et définit la température et la durée de malaxage de ces constituants. Dans cette norme, le cas des enrobés recyclés est traité comme un cas particulier du cas général et ne distingue pas les enrobés recyclés à faible taux.

1) Outils utilisés pour réaliser le mélange des constituants

Le mélange des constituants peut être réalisé par malaxage mécanique ou manuel. Dans le cas d'un malaxage mécanique, l'outil réalisant le malaxage est appelé « malaxeur ». Il est constitué d'une cuve thermostatée régulée à la température de fabrication et d'une partie

mobile permettant le mélange des constituants. La vitesse de rotation de cette partie mobile est réglable. Le maintien de l'ensemble des composants à la température de fabrication est réalisé par chauffage du contenant au moyen d'une plaque chauffante. Une note de la norme NF EN 12697-35 précise que le malaxage manuel n'est pas approprié à l'étude des enrobés recyclés.

2) Durée de malaxage

La durée maximale du malaxage mécanique des constituants lors de la fabrication des enrobés en laboratoire est précisé dans la norme NF EN 12697- 35. Si la formule étudiée ne contient pas d'agrégats d'enrobé, la durée maximale de malaxage des constituants est de 3 min. Cette durée est portée à 5 min si des agrégats d'enrobé sont utilisés. La durée minimale de malaxage est laissée à l'appréciation de l'opérateur avec pour conditions que les granulats soient complètement enrobés de liant et que le mélange soit visuellement homogène.

3) Température de malaxage

Dans le cadre de la fabrication d'un enrobé sans agrégats d'enrobé, la température de fabrication de l'enrobé, appelée aussi température de consigne, est fixée par le grade du bitume routier utilisé. Dans le cadre de la fabrication des enrobés recyclés, cette température est obtenue par mélange des constituants (AE, GA et LA) qui sont chauffés à des températures différentes. La norme NF EN 12697-35 distingue alors deux cas : l'un dans lequel les agrégats d'enrobé sont « chauffés à la température de consigne avant introduction dans la centrale » et l'autre dans lequel les agrégats « ne sont pas chauffés jusqu'à la température de consigne avant l'incorporation à la centrale ».

III.5.3.4. Fabrication industrielle des enrobés recyclés

La fabrication industrielle des enrobés recyclés consiste à produire un enrobé dont la composition est proche de la composition déterminée durant son étude en laboratoire au moyen d'outils de production techniquement adapté à la fabrication d'enrobé recyclé. Ces outils sont appelées centrale de fabrication. Elles se différencient par le chauffage ou non des agrégats d'enrobé avant leur incorporation en centrale.

1) Outils de production des enrobés bitumineux recyclés

La production en centrale de fabrication d'enrobés recyclés à fort taux a été rendue possible par des évolutions techniques importantes des centrales d'enrobage. Celles-ci ont principalement eu pour objectif d'optimiser l'échange de chaleur entre les granulats d'apport

et les agrégats d'enrobé, d'améliorer le malaxage des constituants et d'éviter une chauffe excessive des constituants pour limiter les rejets gazeux au plus bas taux de composants organiques possibles (SETRA 2006) [16].

a) Transfert de chaleur entre les granulats d'apport et les agrégats d'enrobé

Dans le processus industriel de fabrication des enrobés recyclés, ce sont les granulats d'apport qui apportent tout ou partie de l'énergie thermique aux agrégats d'enrobé. Ce transfert de chaleur est réalisé entre le point d'introduction des agrégats d'enrobé et le point de sortie de l'enrobé recyclé produit. La chaleur apportée sèche et chauffe les agrégats d'enrobé et favorise ainsi la remobilisation du liant d'agrégats d'enrobé.

b) L'eau dans le processus de production des enrobés recyclés

La présence d'eau dans les agrégats d'enrobé conduit à utiliser de l'énergie pour évaporer l'eau qu'ils contiennent. Afin de limiter l'humidité des agrégats d'enrobé qui entraîne une consommation d'énergie lors de la fabrication des enrobés recyclés à 160°C, les lots d'agrégats d'enrobé peuvent être couverts (Figure III.6)



Figure III.6. Couverture des lots d'agrégats d'enrobé pour limiter humidité et ensoleillement

c) Centrale incorporant les agrégats d'enrobé à température ambiante

Les centrales incorporant les agrégats d'enrobé à température ambiante ont une capacité de recyclage d'environ 50 % (Figure III.7). Elles peuvent donc fabriquer un enrobé composé d'environ 50 % d'agrégats d'enrobé. Ce taux peut être porté à 65 % si des agrégats d'enrobé secs sont utilisés.

Dans ce type de centrale, la température des granulats d'apport doit être alors augmentée afin

d'évaporer l'eau présente dans les agrégats d'enrobé. A titre d'information, lors de la fabrication à 20 % de recyclage et comparativement à des conditions de fabrication normale, une augmentation de 4 % de la teneur en eau des AE nécessite d'augmenter la température des granulats d'apport de 25°C pour produire un enrobé à 140°C.

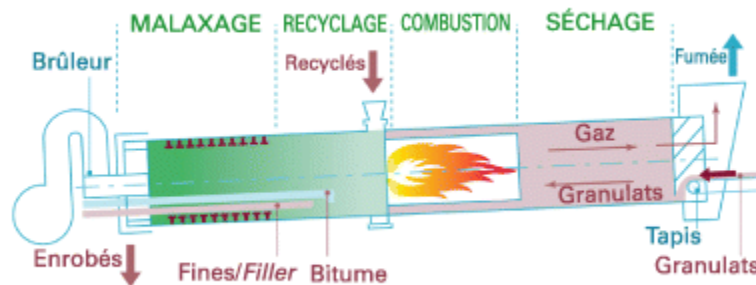


Figure III.7. Principe du poste continu TSE avec recyclage à contre-courant

d) Centrale incorporant des agrégats d'enrobé chauffés

Les centrales incorporant des agrégats d'enrobé chauffés permettent de se soustraire à l'obligation d'augmenter la température des granulats d'apport si les agrégats d'enrobé contiennent de l'eau. La chauffe des agrégats d'enrobé permet de les sécher et d'augmenter leur température à 110°C - 130°C avant leur mélange avec les granulats d'apport (GA). Le liant d'apport (LA) est ensuite ajouté. Figure III.8

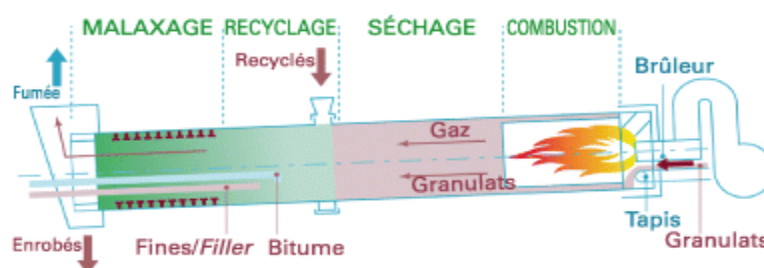


Figure III.8. Principe du poste continu TSE avec recyclage à équi-courant

III.5.4. Rôle de bitume recyclé et du liant d'apport [24]

« Le vieux bitume peut-il être considéré comme jouant encore le rôle d'un liant dans le nouveau mélange ? » ou fait-il parti intégrale de l'Agrégat d'Enrobé de sorte que ce dernier

soit considéré comme une «black rock ».

Dans le cadre des recherches du NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) projet 9-12 [30]. Cette étude a été menée pour déterminer si les agrégats d'enrobés bitumineux régénérés agissent comme des « black rock » lorsqu'ils servent de matière première pour fabriquer des enrobés bitumineux à chaud. Le terme « black rock » désigne l'agrégat constitué de granulats et de bitume vieilli qui se comporte mécaniquement comme un simple granulats de taille équivalente.

D'autres recherches, faisant appel à des techniques d'investigation sophistiquées, comme les traceurs radioactifs, montrent qu'il se produit lors de la fabrication de l'enrobe contenant des AE, une diffusion lente du liant d'apport dans le vieux bitume. Ceci démontre que les recyclats ne peuvent pas être simplement considérés comme une « black rock », ni un liant à part entière car ce n'est pas la totalité du vieux bitume qui est remobilisé [7].

En résumé, la réponse est « oui, le vieux bitume joue encore le rôle d'un liant dans le nouveau mélange mais jamais en totalité»

Le degré de remobilisation du vieux bitume dépend de la vitesse de diffusion de liant d'apport. D'où l'intérêt apporté à ce dernier.

En effet, régénérer le vieux bitume, lui redonner souplesse et adhésivité, a conduit au développement de liants véritablement régénérant. Il s'agit de mélanges reconstitués spécialement. Ils contiennent une forte proportion de fractions légères et peu, voire pas du tout, d'asphaltènes. Leur finalité est, en effet, de redonner une composition équilibrée au mélange de liants final. Certains sont à base de coupes pétrolières modifiées chimiquement ; d'autres, plus récents, font appel à des produits d'origine végétale.

Cependant, même dans ces conditions optimisées de mélange, il a été démontré que le mélange de bitumes des enrobés modèles recyclés n'est pas homogène, et que la loi des mélanges n'est pas respectée, en raison de la ré-oxydation du liant pendant l'étape d'enrobage des agrégats. Une récente étude réalisée à l'université du Nevada [31] a également montré que la méthode du diagramme des mélanges est peu fiable dans la plupart des cas d'enrobés recyclés réels étudiés, même pour des faibles teneurs en agrégats recyclés (15%).

Par ailleurs, Les essais mécaniques ont montré que [31] :

- jusqu'à 10% d'agrégats recyclés dans l'enrobé, l'influence du liant de l'agrégat est négligeable.
- Pour des teneurs de l'ordre de 40%, les propriétés du mélange sont plus proches du cas d'un mélange total entre les deux liants que d'un mélange de type « Black Rock ».

L'hypothèse du « black rock », et donc du double-enrobage n'est donc pas confirmée pour des teneurs en agrégats recyclés jusqu'à 40%.

III.6. Performances mécaniques de l'enrobé recyclé

Les performances mécaniques des enrobés bitumineux sont essentielles pour supporter durablement les contraintes induites par le trafic. Ces performances sont définies dans un cadre normatif. Afin de satisfaire à ces critères, l'épreuve de formulation vise à obtenir un enrobé apte à la mise en œuvre, gardant sa tenue sous l'effet de l'eau, peu susceptible à l'orniérage, suffisamment résistant et capable de résister durablement aux sollicitations mécaniques.

Dans le cadre des enrobés recyclés, des études ont montré qu'il est possible d'atteindre ces objectifs de deux manières : avec modification ou sans modification du liant d'apport

III.6.1. Performance des enrobés recyclés avec modification du liant d'apport

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 [32], [33]:

- 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

- Par ailleurs, une étude conduite en centrale d'enrobage avec production d'enrobés contenant plus de 40% d'agrégats d'enrobés recyclés a révélé que l'enrobé fabriqué, avec un liant d'apport suivant les prescriptions n'était pas significativement plus rigide qu'un enrobé neuf [32]
- Selon l'étude effectuée citée plus haut [35], l'addition de 15% et 30% d'agrégats d'enrobés peut générer une réduction de la résistance à la traction.

III.6.2. Performance des enrobés recyclés sans modification du liant d'apport

Une partie de l'étude du NCHRP [36] porte sur l'étude des caractéristiques mécaniques des enrobés recyclés sans effectuer de correction en liant d'apport.

Elle montre que :

- l'augmentation du taux de recyclage conduit à de forte évolution des caractéristiques mécaniques, principalement notable entre les taux de 20 % et 40 % de recyclage.
- Ainsi, si les caractéristiques du liant d'apport ne sont pas corrigées pour tenir compte des caractéristiques du liant d'agrégats d'enrobé, l'augmentation du taux de recyclage conduit à une rigidification de l'enrobé recyclé.
- Cette rigidification se traduit par une augmentation exponentielle du module de rigidité de l'enrobé, une augmentation de la rigidité à basse température et une diminution de la résistance à la fatigue mesurée par des essais de flexion sur poutre.
- Ce résultat s'oppose aux conclusions de BAAJ [37] qui indique que la résistance à la fatigue augmente avec la diminution de la pénétrabilité des bitumes.
- Par ailleurs, les rapports du NCHRP [36], indique que l'augmentation de la rigidité peut conduire à une fragilisation aux basses températures et à une augmentation de la fissuration par le haut. Ils indiquent de plus que la correction du liant d'apport permet d'annuler ces effets.
- la rigidité des enrobés contenant un fort pourcentage d'agrégats recyclés (> 40%), ont montré que si on ne change pas le grade du bitume d'apport, l'augmentation de la rigidité de l'enrobé reste significative que ce soit à faible, moyenne et haute températures [33], [34]

III.7. Conclusion

D'une manière générale, le recul important dont on dispose permet d'affirmer que le recyclage à chaud en centrale produit des enrobés en tous points conformes aux spécifications applicables à l'enrobé neuf correspondant. Quant à leur comportement en place, il peut -sous réserve- être qualifié d'entièrement satisfaisant [24].

L'hypothèse du « black rock », et donc du double-enrobage n'est pas confirmée pour des teneurs en agrégats recyclés jusqu'à 40%,

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 vieux bitume doit être régénéré afin de lui redonner souplesse et adhésivité.

Les taux de recyclage à chaud dépendent de type de centrale de fabrication ; en laboratoire il est préconisé de suivre les recommandations suivantes :

- Jusqu'à 15%, les agrégats d'enrobés bitumineux peuvent être utilisés sans modification du grade du liant d'apport ;
- Entre 15% et 25% d'agrégats d'enrobés bitumineux, le grade du liant d'apport doit être diminué d'un incrément.
- Au delà de 25%, des diagrammes de mélanges doivent être utilisés pour déterminer le grade du liant d'apport à choisir.
- L'addition de 15% et 30% d'agrégats d'enrobés peut générer une réduction de la résistance à la traction
 - Il a été constaté que l'enrobé présente une résistance moins bonne à la fatigue.
 - L'augmentation dans ce cas du pourcentage d'agrégats recyclés (> 40%) augmente la rigidité de l'enrobé d'une manière significative que ce soit à faible, moyenne et haute températures.

CHAPITRE IV.

IDENTIFICATION DES MATERIAUX

La partie expérimentale comporte deux volets : formulation d'un Béton Bitumineux Semi Grenu 0/14 (BBSG 0/14), formulation d'un Béton Bitumineux avec incorporation d'Agrégats d'Enrobés (AE) à divers taux. Ces deux volets sont précédés d'une identification des matériaux décrite dans ce chapitre.

Ces matériaux sont essentiellement :

- Des Granulats provenant de la carrière de KEDDARA, fournit par l'EVSM (Entreprise de Viabilisation de Sidi Moussa), il s'agit de fractions granulaires 0/3, 3/8 et 8/15.
- Un bitume 40/50 fournit par Naftal.
- Des Agrégats d'Enrobés obtenus à partir de fraisât du tronçon de RN61, réalisé en 2009. Les matériaux qui ont été utilisés dans la formulation et la réalisation provenaient de la carrière AZROU KEDDARA

Les granulats et le bitume sont identifiés et caractérisés selon les procédures classiques. Quant à la caractérisation des Agrégats d'Enrobés, elle comporte plusieurs étapes :

1. Etude granulométrique des fraisât avant désenrobage.
2. Etude granulométrique des fraisât après désenrobage.
3. Détermination de la teneur en liant
4. Caractérisation du liant récupéré.

IV.1. Les Granulats

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 entre dans notre cas dans le fuseau de spécification d'un BBSG0/14.

IV.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 du l'EVSM. Les trois fractions utilisées sont données dans le tableau IV.1, ainsi que leurs origines,

Tableau IV.1. Provenance des granulats utilisés.

Matériaux	Carrières	Entreprise d'exploitation
Sable 0/3	KEDDARA(AZROU) (BOUMERDES)	EVSM
Gravillon 3/8	KEDDARA(AZROU) (BOUMERDES)	EVSM
Gravier 8/15	KEDDARA(AZROU) (BOUMERDES)	EVSM

Les échantillons des différentes fractions sont représentés dans la figure suivante

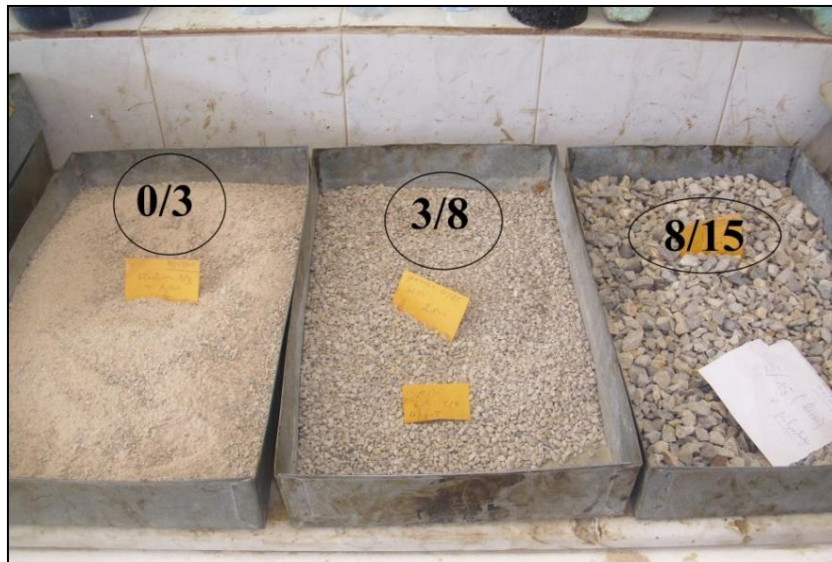


Figure IV.1. Les trois fractions granulaires

IV.1.2. Caractéristiques intrinsèques des granulats

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

- La masse volumique réelle (NF EN 1097-6). (figure IV.2)
- La résistance à l'usure en présence d'eau : essai MICRO-DEVAL (NF EN 1097-1). (Figure IV.3 - IV.4).
- La résistance aux chocs : essai LOS ANGELES (NF EN 1097-2). (figure IV.5).

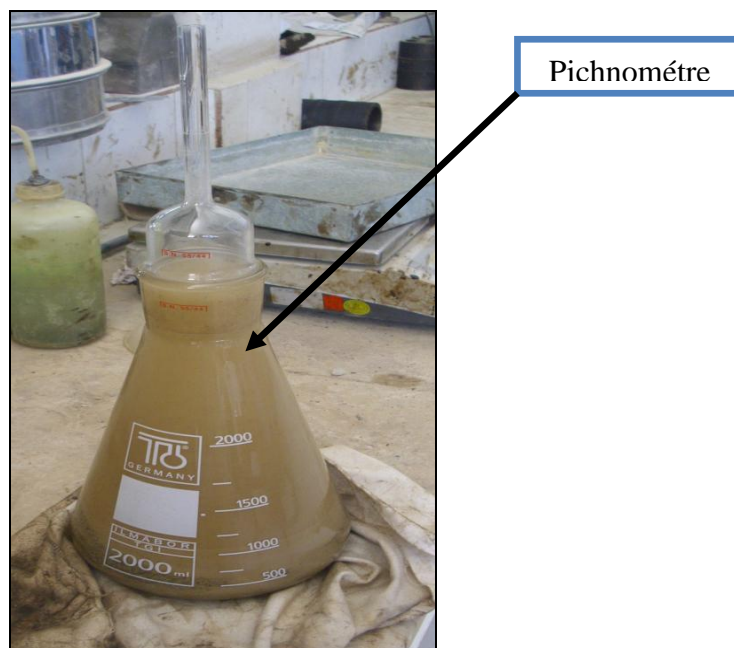


Figure IV.2. Essai de la masse volumique



Charge abrasive

Figure IV.3. Jarre Micro Deval



Figure IV.4. Machine Micro Deval



Figure IV.5. Machine Los Angeles

Les résultats sont donnés par le tableau IV.2 :

Tableau IV.2. Caractéristiques intrinsèques des granulats.

Essais	Référence	0/3	3/8	8/15	Spécifications
Masse volumique réelle [t/m ³]	NF EN 1097-6	2,65	2,69	2,69	>2,6
LA [%]	NF EN 1097-2	-	24,00	27,08	≤30
MDE [%]	NF EN 1097-1	-	13,48	11,38	≤25

IV.1.3. Caractéristiques de fabrications des granulats

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

- L'analyse granulométrique (NF EN 933-1), (figure IV.6).
- L'essai d'aplatissement (NF EN 933-3), (figure IV.7).
- La propreté superficielle (NFP18-591),
- L'équivalent de sable (NF EN 933-8).
- La valeur au bleu de méthylène (EN 933-9).

Les résultats de ces essais sont regroupés dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3. Caractéristiques de fabrication des granulats

Essais	Résultats			Spécifications	
	0/3	3/8	8/15		
Coefficient d'aplatissement [%]	-	19,36	20,52	≤ 25	bon
Propreté superficielle [%]		2,94	1	< 2	propre
Equivalent de sable à 10% de fines [%]	80,38	-	-	≥ 60	Sable propre
Valeur au bleu de méthylène	1	-	-	< 2	bon

IV.1.4. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est effectuée à l'aide d'une série de tamis

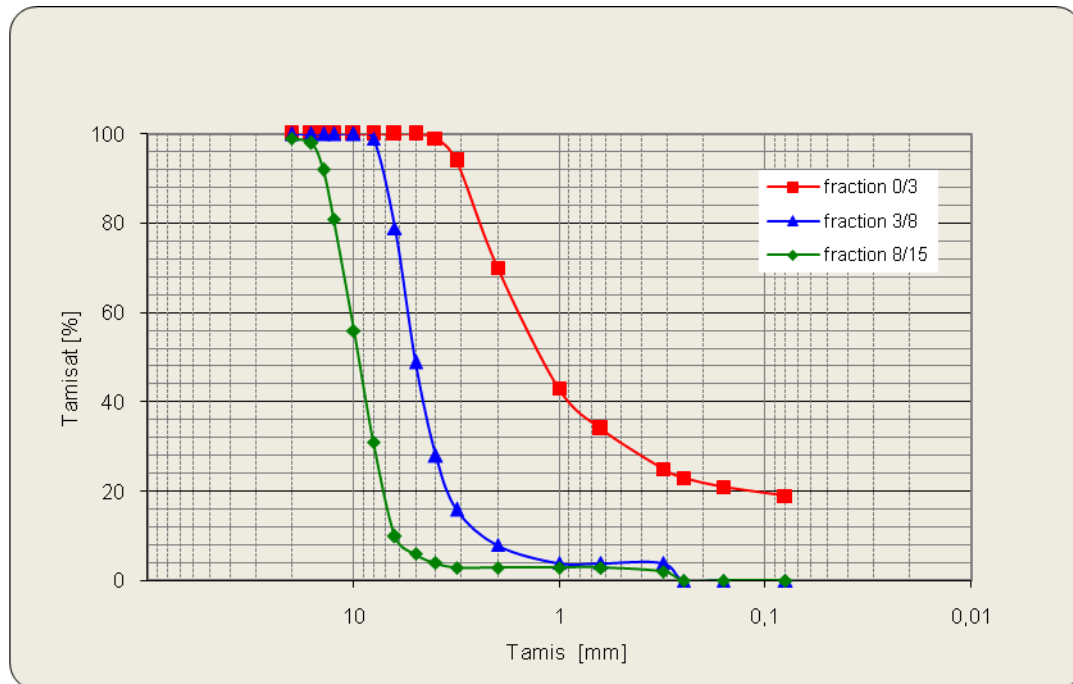


Figure IV.6. Série de tamis (0,08-20mm)



Figure IV.7. Série de grilles

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



- Ductilité (norme NF T 66-006), (figure IV.12)
- Adhésivité, (figure IV.13)

Les caractéristiques physiques et mécaniques du bitume de base sont résumées dans le tableau IV.5.

Tableau IV.4. Caractéristique du bitume

Type d'essai	Résultat	Moyenne	Spécifications
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	45-46	45,5	35-50
Température bille et anneau « TBA » (°C)	50-51	50,5	50-58
Densité relative (g/cm ³)	1,01	1,01	1,0 à 1,05
Ductilité (cm)	>100	-	>100



Figure IV.9. Essai de densité relative

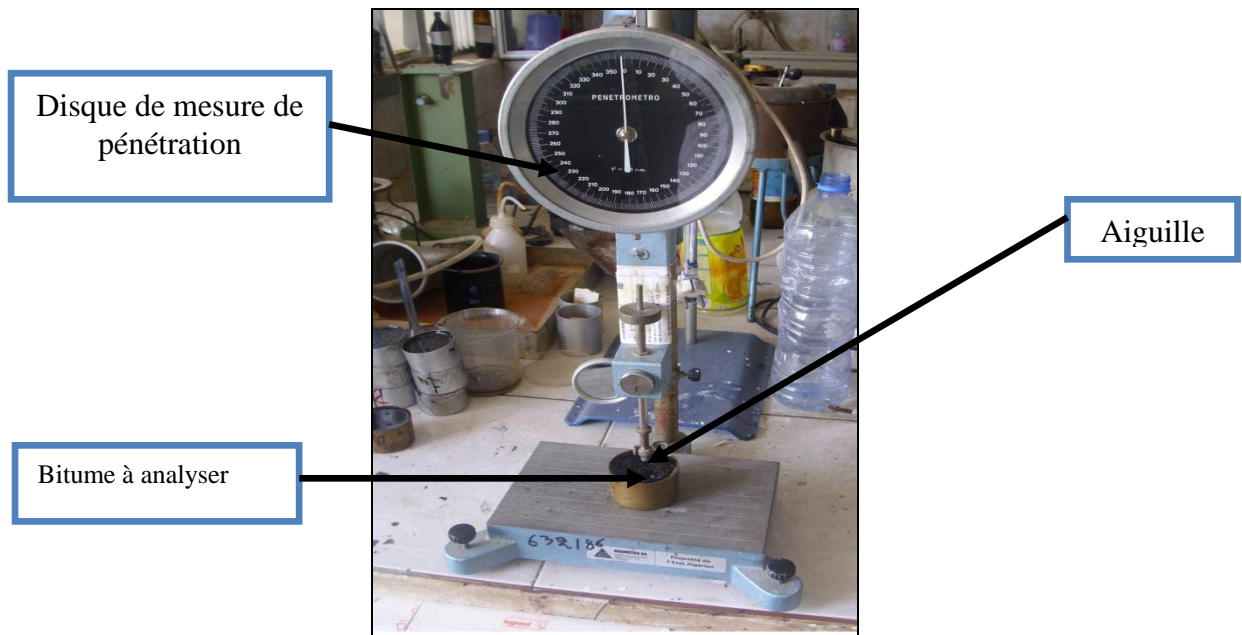


Figure IV.10. Appareil de l'essai de pénétrabilité

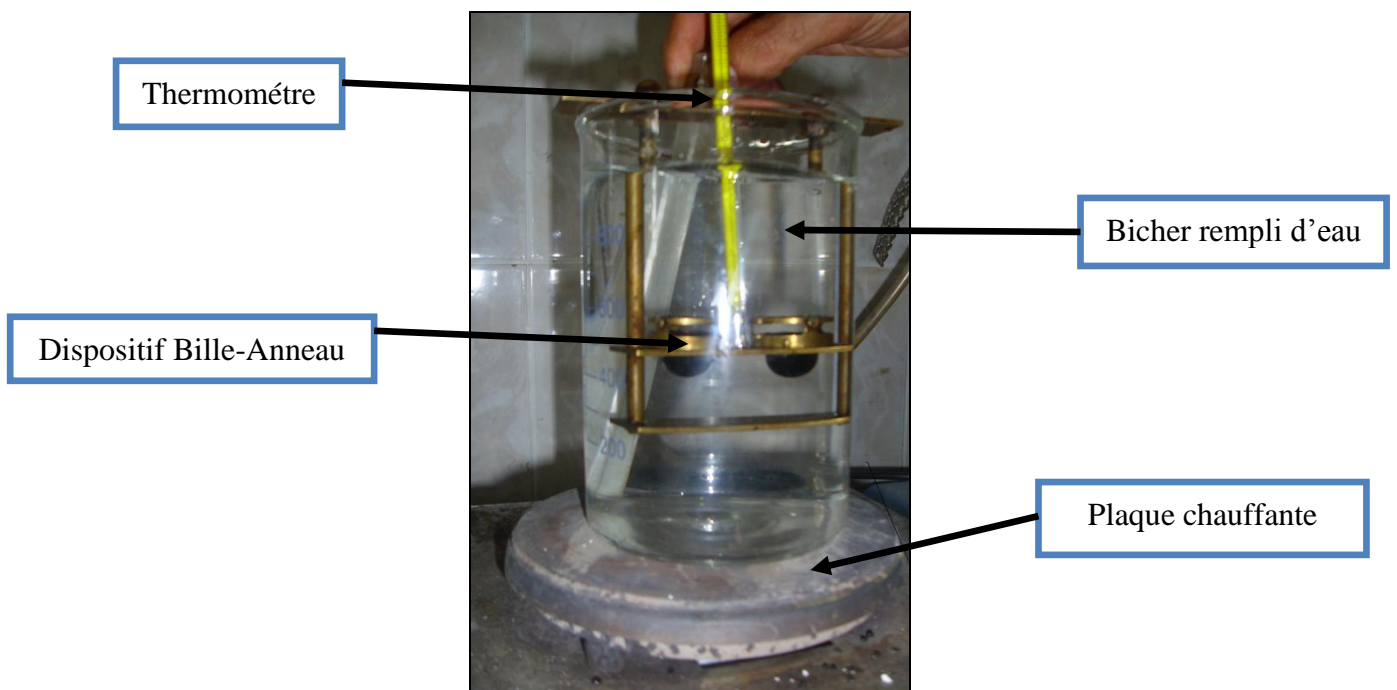


Figure IV.11. Appareil de l'essai Bille-Anneau



Figure IV.12. Essai de ductilité

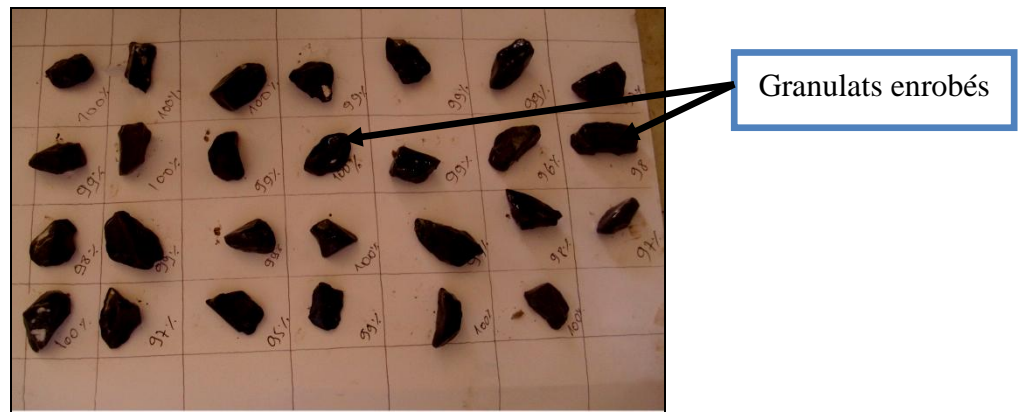


Figure IV.13. Résultat d'essai d'adhésivité

Le bitume analysé répond bien aux caractéristiques de la classe 40/50 selon la norme NF T65-001.

IV.3. Les Agrégats d'Enrobés ou Fraisâts

Les fraisâts qui sont utilisés dans l'expérimentation proviennent du tronçon de la RN 61 réalisé en 2009, à Réghaia. Les matériaux qui ont été utilisés dans la formulation provenaient de la carrière AZROU (KEDDARA). Le fraisât nous a été remis par l'entreprise de réalisation Entreprise de Viabilisation de Sidi Moussa (EVSM), indiquant une formulation d'un BBSG 0/14 avec Bitume 40/50.



Fig

ure IV.14. Echantillon du fraisât

IV.3.1. Etude granulométrique des fraisâts sans extraction du liant

Après récupération des fraisâts, on passe au quartage puis on effectuera la granulométrie des fraisâts avant extraction.

La courbe granulométrique du mélange d'agrégats d'enrobés avant désenrobage est donnée dans la figure ci-dessous ;

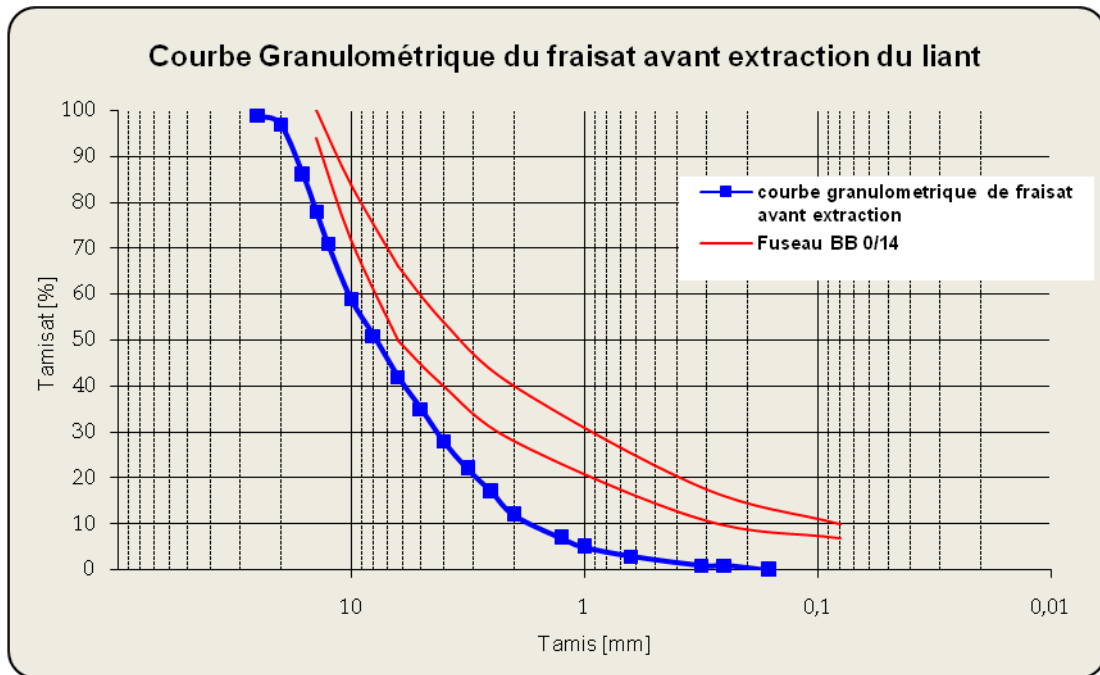


Figure IV .15. Courbe granulométrique du fraisats avant extraction de bitume

Le calcul de d et D donnent :

$$d = 0,25 \text{ mm}$$

$$D = 27,5 \text{ mm}$$

Le refus à 25 mm est de 1%

Ces résultats sont conformes aux critères cités dans les travaux d'EL BEZE [4]

- Une granularité de 0/20 à 0/31 mm,
- Un refus à 25 mm inférieur à 7% ; la quantité de gros agglomérats ($> 25\text{mm}$) est donc limitée pour favoriser la fragmentation de ces agglomérats dans le tambour sécheur.

IV.3.2. Etude granulométrique après extraction du liant

L'extraction du liant par la méthode de KUMAGAWA en utilisant le perchlore comme solvant a été faite à l'EVSM de Sidi Moussa.

La courbe granulométrique du mélange d'agrégats d'enrobés après désenrobage est donnée dans la figure ci-dessous ;

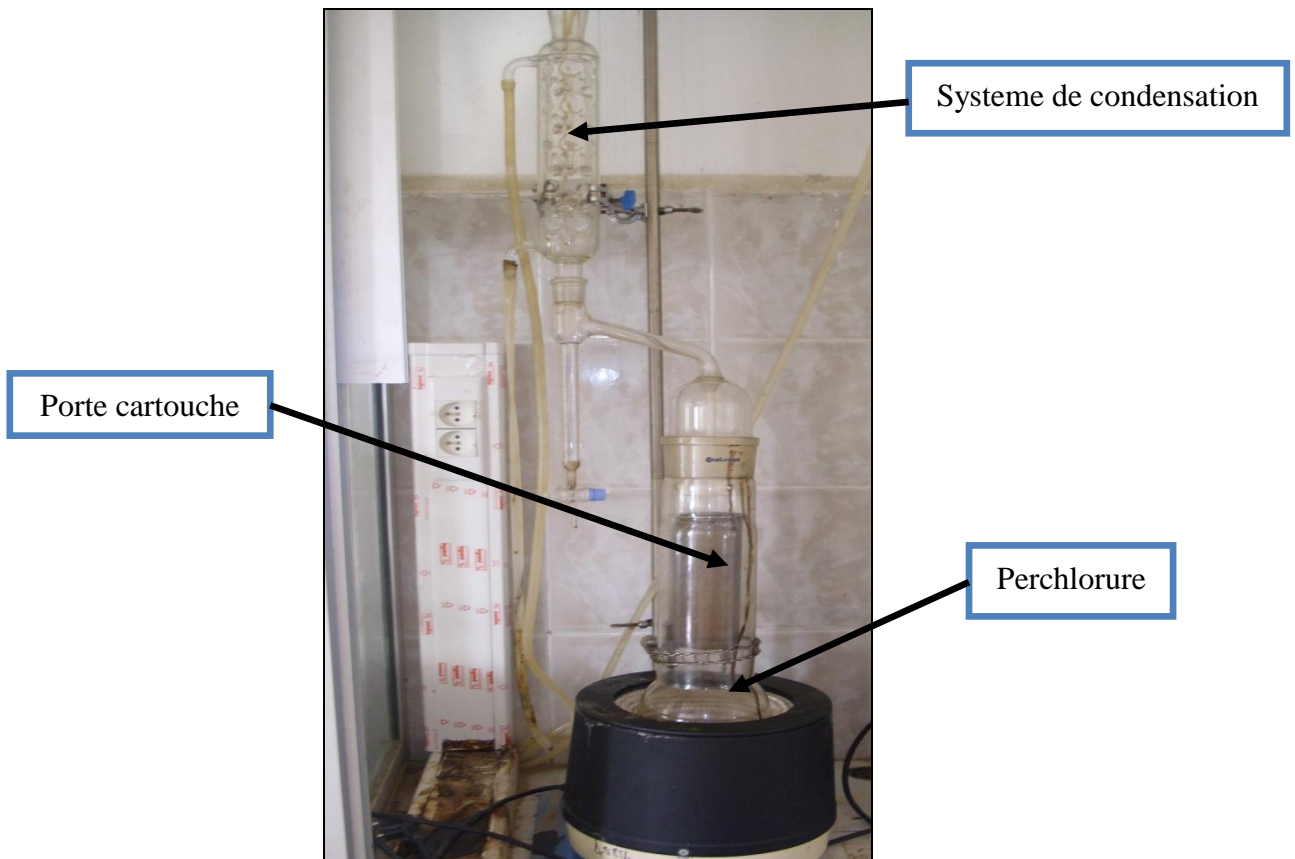


Figure IV.17. Appareil KUMAGAWA

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.8

Tableau IV.5. Teneur en liant des fraisât

Essai	Moyenne sur fraisât	Enrobé neuf (formulation)
Teneur en liant(%)	5,71	5,9
Surface spécifique Σ (m ² /Kg)	17,23	12,48
Module de richesse K	3,30	3,75
Pourcentage des fines < 80 μ (%)	11,18	19

La teneur en liant est proche de celle de l'enrobé neuf ce qui est une caractéristique des agrégats récupérés par fraisage d'une couche d'enrobé homogène.

IV.3.4. Essais de caractérisation du liant (Pénétrabilité, TBA)

La solution liant avec le solvant est récupérée après que l'extraction soit achevée ;on passe à la récupération de liant bitumineux en évaporant le perchlorure du mélange.

L'évaporation se fera avec la méthode de la distillation par évaporation rotative, le mode opératoire de l'essai est comme suite :

- Introduire dans le ballon à distiller 350 cm³ de solution de bitume d'une concentration approximative de 150 gr de bitume dans 1000 cm³ de perchlorure;
- Régler la vitesse de rotation du ballon de distillation à raison de 75 tr/min ;
- Chauffer le bain d'huile à une température de 120°C;
- Réduire en même temps la pression progressivement à 30kpa;
- Poursuivre la distillation jusqu'à ce que le volume de la solution soit réduit à environ 100cm³, puis réalimenter le ballon de distillation par aspiration de la solution;
- Répéter l'opération jusqu'à épuisement de la solution;

En suite après récupération de bitume, on effectuera les essais de caractérisation (Pénétrabilité, Point de ramollissement de ce dernier.



Figure IV.18.Appareil d'extraction du perchlorure de la solution contenant le bitume vieilli

Les résultats obtenus des essais effectués sur le liant récupéré sont présentés dans le tableau IV.9

Tableau IV.6. Caractéristique du liant vieilli

Essai réalisé	Résultats sur liant vieilli	Bitume d'origine 40/50
Pénétrabilité (25°C) (1/10 mm)	19	45,5
Point de ramollissement TBA (°C)	75	50

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 se manifeste par une baisse de la pénétrabilité passant de 45,5 à 19 dixième de mm dénotant un durcissement du bitume du fraisât, et une meilleure sensibilité à la chaleur indiquée par une température de ramollissement plus élevée 75 °C au lieu de 50°C ;

Ce vieillissement correspond à un gain en moyenne de plus de deux classes, soit à un bitume plus dur que celui de grade 20/30 qui est un bitume relativement dur.

IV.4. Conclusion

Les matériaux préparés pour la formulation des enrobés neufs et des enrobés avec incorporation d'agrégats d'enrobés ont été identifiés dans cette partie ; il apparait que l'ensemble des matériaux répondent aux normes d'utilisation.

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

Le liant vieilli a gagné plus de deux classes et la teneur en liant des agrégats est proche de celle de l'enrobé d'origine. Pour pouvoir obtenir un enrobé recyclé ayant les mêmes caractéristiques qu'un enrobé neuf, le vieux liant devrait être régénéré.

CHAPITRE V.

FORMULATION D'UN BETON BITUMINEUX CLASSIQUE

Il s'agit de la formulation d'un enrobé bitumineux semi grenu (BBSG0/14), appartenant à la classe des enrobés denses définis dans le chapitre II. Les prescriptions CTP 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 et quotient Marshall
- **Essai Duriez** : rapport des résistances en immersion et à sec (tenue à l'eau)

V.1. Formulation Du Béton Bitumineux Semi Grenu 0/14

L'étude de la formulation des enrobés bitumineux consiste à chercher la teneur optimale en liant pour assurer un certain seuil de stabilité, de compacité, de résistance à l'eau (désenrobage) et au fluage. Pour ce faire, nous avons procédé à :

- Choisir un mélange granulaire composé des trois fractions granulométriques (0/3, 3/8 et le 8/15) s'insérant parfaitement dans un fuseau de référence.

- Déterminer la teneur optimale en bitume à l'égard des spécifications de compacité et de résistance mécanique (Marshall et Duriez) en vigueur en Algérie.

V.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 aptitude au compactage 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 utilisé est celui d'un béton bitumineux semi grenu 0/14 (BBSG 0/14) dont les valeurs limites sont données dans le tableau ci-dessous ;

Tableau V.1. Le fuseau de référence BB 0/14

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

Une fois qu'on obtient les analyses granulométriques des différentes fractions (0/3, 3/8, 8/15), on attribue un pourcentage pour chaque fraction, ensuite on fera une combinaison des fractions granulaires utilisées de manière à ce que la courbe de mélange s'insère dans le fuseau de référence. A défaut on ajustera les pourcentages jusqu'à l'obtention d'une courbe qui s'insère dans le fuseau.

Pour que la courbe de mélange s'insère dans le fuseau de référence, on retient la composition granulaire suivante :

Tableau V.2. Composition du mélange granulométrique

Fraction	Pourcentage (%)
Sable 0/3	40
Gravillon 3/8	20
Gravier 8/15	40

La courbe granulométrique de mélange issue de cette formule s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique au béton bitumineux semi grenu 0/14 selon les recommandations algériennes pour l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux de Février 2004

La courbe granulométrique du mélange est donnée dans la figure suivante :

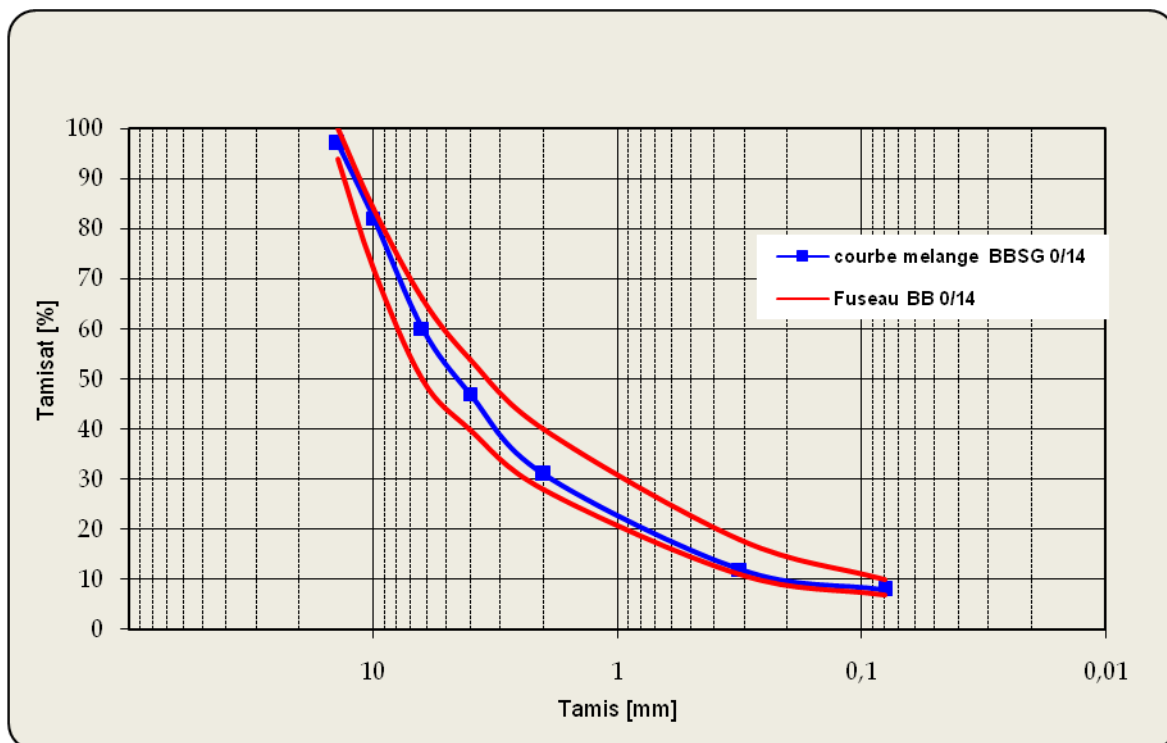


Figure V.1. Courbe granulométrique du mélange granulaire BBSG 0/14

On remarque que la courbe granulométrique s'insère bien dans le fuseau de référence préconisé en Algérie pour les bétons bitumineux semi-grenus 0/14.

V.1.2. Détermination de la teneur optimale en bitume

Pour déterminer cette teneur en liant optimale, on introduit la notion de surface spécifique des granulats notée Σ et exprimée en m^2/kg , c'est-à-dire la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères.

Pour un mélange granulométrique donné, la formule suivante permet d'avoir une approximation de la surface spécifique Σ :

$$100 \Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f \quad \text{Eq V.1}$$

Avec:

G : des éléments supérieurs à 6.3 mm,

S : des éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm,

s : des éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm,

f : des éléments inférieurs à 0.08 mm,

La teneur en liant, fonction de la surface spécifique des granulats, est donnée par la formule expérimentale suivante :

$$TL\% = \alpha \cdot k \cdot \sqrt[5]{\Sigma} \quad \text{Eq V.2}$$

Avec :

TL : teneur en liant (%)

α : coefficient destiné à tenir compte de la masse volumique réel des granulats « MVR g ». Si celle-ci diffère de $2.65 t/m^3$, on utilise la formule suivante :

$$\alpha = \frac{2,65}{MVR g} \quad \text{Eq V.3}$$

Σ : surface spécifique des granulats (m^2/kg),

K : le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film de bitume autour des granulats (k varie pour un enrobé bitumineux 0/14 de 3,3 à 3,9),

V.1.3. Application numérique pour notre cas

1. Calcul de la surface spécifique des granulats:

Tableau V.3. Calcul de la surface spécifique

Tamis	Tamisât % (Mélange proposé)	Paramètre de calcul de Σ
20	100,00	G=40%
16	99,00	
14	97,00	
12,5	92,00	
10	82,00	
8	72,00	
6,3	60,00	S=48%
5	52,00	
4	47,00	
3,15	42,00	
2	31,00	
1	19,00	
0,63	16,00	s=4%
0,315	12,00	
0,25	9,00	
0,16	9,00	
0,08	8,00	
$\Sigma (m^2/Kg)$		12,48
$\sqrt[5]{\Sigma}$		1,65

2. Calcul de la masse volumique réelle des granulats MVRg:

$$MVR = \frac{\text{densite de } 0/3}{\% \text{ } 0/3} + \frac{\text{densite de } 3/8}{\% \text{ } 3/8} + \frac{\text{densite de } 8/15}{\% \text{ } 8/15}$$

$$MVR = \frac{2,67}{40} + \frac{2,69}{20} + \frac{2,69}{40} = 2,68$$

3. Calcul du coefficient α :

$$\alpha = \frac{2,65}{MVR \text{ g}} = \frac{2,65}{2,68} = 0,99 \Rightarrow \alpha \approx 1$$

4. Calcul de la teneur en bitume :

$$TL\% = \alpha \cdot k \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$$

Les teneurs en liant en fonction des modules de richesses sont données dans le tableau V.4

Tableau V.4. Teneurs en bitume obtenues

<i>Formule</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Module de richesse	3,45	3,6	3,75
Teneur en liant (%)	5,65	5,90	6,14

V.1.4. Essais de performances mécaniques

Les essais réalisés en Algérie pour tester les performances mécaniques du béton bitumineux sont uniquement :

- Essai MARSHALL (NF EN 12697-34).
- Essai Duriez (NFP 98-252-1).

On a proposé d'ajouter l'essai de traction indirecte

- Essai de traction indirecte EN (12697-23).

V.1.4.1. Essai Marshall

1. Principe de l'essai :

L'essai consiste à compacter des éprouvettes par damage selon un processus déterminé, puis les soumettre à un essai de compression (diamètre) suivant une génératrice dans des conditions définies [10].

2. Le mode opératoire :

- Mettre à l'étuve le mélange retenu d'un poids total dépendant du nombre de moule ainsi que le bitume et les moules Marshall à une température spécifiée pendant 2 heures (figure V.2);
- Sortir de l'étuve la cuve contenant le mélange granulaire et la poser sur la plaque chauffante ainsi que le bitume;
- Peser la quantité de bitume relative à chaque mélange ;
- Malaxer le mélange granulaire pour homogénéiser pendant 30 secondes ;
- Peser et verser la quantité du liant préconisée en actionnant le malaxeur pendant 2 à 5 minutes (figure V.3);
- Remplir le moule d'enrobé à raison de 1200g à 1g près (figure V.4) ;

- Compacter à la dame électrique à 50 coups par face (figure V.5) ;
- Laisser refroidir le moule sous jet d'eau pendant 15 minutes ;
- Démouler les éprouvettes et les laisser refroidir pendant 5 heures à une température ambiante (figure V.6)
- Numéroté les éprouvettes de 1 à 6 et on réserve 3 éprouvettes pour mesurer la densité apparente par pesée hydrostatique ;
- Peser les éprouvettes à 1g près ;
- Mesurer les dimensions des éprouvettes au 0.1mm près en 5 zones différentes (en hauteur) ;
- Préparer le bain-marie à $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ (figure V.7)
- Immerger les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement dans l'eau à 60°C pendant 40 minutes ; échelonner à 5 minutes par éprouvette ;
- Sortir l'éprouvette du bain et la placer sur les mâchoires d'écrasement, l'ensemble est porté entre les plateaux de la presse réglée à une vitesse de 0.86mm/s (figure V.8) ;
- Procéder à l'écrasement et lire la valeur en KN correspond à la charge maximale d'écrasement ;
- Mesurer la valeur de l'affaissement de l'éprouvette selon son diamètre vertical au moment de la rupture (fluage en 1/10) mm à l'aide du pied à coulisses.

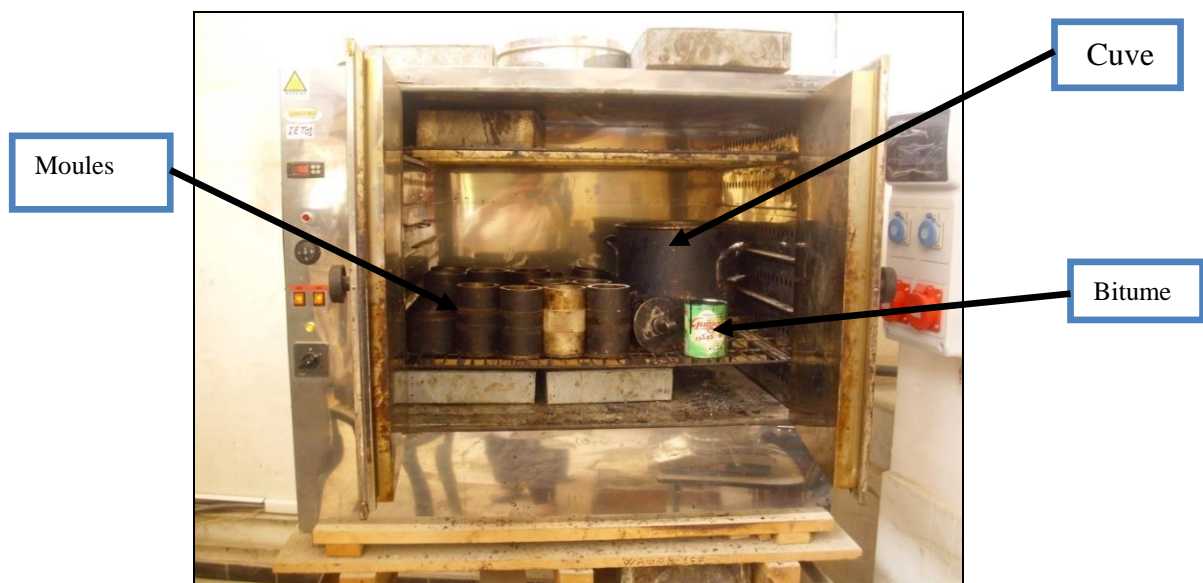


Figure V.2. Etuve de chauffage



Enrobé bitumineux

Figure V.3. Enrobé après malaxage



Moule Marshall

Figure V.4. Remplissage des moules Marshall



Figure V.5. Dame Marshall



Figure V.6. Eprouvettes Marshall

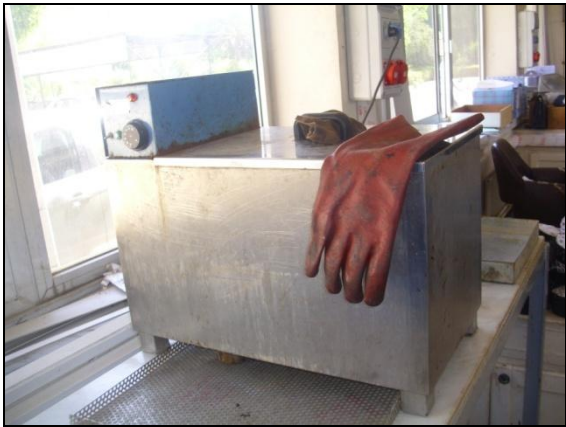


Figure V.7. Bain-Marie

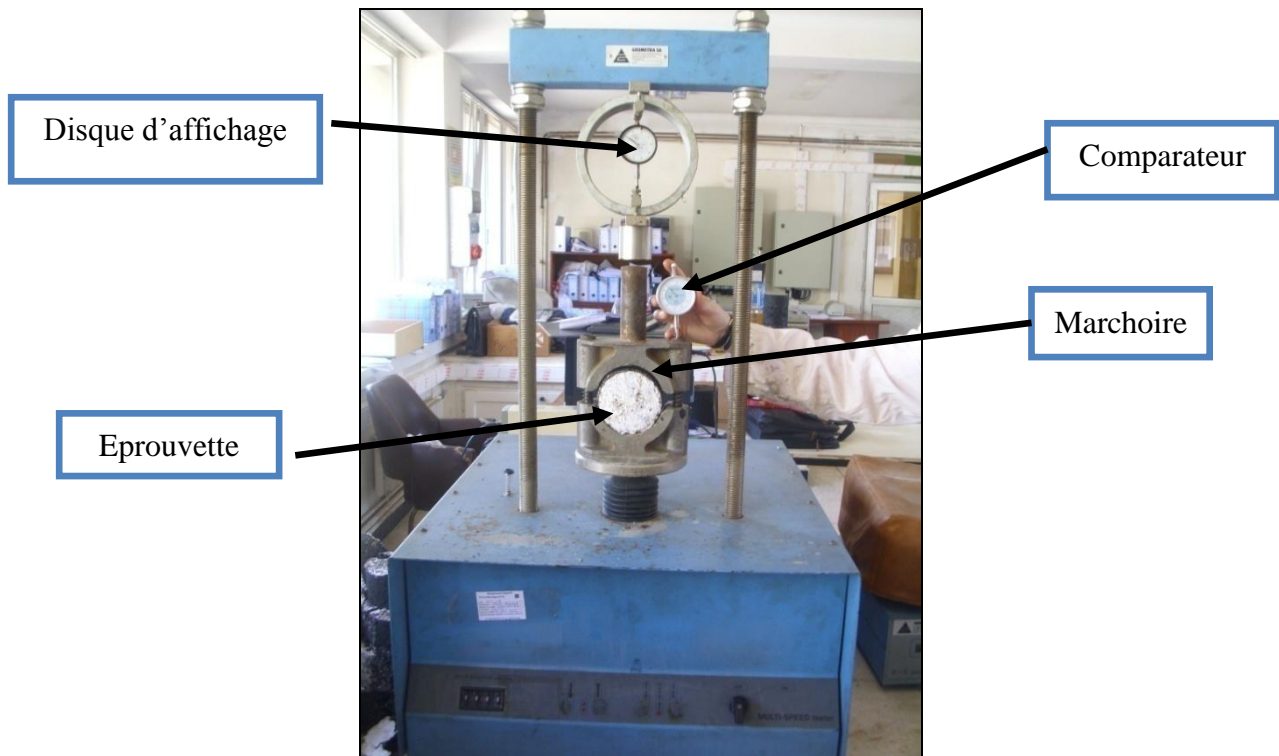


Figure V. 8. Presse Marshall

V.1.4.2. Essai Duriez

1. Principe de l'essai :

Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai sont fabriquées par compactage statique à double effet. Des éprouvettes sont soumises à l'essai de compression après conservation à 18°C pendant 7 jours dans des conditions définies à l'air pour certaines éprouvettes en immersion pour d'autres.

La tenue à l'eau est caractérisée par le rapport des résistances en immersion sur les résistances à sec.

2. Mode opératoire :

- Mettre à l'étuve le mélange retenu d'un poids spécifié ainsi que le bitume choisi et les moules Duriez à une température spécifiée pendant 2 heures.
- Sortir de l'étuve la cuve contenant le mélange granulaire et la poser sur la plaque chauffante ainsi que le bitume.
- Peser et verser la quantité du liant préconisée en actionnant le malaxeur pendant 2 à 5 minutes (visuellement).
- Remplir les moules d'enrobé à raison de 1000g à 1g près (figure V.9).

- Compacter sous presse Duriez avec une charge de 60 KN pendant 5 minutes (figure V.10)
- Laisser refroidir les moules sous jet d'eau pendant 15 minutes ;
- Démouler les éprouvettes et les laisser refroidir pendant 5 heures à une température ambiante ;
- Peser les éprouvettes à 1g près ;
- Mesurer les dimensions des éprouvettes au 0.1mm près en 3 zones différentes (en hauteur) ;
- Conserver la moitié des éprouvettes en immersion à 18°C pendant 7 jours et les autres à sec pendant aussi 7 jours.(figure V.11).
- Le 7^{eme} jour, on les écrase avec la presse Duriez, ce qui nous permet de d'avoir les résistances à sec et en immersion.

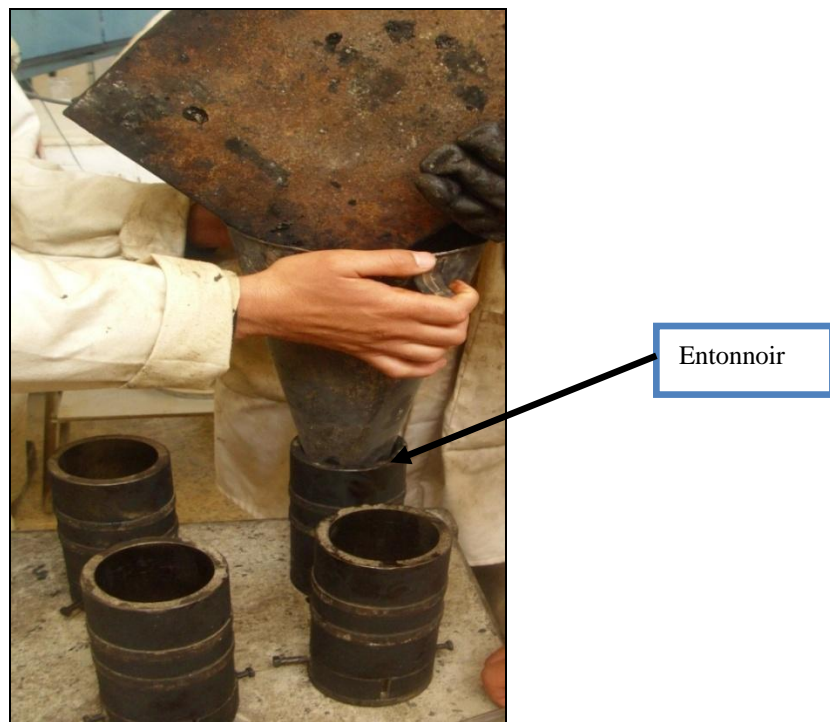


Figure V.9. Remplissage des moules Duriez

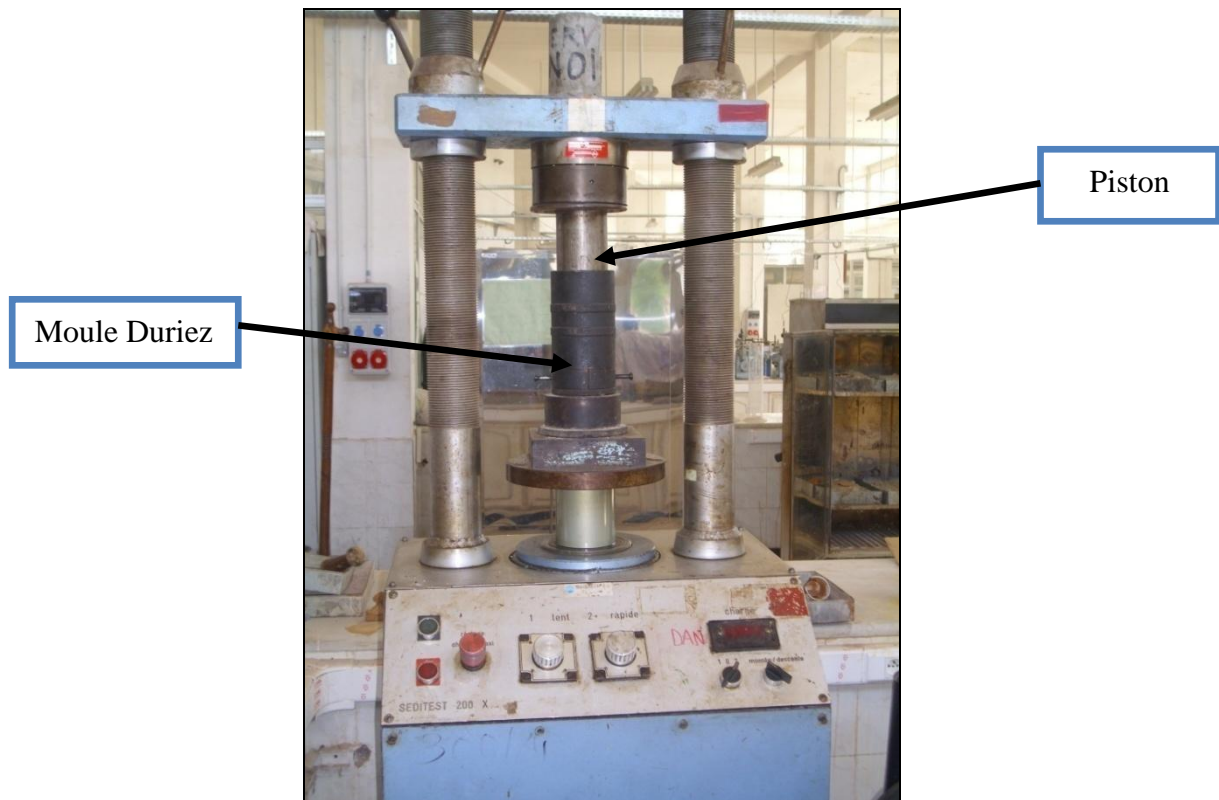


Figure V.10. Presse Duriez



Figure V.11. Eprouvettes Duriez

V.1.4.3. Essai de traction indirecte

En plus des essais de formulation décrit dans le chapitre précédent, nous avons associé dans cette étude l'essai de traction indirecte décrit dans la norme EN 12697-23.

On a proposé la vérification de l'enrobé vis-à-vis de la résistance à la traction indirecte à différentes températures pour voir l'influence de celles ci sur son comportement mécanique.

1. Principe :

L'éprouvette cylindrique à soumettre à l'essai est portée à la température d'essai spécifiée, placée sur une presse d'essai entre des bandes de chargement et soumise à une charge diamétrale le long de l'axe du cylindre à une vitesse constante de déplacement jusqu'à rupture. La résistance à la traction indirecte est la contrainte de traction maximale calculée à partir de la charge maximale appliquée jusqu'à rupture et des dimensions de l'éprouvette.

2. Mode opératoire :

1. Confectionner des éprouvettes Marshall .

2. Conserver les éprouvettes à température voulue. On a choisi 15° C et 20° C parce que la norme exige une température entre 5°C et 25°C.

3. Prélever une éprouvette conditionnée et l'introduire dans le cadre d'essai. La machine d'essai doit être installée dans une salle de laboratoire où la température est comprise entre 15 ° C et 25 ° C.

Il est recommandé de nettoyer et de lubrifier les rails de guidage du cadre d'essai pour que la partie supérieure coulisse correctement.

4. Aligner l'éprouvette sur la bande de chargement inférieure, pour pouvoir la charger diamétralement. (figure V.12).

5. Exercer une compression sur l'éprouvette. Appliquer la charge diamétrale de manière continue, sans à-coups, à une vitesse de déformation constante de (50 ± 2) mm/min , jusqu'à atteindre la charge maximale à la rupture ; enregistrer la charge maximale P.

6. Après avoir obtenu la charge à la rupture, on calcule la résistance à la traction indirecte par la formule suivante :

$$R = \frac{2P}{\pi HD} \quad \text{Eq V.4}$$

R : est la résistance à la traction indirecte, exprimée en gigapascals (GPa), arrondie à trois chiffres significatifs ;

P : est la charge maximale, exprimée en kilonewtons (kN), arrondie à trois chiffres significatifs ;

D : est le diamètre de l'éprouvette, exprimé en millimètres (mm), à une décimale près ;

H : est la hauteur de l'éprouvette, exprimée en millimètres (mm), à une décimale près.

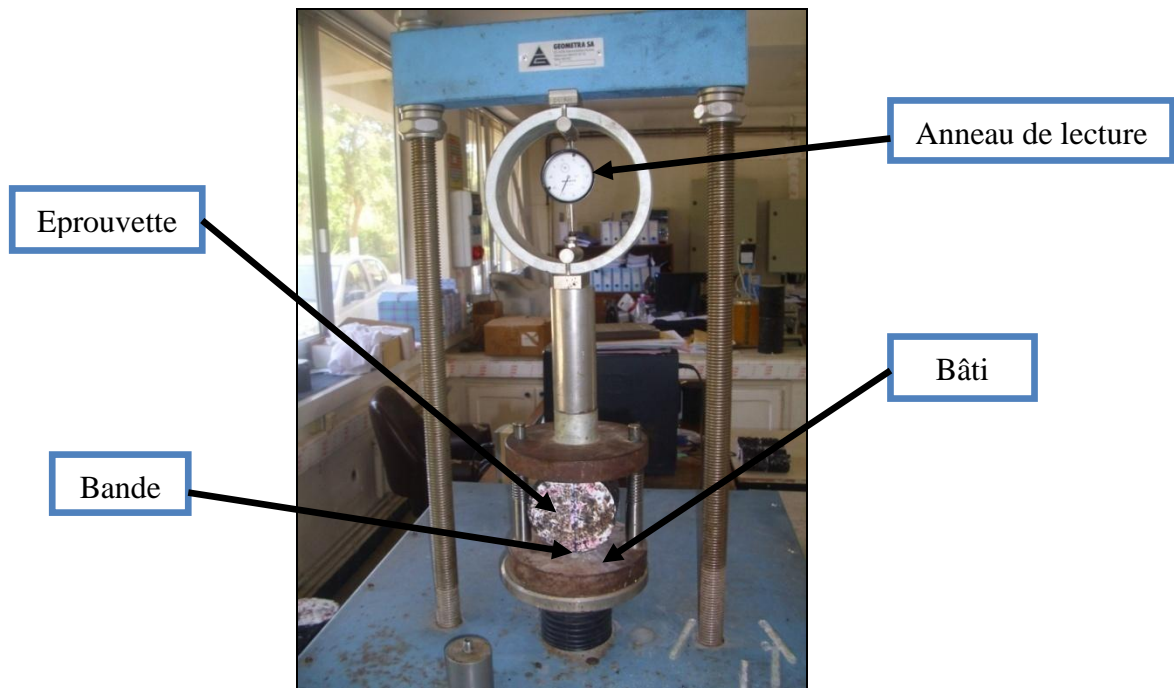


Figure V.12. Essai de traction indirecte

Note : le nombre d'éprouvettes est de trois (3) par taux de fraisât et par température.

V.1.5. Choix de la formulation optimale

A) Enrobé bitumineux avec TL1=5,65% :

Module de richesse de mélange : K=3,45

La teneur en liant est égale à : 5,65%

Les résultats des essais effectués sur cet enrobé sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau V. 5. % de vide (TL1)

Eprouvette	1	2	4	Moyenne
Caractéristique				
Masse de l'éprouvette (gr)	1203,8	1202,5	1202,8	1203,03
Volume de l'éprouvette (cm ³)	518,9	503,6	501,2	507,9
Densité apparente (t/m ³)	2,36	2,36	2,39	2,37
Densité réelle (t/m ³)	2,47	2,47	2,47	2,47
Compacité(%)	95,66	95,66	96,86	96,06
% de vide	4,34	4,34	3,13	3,94

Tableau V.6. Résultats de stabilité et fluage Marshall.

N° de l'éprouvette	3	5	6	moyenne
Lecture anneau	40	45,5	41	-
Stabilité Marshall(KN)	9,28	10,56	9,51	9,78
Stabilité après corrélation(S)(KN)	9,28	11,51	10,36	10,38
Fluage Marshall(F) (mm)	1,9	2,28	2,65	2,28
Quotient Marshall(S/F)(KN/mm)	4,48	5,05	3,91	4,48

Tableau V.7. Résultats de la tenue à l'eau.

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6
Lecture presse	41,6	51,8	45,1	56,6	46,6	46,6
RCsec (MPa)		10,52		11,49	9,46	
RCsec moyenne (MPa)	10,5					
RCimm (MPa)	8,45		9,16			9,46
RCimm moyenne (MPa)	9,02					
Rapport RCimm/RCsec	0,85					

B) Enrobé bitumineux avec $TL_2=5,9\%$:

Module de richesse de mélange : $K=3,6$

La teneur en liant est égale à 5,9%

Les résultats des essais effectués sur cet enrobé sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau V. 8. % de vide (TL2).

Caractéristique \ Eprouvette	3	4	5	moyenne
Masse de l'éprouvette (gr)	1198	1194	1194	-
Volume de l'éprouvette (cm ³)	502,66	502,01	501,21	-
Densité apparente (t/m ³)	2,35	2,35	2,36	2,35
Densité réelle (t/m ³)	2,46	2,46	2,46	2,46
Compacité(%)	95,53	95,53	95,93	95,66
% de vide	4,47	4,47	4,07	4,34

Tableau V.9. Résultats de stabilité et fluage Marshall.

N° de l'éprouvette	1	3	6	moyenne
Lecture anneau	44	48	42,5	-
Stabilité Marshall (KN)	10,21	11,14	9,86	10,40
Stabilité après corrélation (S) (KN)	11,13	11,58	9,86	10,86
Fluage Marshall (F) (mm)	1,98	1,58	2,35	1,97
Quotient Marshall (S/F) (KN/mm)	5,62	7,33	4,19	5,51

Tableau V.10. Résultats de la tenue à l'eau.

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5
Lecture presse	52,3	62,3	65,2	48,4	62,7
Resistance à la compression à sec (RCsec) (MPa)		12,65	13,24		12,73
RCsec moyenne (MPa)	12,87				
Resistance à la compression en immersion (RCimm) (MPa)	10,62			9,83	
RCimm moyenne (MPa)	10,23				
Rapport RCimm/Rcsec	0,79				

C) Enrobe bitumineux avec TL3=6,14% :

Le module de richesse de mélange K=3,75

La teneur en bitume est égale à 6,14%

Les résultats des essais pratiqués sur cet enrobé sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.11. % de vide (TL3).

Eprouvette Caractéristique	2	3	4	Moyenne
Masse de l'éprouvette (gr)	1202	1201	1196	-
Volume de l'éprouvette (cm ³)	505,24	510,08	507,66	-
Densité apparente (t/m ³)	2,36	2,37	2,38	2,37
Densité réelle (t/m ³)	2,45	2,45	2,45	2,45
Compacité(%)	96,33	96,93	97,14	96,73
% de vide	3,67	3,07	2,86	3,27

Tableau V.12. Résultats de stabilité et fluage Marshall.

N° de l'éprouvette	1	5	6	Moyenne
Lecture anneau	29	32	42	-
Stabilité Marshall(KN)	6,73	7,42	9,74	7,96
Stabilité après corrélation (S) (KN)	6,99	7,72	10,13	8,28
Fluage Marshall (F) (mm)	2,93	1,88	2,42	2,41
Quotient Marshall (S/F) (KN/mm)	2,39	4,11	4,19	3,44

Tableau V.13. Résultats de la tenue à l'eau.

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6
Lecture presse	53,9	64,6	58,8	71,2	60	66,9
Résistance à la compression à sec (RCsec) (MPa)		15,33		14,45		13,58
RCsec moyenne (MPa)	14,45					
Résistance à la compression en immersion RCimm (MPa)	10,94		11,95		12,18	
RCimm moyenne (MPa)	11,69					
Rapport RCimm/RCsec	0,81					

Les résultats des essais Marshall sont regroupés dans le tableau ci-dessous

Essais Marshall :

Tableau V.14. Résultat des essais Marshall

Formule granulaire	A	B	C	Spécifications
Teneur en bitume(%)	5,65	5,9	6,14	-
Densité apparente(t/m ³)	2,47	2,46	2,45	-
Densité réelle(t/m ³)	2,37	2,35	2,37	
Compacité (%)	95,95	95,53	95,91	95-97
Stabilité Marshall (KN)	10,38	10,85	8,28	>10,5
Fluage (mm)	2,28	1,97	2,41	2-4

Commentaire :

D'après les résultats des essais Marshall effectués, nous remarquons que :

- Les compacités des éprouvettes sont acceptables.
- Les stabilités Marshall ne sont pas acceptables à l'exception de la formule B.
- La formule «B» présente les meilleures performances en termes de stabilité, fluage.

Essai Duriez :

Les résultats des essais Duriez sont regroupés dans le tableau ci-dessous

Tableau V.15. Résultat des essais Duriez

Formule granulaire	A	B	C	Spécifications
Teneur en bitume(%)	5,65	5,9	6,14	-
Resistance à la compression à sec (RCsec) à 18°C (MPa)	10,5	12,87	14,45	>7
Resistance à la compression en immersion (RCimm) à 18°C (MPa)	9,02	10,23	11,69	-
Rapport RCimm/RCsec	0,85	0,97	0,81	0,75-1

Commentaires :

D'après les résultats des essais Duriez effectués, nous remarquons que la résistance à la compression à sec et le rapport résistance immersion sur résistance à sec sont acceptables pour la formule B par rapport aux spécifications SETRA-LCPC.

V.2. Conclusion

Les essais de performance mécaniques ont révélé que les meilleures performances ont été obtenues avec :

- La formule « B » c'est-à-dire la teneur en bitume de 5,9 % pour le béton bitumineux semi grenu 0/14.

Tableau V.16. Tableau récapitulatif de la formulation optimale.

Formule granulaire et teneur en liant retenues pour le béton bitumineux BBSG 0/14	
0/3 (%)	40
3/8 (%)	20
8/15(%)	40
Bitume 40/50 (%)	5,9

Cette formulation sera retenue pour l'étude de l'enrobé recyclé à différents taux.

CHAPITRE VI.

FORMULATION D'UN ENROBE BITUMINEUX RECYCLE

La formulation des enrobés recyclés consiste à ajuster les caractéristiques du liant d'apport et des granulats d'apports afin que ces dernières soient comparables à celles d'un enrobé neuf. L'étape de formulation est une phase d'étude nécessitant, à une échelle réduite, de fabriquer des enrobés dans des conditions de laboratoire normativement définies

- La formulation concerne six taux d'incorporation d'agrégats d'enrobé : 10, 20, 30, 40, 50 et 100% du poids total des granulats.
- La méthode de formulation est celle utilisée pour les enrobés bitumineux neufs (essais Marshall et essai Duriez).
- La méthodologie de formulation appliquée est celle décrite dans le chapitre III. Elle est basée principalement sur :
 1. Une correction granulométrique pour obtenir une granulométrie comparable à celle du BBSG0/14.
 2. Un ajustement des caractéristiques du liant d'apport afin de réduire la rigidité du liant d'agrégat et obtenir un liant d'enrobé recyclé de mêmes caractéristiques que le liant d'enrobé neuf.
- Un essai de traction indirecte a été ajouté dans ce chapitre pour tester l'évolution de la fragilité des éprouvettes en fonction du taux d'incorporation des agrégats d'enrobés.

Remarque : les performances attendues sont celles du BBSG 0/14 obtenues dans le chapitre précédent et rappelées dans le tableau suivant :

Tableau VI.1. Caractéristiques de l'enrobé BBSG 0/14

ESSAIS	BBSG 0/14	Spécifications
Stabilité Marshall KN	10,86	>10,5
% de vides	4,47	3 à 5
Compacité(%)	95,93	95 à 97
Resistance à la compression à sec (MPa)	12,87	>7
Resistance à la compression en immersion (Mpa)	10,23	-
Rapport Immersion/compression	0,97	>0,75
Fluage Marshall (mm)	1,97	2- 4

La formulation retenue pour cet enrobé est la suivante : Bitume 40/50 avec TL= 5, 9 % ; 40% de 0/3 ; 20% de 3/8 et 40% de 8/15.

VI.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.

La masse de granulats d'apport permet alors de définir un taux de recyclage spécifique aux granulats, défini comme le rapport entre la masse de granulats d'agrégats d'enrobé (GAE) et celui de granulats de l'enrobé recyclé.

Par exemple pour un taux de recyclage de 10%, on fixe d'abord les 10% de fraisats ensuite on répartit les 90% restants sur les trois fractions granulaires (0/3, 3/8, 8/15) tout en faisant une combinaison des fractions granulaires jusqu'à l'obtention d'une courbe de mélange qui s'insère dans le fuseau. Et on fera la même chose pour les autres taux.

VI.2. Correction des caractéristiques du liant d'agrégats d'enrobé par l'ajustement des caractéristiques du liant d'apport

VI.2.1. Quantité de liant d'apport

La quantité de liant d'apport 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.

Dans notre cas, pour un taux de recyclage de 10%, on calcule la quantité de liant se trouvant dans les 10% de fraisâts, ensuite on la soustrait de la quantité de liant identifiée comme nécessaire à la fabrication de notre enrobé neuf de même granulométrie, qui a une teneur en liant de 5,9 %. Et on avait remarqué que plus on augmente le taux de recyclage plus la quantité de liant diminue.

VI.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 règles présentées précédemment (Éq. III-1 et Éq. III-2)

Toujours pour un taux de recyclage de 10% on calcule Pen_{LA} et TBA_{LA} :

$$\log(Pen_{LER}) = C_{LAE}^{LER} \log(Pen_{LAE}) + (1 - C_{LAE}^{LER}) \log(Pen_{LA})$$

$$\left. \begin{array}{l} Pen_{LER} = 45,5 (1/10 \text{ mm}) \\ Pen_{LAE} = 19 (1/10 \text{ mm}) \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{Pen_{LA} = 50 (1/10 \text{ mm})}$$

$$TBA_{LER} = C_{LAE}^{LER} TBA_{LAE} + (1 - C_{LAE}^{LER}) TBA_{LA}$$

$$\left. \begin{array}{l} TBA_{LER} = 50^{\circ}C \\ TBA_{LAE} = 75^{\circ}C \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{TBA_{LA} = 48^{\circ}C}$$

Ce qui implique que la classe de liant d'apport qu'il fallut ajouter à l'enrobé recyclé à 10% est de 40/50.

Tableau VI.2. Classes de liant d'apport en fonction du taux d'agrégats

% d'agrégats d'enrobés (AE)	Pénétrabilité (25°C) (1/10 mm)	Point de ramollissement TBA (°C)	Classe de liant d'apport selon CTPP
0	45,5	50	40/50
10	50	48	40/50
20	56	46	40/50
30	65	42	60/70
40	80	39	80/100
50	102	34	80/100

Commentaires : ces classes de liants d'apport sont calculées afin de déterminer le grade du liant d'apport qui donnerait au liant de l'enrobé final un grade du liant de l'enrobé neuf (dans notre cas bitume 40/50).

Selon le taux d'agrégats d'Enrobé, on remarque :

- $\leq 20\%$, pas besoin de changer le grade du liant d'apport.
- A 30%, le grade passe à 60/70.
- A 40% et 50% le grade passe à 80/100.

Les résultats de ce tableaux sont confortés par ceux de la bibliographie [31] qui stipulent que :

- les propriétés des enrobés recyclés contenant jusqu'à 20% d'AE, sont peu influencées par la composition des agrégats d'enrobé (liant et granulats).
- Au-delà de ce taux, la composition des agrégats d'enrobé doit être prise en compte du fait de son influence sur les propriétés de l'enrobé. La composition des agrégats d'enrobé est alors étudiée afin de déterminer les caractéristiques du squelette granulaire et du liant bitumineux qui le lie.

VI.3. Différentes Formulations D'enrobés Recyclés

➤ *Formulation d'un enrobé recyclé à 10% de fraisât :*

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

Tableau VI.3. Composition du mélange granulométrique avec 10% de fraisât

Fraction	Pourcentage(%)
fraisât	10
Sable 0/3	36
Gravillon 3/8	18
Gravier 8/15	36

Le courbe granulométrique de mélange issue de cette formule s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique au béton bitumineux semi grenu 0/14 selon les recommandations algériennes pour l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux de Février 2004

La courbe granulométrique du mélange est illustrée sur la figure suivante :

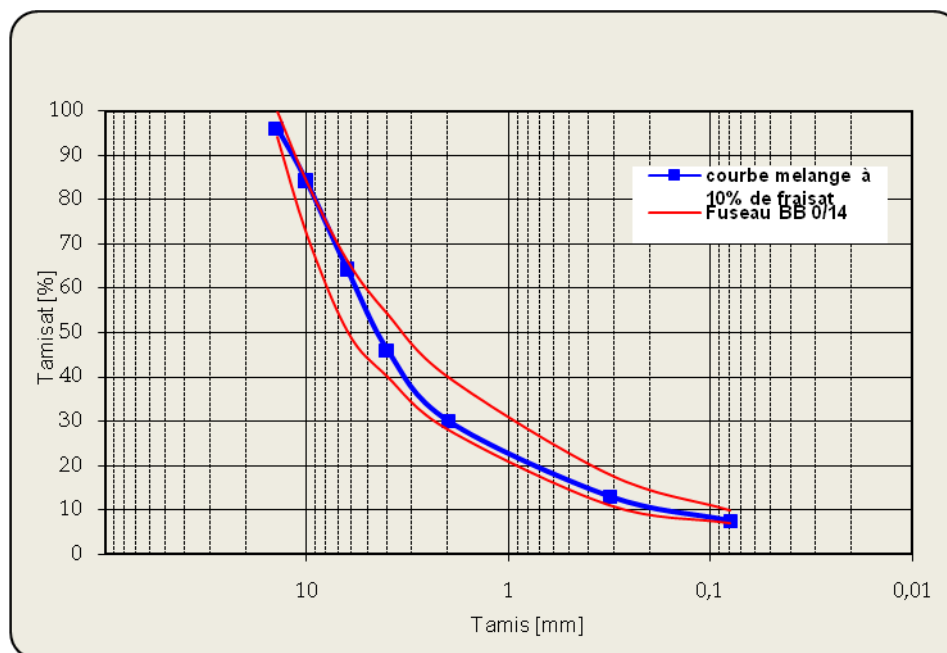


Figure VI.1. Courbe granulométrique du mélange granulaire avec 10% de fraisât

a) Résultat d'essai Marshall

Les résultats de formulation de l'essai Marshall (NF P 98-251-2) sur enrobé à 10% de fraisâts sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI.4. Résultat d'essai Marshall avec 10% de fraisât

Formulation avec fraisât	Formulation avec 10% de fraisât
Stabilité Marshall(KN)	11,09
Fluage (mm)	2,05
Masse volumique apparente(t/m^3)	2,38
Masse volumique réelle(t/m^3)	2,46
Compacité(%)	96,75

b) Résultat d'essai Duriez

Les résultats d'essai Duriez sur enrobé à 10% de fraisâts sont donnés dans le tableau suivant ;

Tableau VI.5. Résultat d'essai Duriez avec 10% de fraisât

Formulation avec fraisât	Formulation avec 10% de fraisât
Resistance à la compression (RCsec) (KN)	13,74
Resistance à la compression (RCimm) (KN)	13,06
Rapport RCimm/RCsec	0,95

c) Résultat d'essai de traction indirecte

Les résultats d'essai de traction indirecte sur enrobé à 10% de fraisats sont illustrés dans le tableau suivant ;

Tableau VI.6. Résultat d'essai de traction indirecte

Formulation avec fraisât	Formulation avec 10% de fraisât
Resistance à la traction indirecte à 15°C (MPa)	2,4
Resistance à la traction indirecte à 20°C (MPa)	1,93

➤ Formulation d'un enrobé recyclé à 20% de fraisât

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

Tableau VI.7. Composition du mélange granulométrique avec 20% de fraisât

Fraction	Pourcentage(%)
Fraisât	20
Sable 0/3	30
Gravillon 3/8	15
Gravier 8/15	35

La courbe granulométrique de mélange issue de cette formule s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique au béton bitumineux semi grenu 0/14 selon les recommandations algériennes pour l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux de Février 2004

La courbe granulométrique du mélange est donnée dans la figure suivante :

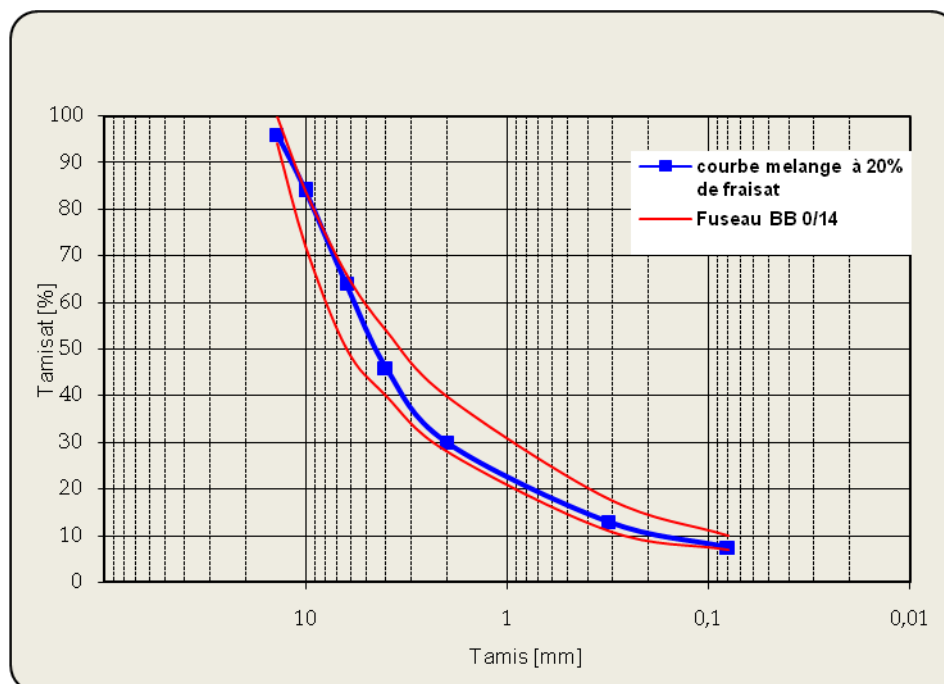


Figure VI.3. Courbe granulométrique du mélange granulaire avec 20% de fraisât

a) Résultat d'essai Marshall

Les résultats de formulation de l'essai Marshall (NF P 98-251-2) sur enrobé à 20% de fraisats sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI.8. Résultat d'essai Marshall avec 20% de fraisât

Formulation avec fraisât	Formulation avec 20% de fraisât
Stabilité Marshall(KN)	11,36
Fluage (mm)	2,33
Masse volumique apparente(t/m^3)	2,39
Masse volumique réelle(t/m^3)	2,46
Compacité(%)	97,15

b) Résultat d'essai Duriez

Les résultats d'essai Duriez sur enrobé à 20% de fraisâts sont donnés dans le tableau suivant ;

Tableau VI.9. Résultat d'essai Duriez avec 20% de fraisât

Formulation avec fraisât	Formulation avec 20% de fraisât
Resistance à la compression (RCsec) (KN)	14,13
Resistance à la compression (RCimm) (KN)	13,15
Rapport RCimm/RCsec	0,93

c) résultat d'essai de traction indirecte

Les résultats d'essai de traction indirecte sur enrobé à 20% de fraisâts sont illustrés dans le tableau suivant ;

Tableau VI.10. Résultat d'essai de traction indirecte

Formulation avec fraisât	Formulation avec 20% de fraisât
Resistance à la traction indirecte à 15°C (MPa)	2,62
Resistance à la traction indirecte à 20°C (MPa)	1,95

➤ Formulation d'un enrobé recyclé à 30% de fraisât

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

Tableau VI.11. Composition du mélange granulométrique avec 30% de fraisât

Fraction	Pourcentage(%)
Fraisât	30
Sable 0/3	23
Gravillon 3/8	15
Gravier 8/15	32

Le courbe granulométrique de mélange issue de cette formule s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique au béton bitumineux semi grenu 0/14 selon les recommandations algériennes pour l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux de Février 2004

La courbe granulométrique du mélange est donnée dans la figure suivante :

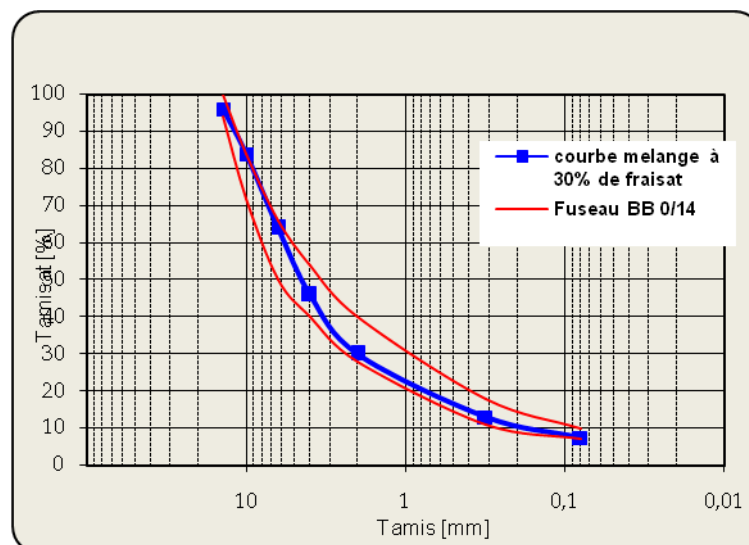


Figure VI.4. Courbe granulométrique du mélange granulaire avec 30% de fraisât

a) Résultat d'essai Marshall

Les résultats de formulation de l'essai Marshall (NF P 98-251-2) sur enrobé à 30% de fraisâts sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI.12. Résultat d'essai Marshall avec 30% de fraisât

Formulation avec fraisât	Formulation avec 30% de fraisât
Stabilité Marshall(KN)	11,6
Fluage (mm)	2,68
Masse volumique apparente(t/m^3)	2,4
Masse volumique réelle(t/m^3)	2,46
Compacité(%)	97,56

b) Résultat d'essai Duriez

Les résultats d'essai Duriez sur enrobé à 30% de fraisâts sont donnés dans le tableau suivant ;

Tableau VI.13. Résultat d'essai Duriez avec 30% de fraisât

Formulation avec fraisât	Formulation avec 30% de fraisât
Resistance à la compression (RC sec) (KN)	14,64
Resistance à la compression (RC imm) (KN)	13,29
Rapport RCimm/RCsec	0,91

c) Résultat de la traction indirecte

Les résultats d'essai de traction indirecte sur enrobé à 30% de fraisâts sont illustrés dans le tableau suivant ;

Tableau VI.14. Résultat d'essai de traction indirecte

Formulation avec fraisât	Formulation avec 30% de fraisât
Resistance à la traction indirecte à 15°C (MPa)	2,68
Resistance à la traction indirecte à 20°C (MPa)	1,97

➤ Formulation d'un enrobé recyclé à 40% de fraisât

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

Tableau VI.15. Composition du mélange granulométrique avec 40% de fraisât

Fraction	Pourcentage(%)
fraisât	40
Sable 0/3	18
Gravillon 3/8	14
Gravier 8/15	28

Le courbe granulométrique de mélange issue de cette formule s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique au béton bitumineux semi grenu 0/14 selon les recommandations algériennes pour l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux de Février 2004

La courbe granulométrique du mélange est donnée dans la figure suivante :

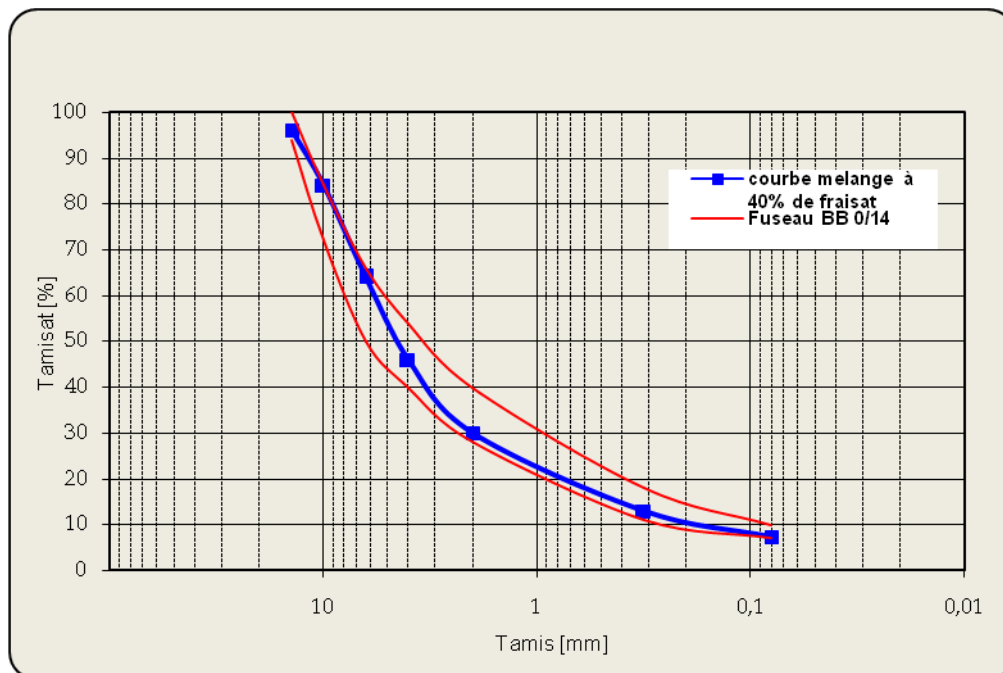


Figure VI.5. Courbe granulométrique du mélange granulaire avec 40% de fraisât

a) Résultat d'essai Marshall

Les résultats de formulation de l'essai Marshall (NF P 98-251-2) sur enrobé à 40% de fraisâts sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI.16. Résultat d'essai Marshall avec 40% de fraisât

Formulation avec fraisât	Formulation avec 40% de fraisât
Stabilité Marshall(KN)	11,76
Fluage (mm)	3,08
Masse volumique apparente(t/m^3)	2,41
Masse volumique réelle(t/m^3)	2,46
Compacité(%)	97,97

b) Résultat d'essai Duriez

Les résultats d'essai Duriez sur enrobé à 40% de fraisâts sont donnés dans le tableau suivant ;

Tableau VI.17. Résultat d'essai Duriez avec 40% de fraisât

Formulation avec fraisât	Formulation avec 40% de fraisât
Resistance à la compression (RCsec) (KN)	14,98
Resistance à la compression (RCimm) (KN)	13,41
Rapport RCimm/RCsec	0,89

c) Résultat de traction indirecte

Les résultats d'essai de traction indirecte sur enrobé à 40% de fraisâts sont illustrés dans le tableau suivant ;

Tableau VI.18. Résultat d'essai de traction indirecte

Formulation avec fraisât	Formulation avec 40% de fraisât
Resistance à la traction indirecte à 15°C (MPa)	2,71
Resistance à la traction indirecte à 20°C (MPa)	1,99

➤ *Formulation d'un enrobé recyclé à 50% de fraisât*

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

Tableau VI.19. Composition du mélange granulométrique avec 50% de fraisât

Fraction	Pourcentage(%)
fraisât	50
Sable 0/3	10
Gravillon 3/8	20
Gravier 8/15	20

Le courbe granulométrique de mélange issue de cette formule s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique au béton bitumineux semi grenu 0/14 selon les recommandations algériennes pour l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux de Février 2004

La courbe granulométrique du mélange est donnée dans la figure suivante :

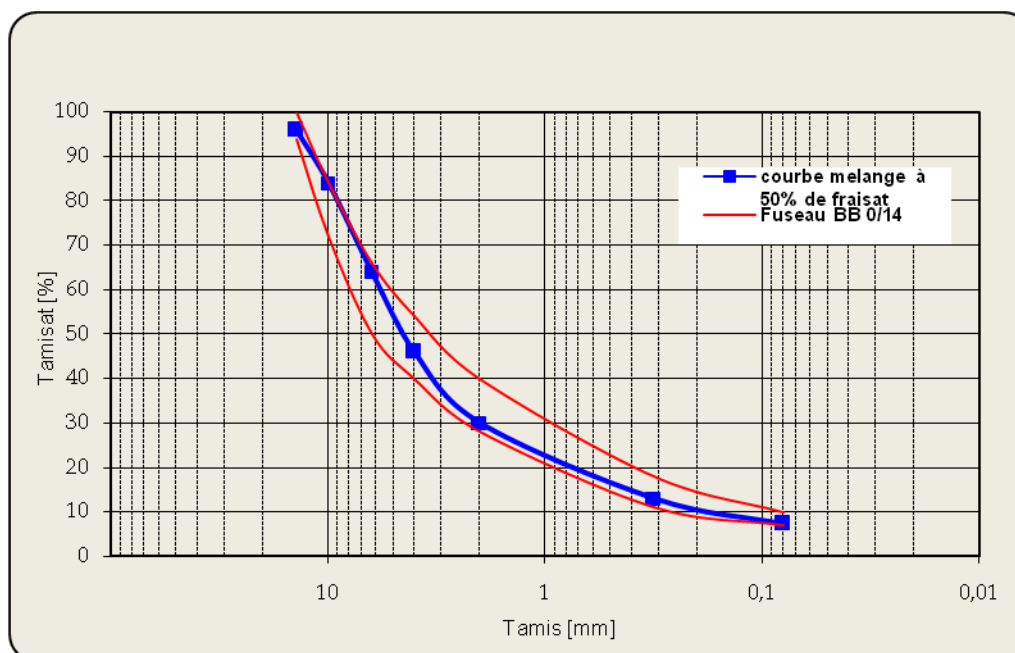


Figure VI.6. Courbe granulométrique du mélange granulaire avec 50% de fraisât

a) Résultat d'essai Marshall

Les résultats de formulation de l'essai Marshall (NF P 98-251-2) sur enrobé à 50% de fraisâts sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI.20. Résultat d'essai Marshall avec 50% de fraisât

Formulation avec fraisât	Formulation avec 50% de fraisât
Stabilité Marshall(KN)	12,13
Fluage (mm)	4,83
Masse volumique apparente(t/m^3)	2,43
Masse volumique réelle(t/m^3)	2,46
Compacité(%)	98,78

b) Résultat d'essai Duriez

Les résultats d'essai Duriez sur enrobé à 50% de fraisâts sont donnés dans le tableau suivant ;

Tableau VI.21. Résultat d'essai Duriez avec 50% de fraisât

Formulation avec fraisât	Formulation avec 50% de fraisât
Resistance à la compression (RCsec) (KN)	15,01
Resistance à la compression (RCimm) (KN)	13,45
Rapport RCimm/RCsec	0,89

c) Résultat de traction indirecte

Les résultats d'essai de traction indirecte sur enrobé à 50% de fraisâts sont illustrés dans le tableau suivant ;

Tableau VI.22. Résultat d'essai de traction indirecte

Formulation avec fraisât	Formulation avec 50% de fraisât
Resistance à la traction indirecte à 15°C (MPa)	2,74
Resistance à la traction indirecte à 20°C (MPa)	1,02

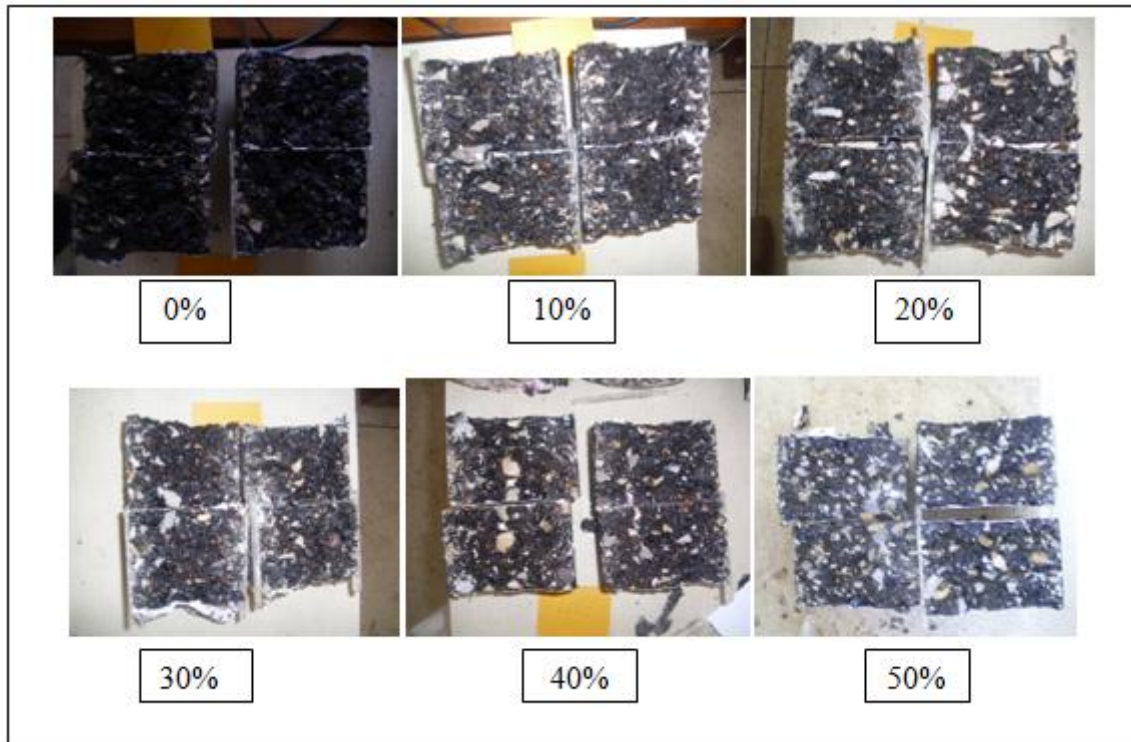


Figure VI.7. Eprouvettes après essai de traction indirecte à 20°C

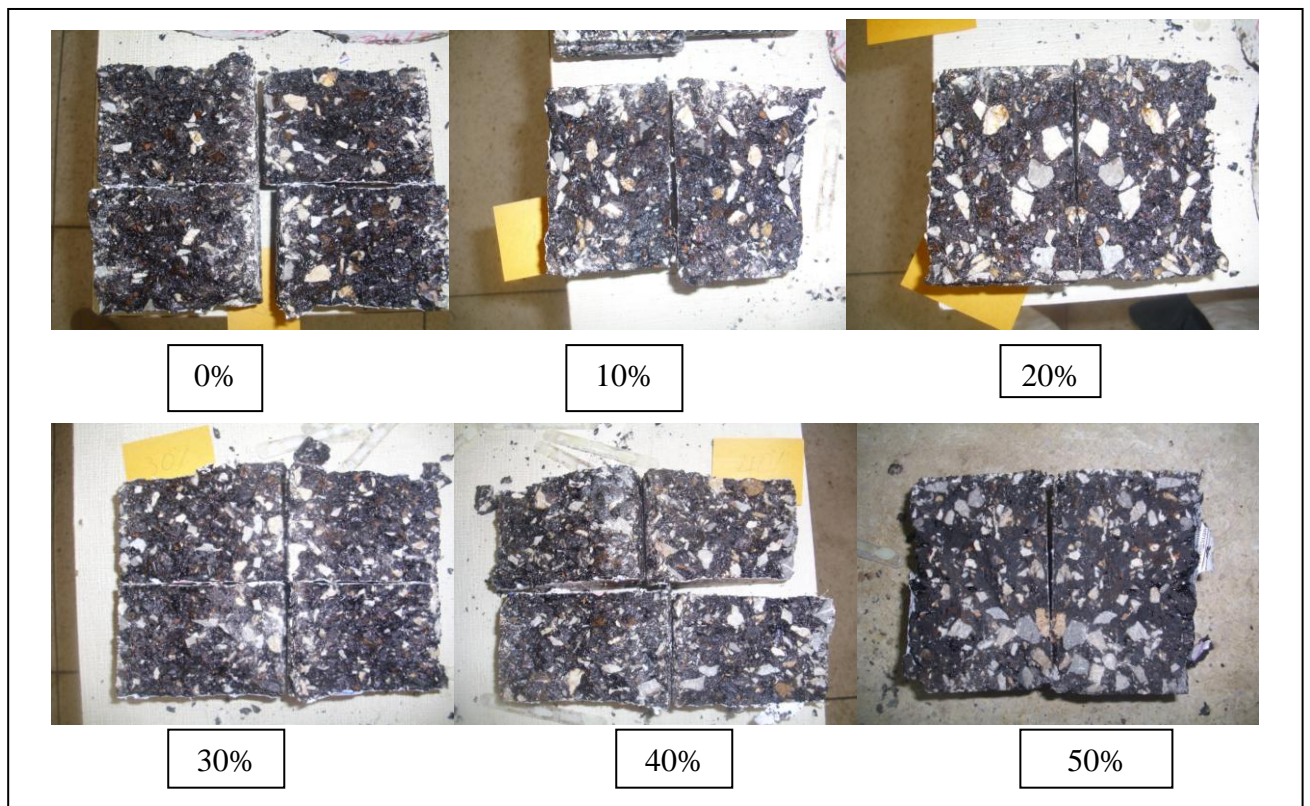


Figure VI.8. Eprouvettes après essai de traction indirecte à 15°C

Interprétation

On avait remarqué deux modes de rupture :

1. Rupture en traction nette c-à-dire rupture de liant et granulat en même temps
2. Rupture mixte c-à-dire parfois on observe une rupture de liant sans les granulats
3. L'enrobé recyclé devient moins ductile et fragile à basse température.

VI.5.Conclusion

Ce chapitre regroupe sept formulations de béton bitumineux BBSG 0/14, avec différents taux d'agrégats d'enrobé : 0, 10, 20, 30, 40, 50 et 100% ; tous ces bétons bitumineux répondent aux spécifications attendues d'un tel enrobé. Il reste à analyser l'influence de ces différents taux sur les performances étudiées (Marshall, Duriez et traction indirecte) et apporter des conclusions, remarques et perspectives qu'offre le domaine du recyclage des agrégats d'enrobés.

CHAPITRE VII

ANALYSE DES RESULTATS

VII.1. Introduction

Dans le cadre du recyclage à chaud des agrégats d'enrobés, un certain pourcentage d'agrégats d'enrobés est incorporé en tant que matière première avec des granulats et du liant neuf pour produire de nouveaux enrobés. Ce pourcentage peut varier de 0 à presque 100% selon le type de centrale et le type de mélange à produire.

Sur le plan technique, les précautions d'emploi concernent principalement les études liées à la correction granulaire et du liant d'apport. Toutefois des études sans modification du liant d'apport ont montré que les performances de l'enrobé recyclé demeurent acceptables.

Dans cette étude effectuée sans modification du liant d'apport, l'analyse portera sur :

1. l'influence des différents taux des AE sur les résultats de l'essai Marshall:
 - La stabilité
 - Le fluage
 - Le quotient
 - Compacité
2. l'influence des différents taux des AE sur les résultats de l'essai Duriez
 - Résistance à sec
 - Résistance en immersion
 - Tenue à l'eau
3. l'influence des différents taux des AE sur la résistance à la traction indirecte : pour cet essai les éprouvettes deux températures ont été préconisées : 15°C et 20°C

Remarques : à titre indicatif, un calcul théorique a été établi à partir des les équations de mélanges des bitumes [7] pour déterminer le grade de liant de l'enrobé recyclé. On a obtenu pour l'enrobé recyclé à:

- 0% ; 10% et 20% un bitume 40/50
- 30 % un bitume : 40/50
- 40% et 50% un bitume : 20/30

VII.2. Résultats Et Interprétations Des Essais Marshall

L'essai Marshall sert à déterminer la stabilité S [KN] ; la masse volumique apparente de l'enrobé [t/m^3] ; la teneur en vides de l'enrobé [%] ; la valeur de fluage F [mm] et le quotient Marshall.

VII.2.1. Influence du taux des AE sur la stabilité Marshall

La stabilité est la résistance maximale à l'écrasement de l'éprouvette Marshall.

Tableau VII.1. Résultats de stabilité Marshall en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

% de fraisât	0	10	20	30	40	50
Stabilité Marshall (KN)	10,86	11,09	11,36	11,60	11,76	12,13

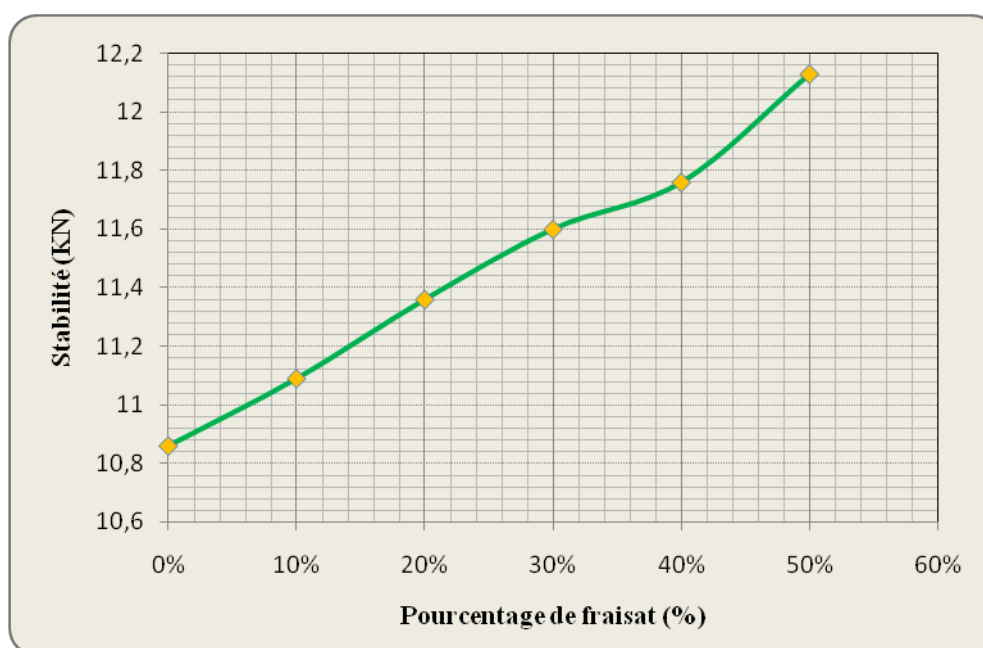


Figure VII.1. Stabilité Marshall en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât

➤ Interprétation

La figure VII.1 montre la variation de la stabilité Marshall en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât, cette stabilité suit une progression uniforme. Plus on ajoute le pourcentage des

fraisâts plus la stabilité augmente de 2%. Cette augmentation, décrite dans la littérature, est d'autant plus importante que le bitume d'apport n'a pas été modifié, et ça revient au vieillissement de bitume qui est dans les fraisâts.

VII.2.2. Influence du taux des AE sur la masse volumique apparente de l'enrobé

Les résultats sont illustrés dans le tableau suivant:

Tableau VII.2. Résultats de la masse volumique apparente en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

% de fraisât	0	10	20	30	40	50
Masse volumique apparente (t/m^3)	2,35	2,38	2,39	2,4	2,41	2,43

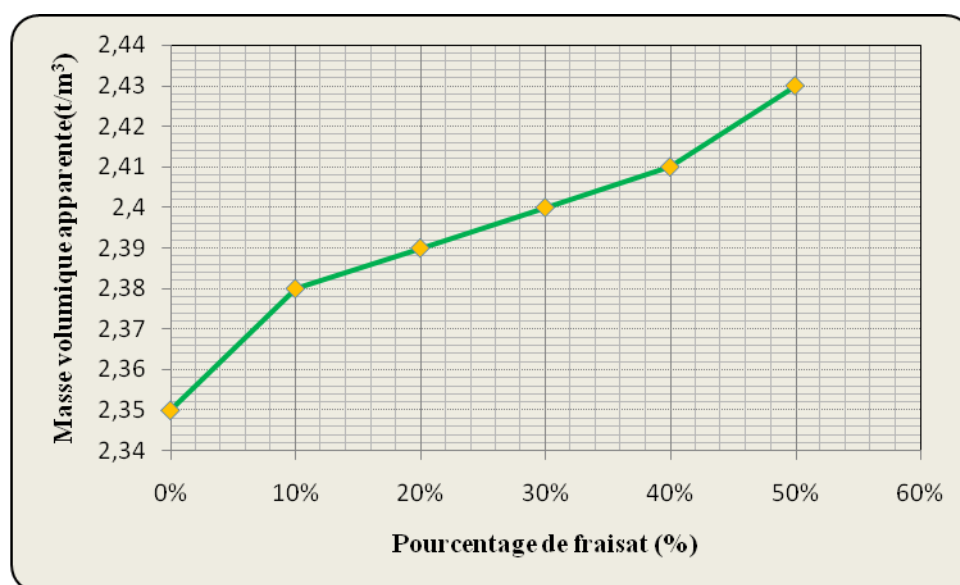


Figure VII.2. Masse volumique apparente en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât

Selon le graphe de la figure IV.2, la valeur de la masse volumique apparente de l'enrobé neuf est de $2,35 t/m^3$, après l'ajout des différents pourcentages de fraisât nous avons remarqué une légère augmentation voir même linéaire de la masse volumique apparente qui atteint la valeur de $2,43 t/m^3$ à 50% d'ajout de fraisât. Cette légère augmentation est dû au bitume vieilli c'est à dire transformation des maltènes aux asphaltènes (éléments solides dans le bitume) ce qui a engendrer une augmentation de la densité de bitume ainsi l'augmentation de la densité apparente de l'enrobé.

VII.2. 3. Influence du taux des AE sur le fluage Marshall

Le fluage est le raccourcissement du diamètre de l'éprouvette au moment de sa rupture.

Tableau VII.3. Variation du fluage Marshall en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

% de fraisât	0	10	20	30	40	50
Fluage Marshall (mm)	1,97	2,05	2,33	2,68	3,08	4,83

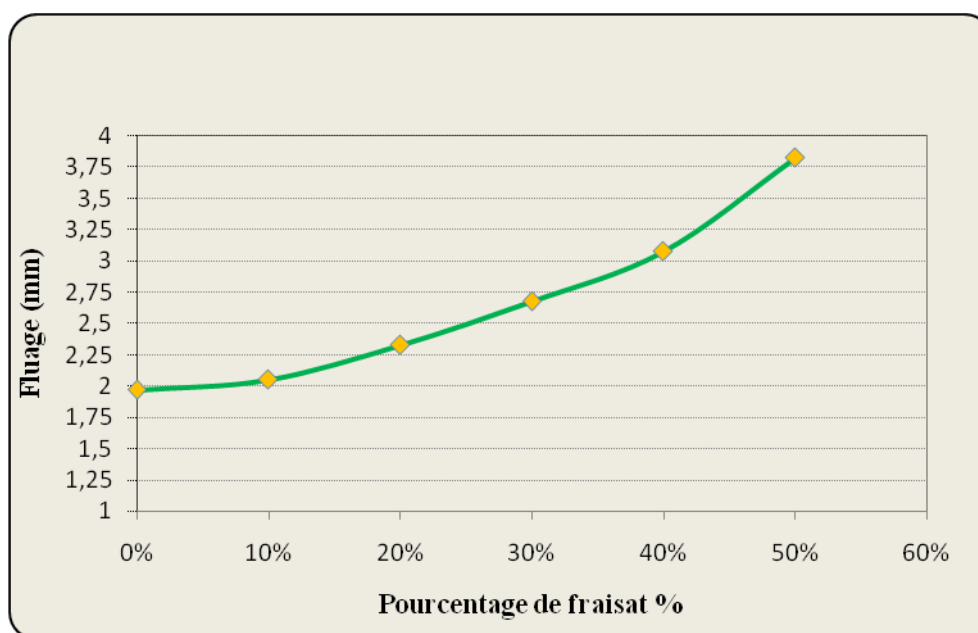


Figure VII.3.fluage Marshall en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât

➤ *Interprétation*

La valeur de fluage Marshall passe de 1,97 mm de l'enrobé neuf à 2,68 à 30% et 4,83 mm à 50% d'ajout c'est-à-dire une augmentation moyenne du pas de 0,3mm.

Selon la courbe de la figure VII.3, la progression est continue. Cela signifie que la résistance au fluage diminue avec l'augmentation de pourcentage de fraisât qui est probablement dû au vieillissement des granulats de ce dernier.

VII.2.4. Influence du taux des AE sur le quotient Marshall

Le quotient Marshall est un indicateur de la résistance aux déformations permanentes, contraintes de cisaillement et aussi pour l'orniérage des enrobés bitumineux. Les plus

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

Figure VII.4. Résultat du quotient Marshall en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

% de fraisât	0	10	20	30	40	50
Quotient Marshall (KN/mm)	5,51	5,41	4,88	4,33	3,82	2,91

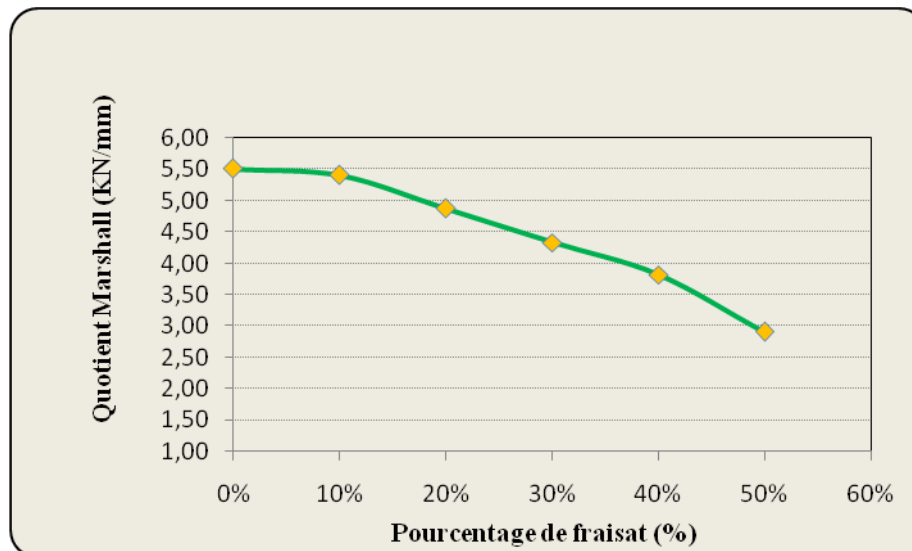


Figure VII.4. Quotient Marshall en fonction du pourcentage d'ajout de fraisât

➤ *Interprétation*

Le quotient Marshall est un indicateur de la résistance aux déformations permanentes, contraintes de cisaillement ainsi l'orniérage des enrobés bitumineux.

La courbe du Quotient Marshall diminue au fur et à mesure que le taux d'AE augmente donc il résiste mal aux déformations permanentes et aux contraintes de cisaillement car la contrainte de cisaillement a une relation directe avec la cohésion.

VII.2.5. Influence du taux des AE sur la compacité Marshall

La compacité d'un revêtement bitumineux en conditionne la durabilité. Elle doit être suffisamment élevée pour assurer une bonne résistance à l'orniérage, mais un certain pourcentage de vide est nécessaire : pendant la mise en service le compactage continue à se faire sous le passage des poids lourds, d'où la nécessité de garder un % de vides dans l'enrobé compacté.

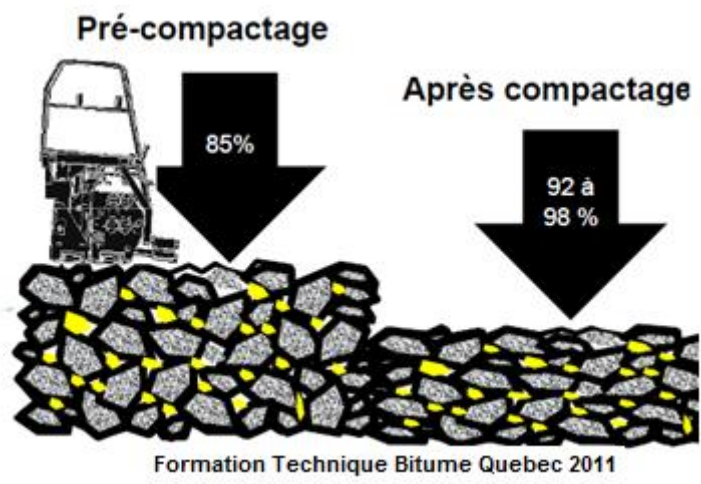


Figure VII.5. Compactage d'un enrobé bitumineux

Le tableau suivant donne les compacités Marshall atteintes pour les divers taux de fraisât.

Tableau VII.5.Variation de la compacité en fonction de pourcentage de fraisât

% de fraisât	0	10	20	30	40	50
Compacité (%)	95,53	96,75	97,15	97,56	97,97	98,78

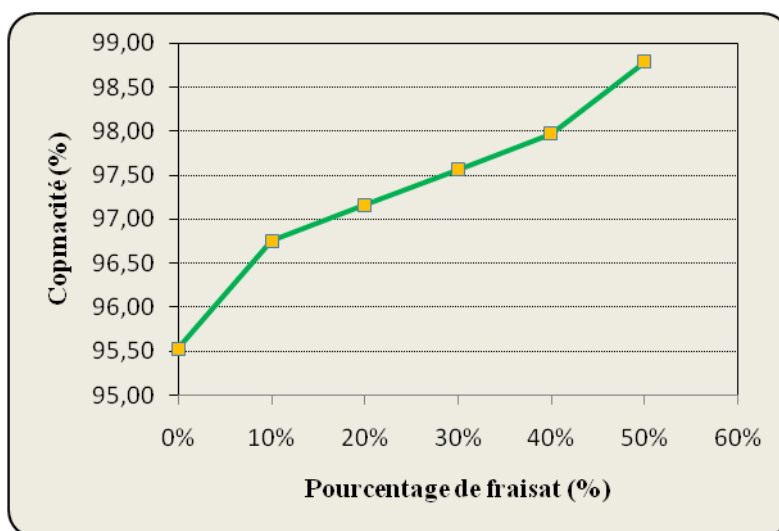


Figure VII.6.Compacité Marshall en fonction de pourcentage de fraisât

➤ *Interprétation*

Selon la courbe de la figure VII.5, la compacité augmente progressivement de 1% presque pour chaque pourcentage de fraisât. Cela est du au bitume vieilli qui a fait évoluer sa densité

apparente relation proportionnelle entre la compacité et la densité apparente ($C\% = MVA/MVR$), donc l'enrobé devient très fragile et va subir un ressuage.

VII.3. Résultats Et Interprétations Des Essais Duriez

VII.3.1. Influence du taux des AE sur la résistance à la compression à sec (18°C)

La résistance à sec est une approche des caractéristiques mécaniques d'un enrobé.

Tableau VII. 6. Variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

% de fraisât	0	10	20	30	40	50
Resistance à la compression à sec (18°C) (MPa)	12,87	13,74	14,13	14,64	14,98	15,01

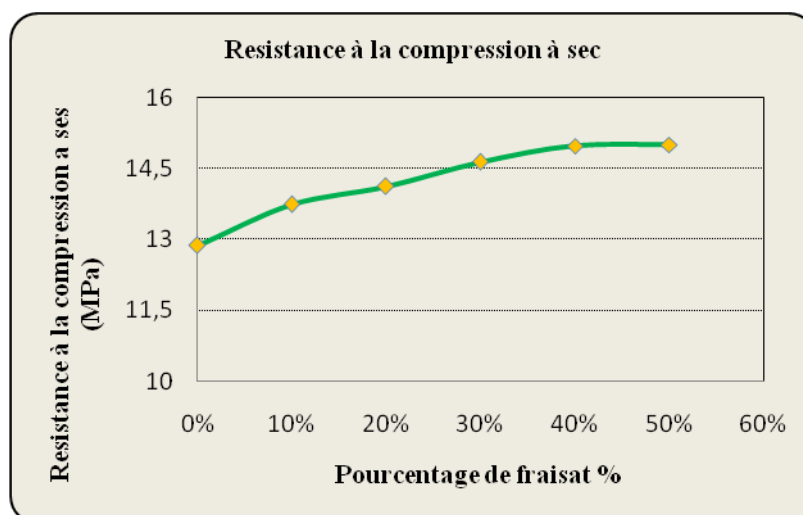


Figure VII.7. Variation de la résistance à la compression à sec à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

➤ Interprétations

La figure (VII.7) montre la variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât, à l'état naturel la valeur est de 12,87 MPa pour l'enrobé neuf, après ajout de différents pourcentages de fraisât nous remarquons une augmentation progressive de la résistance à la compression qui atteint la valeur de 15,01 MPa à 50% et cela revient toujours à l'augmentation de la rigidité de l'enrobé suite au vieillissement de bitume.

VII.3.2. Résultats et interprétations de la résistance à la compression en immersion

Tableau VII.7. Variation de la résistance à la compression en immersion, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

% de fraisât	0	10	20	30	40	50
Resistance à la compression en immersion (18°C) (MPa)	10,23	13,06	13,15	13,29	13,41	13,45

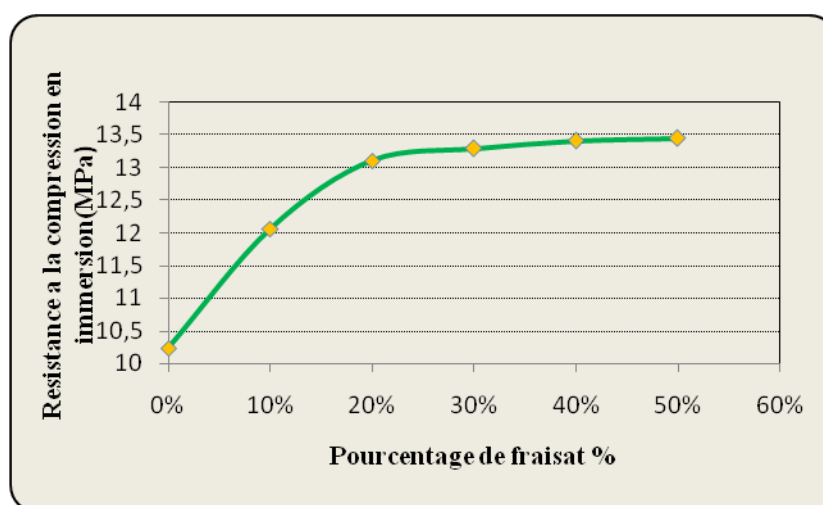


Figure VII.8. Variation de la résistance à la compression en immersion à 18°C, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

➤ *Interprétations*

La figure (VII.8) montre la variation de la résistance à la compression à l'air à 18°C en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât, à l'état naturel la valeur est de 12,87 MPa pour l'enrobé neuf, après ajout de différents pourcentages de fraisât nous remarquons une augmentation progressive de la résistance à la compression qui atteint la valeur de 15,01 MPa à 50% et cela revient toujours à l'augmentation de la rigidité de l'enrobé suite au vieillissement de bitume.

VII.3.3. Influence du taux des AE sur la tenue à l'eau

Bien qu'il soit admis qu'un certain nombre de facteurs contribuent à la résistance du mélange bitumineux, l'interaction liant-agrégat a été identifiée comme l'un des principaux facteurs de durabilité. En effet, une adhésion insuffisante au sein du mélange a pour effet une détérioration rapide du revêtement sous l'influence de la charge du trafic. L'eau constitue ici

un facteur crucial, qui peut compromettre l'interaction entre le liant et l'agrégat, et ainsi amorcer la dégradation du mélange bitumineux.

Les résultats de l'essai sont reportés dans le tableau suivant.

Tableau VII.8. Variation de la tenue à l'eau en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

% de fraisât	0	10	20	30	40	50
Tenue à l'eau (%)	0,97	0,95	0,93	0,91	0,89	0,89

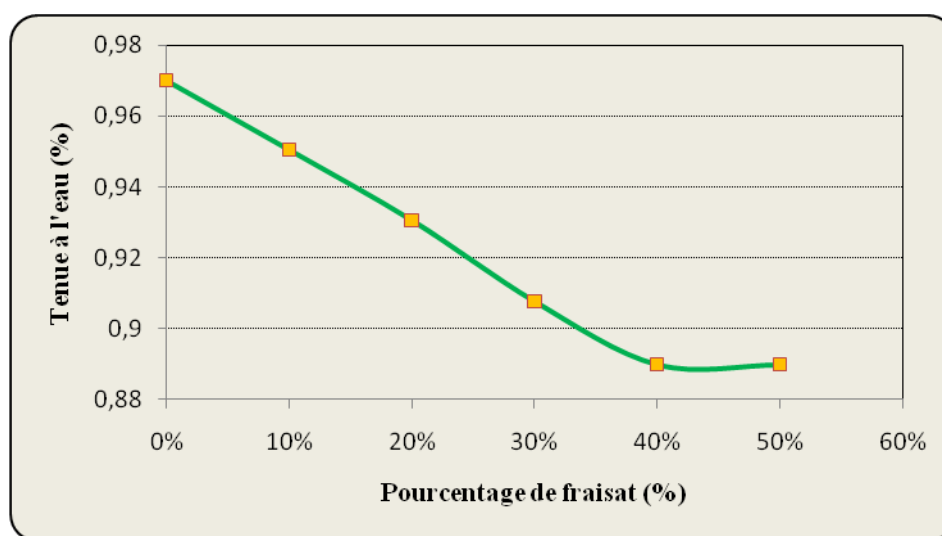


Figure VII.9. Variation de la tenue à l'eau en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât

La figure (VII.9) montre la variation de la résistance à la compression en immersion, en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât, à l'état naturel (sans ajout de fraisât) la valeur est de 10,23 MPa pour la première formulation, après l'ajout des différents pourcentages de fraisât nous avons remarqué l'augmentation progressive de 27% à 10% puis elle s'est presque stabilisée à partir de 20% jusqu'à atteindre la valeur de 13,45 MPa à 50% d'ajout de fraisât. Nous remarquons que la résistance à la compression en immersion augmente avec l'ajout de fraisât qui est probablement dû au bitume vieilli contenu dans le fraisât.

VII.4. Influence du taux des AE sur la traction indirecte

Tableau VII.9. Résultats des essais de traction indirecte pour différent pourcentage de fraisât et à différent température

% de fraisât	0	10	20	30	40	50
Resistance à la traction indirecte à 15°C (MPa)	1,99	2,4	2,62	2,68	2,71	2,74
Résistance à la traction indirecte à 20°C (MPa)	1,59	1,93	1,95	1,97	1,99	1,02

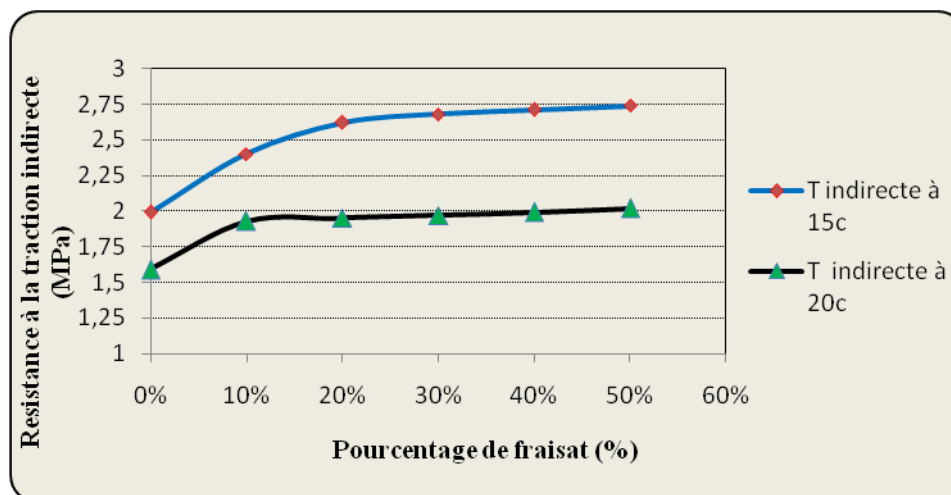


Figure VII.10. Variation de la traction indirecte en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât.

➤ **Interprétation**

La figure (VII.10) montre la variation de la tenue à l'eau en fonction de pourcentage d'ajout de fraisât, la courbe de la tenue a l'eau suit une régression de 2% pour chaque taux, cela signifie que plus on rajoute les AE plus l'enrobé devient sensible à l'eau et cela il est dû peut être à l'augmentation de la compacité ce qui va engendrer le problème de désenrobage par la suite des dégradations de la chaussée (arrachements, pelade,.....)

VII.5. Résumé Des Résultats Des Essais Marshall et Duriez**Résultats Marshall**

Les résultats des essais MARSHALL sont regroupés dans le tableau VII.6.

Tableau VII.10. Résultats des essais Marshall pour différent pourcentage de fraisât

% de fraisât	0	10	20	30	40	50	Spécifications
Teneur en bitume (%)	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	
Densité apparent (t/m ³)	2,35	2,38	2,39	2,4	2,41	2,43	
Compacité (%)	95,93	96,75	97,15	97,56	97,97	98,78	95 à 97
Stabilité (KN)	10,86	11,09	11,36	11,60	11,76	11,13	>10,5
Fluage (mm)	1,97	2,05	2,33	2,68	3,08	1,83	2-4
Quotient Marshall (KN/mm)	5,51	5,41	4,88	4,33	3,82	6,08	

Résultats Duriez

Les résultats des essais DURIEZ sont regroupés dans le tableau VII.10

Tableau VII.11. Résultats des essais Duriez pour différent pourcentage de fraisât

% de fraisât	0	10	20	30	40	50
Teneur en bitume (%)	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
Rc sec (MPa)	12,87	13,74	14,13	14,64	14,98	14,01
Rc im. (MPa)	10,23	13,06	13,15	13,29	13,41	13,45
Rcim/Rcsec (%)	0,97	0,95	0,93	0,91	0,89	0,89

Résultats Des Essais Marshall et Traction indirecte Sur Les 100% Fraisât

Les résultats sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

Figure VII.12. Résultat des différents essais sur fraisât

%Fraisât	100
Stabilité Marshall (KN)	19,95
Fluage Marshall (mm)	4,55
Quotient Marshall	4,38
Densité (t/m ³)	2,38
Compacité (%)	96,75
Résistance à la traction indirecte à 20°C (MPa)	2,44
Résistance à la traction indirecte à 15°C (MPa)	3,27

VII.6. Conclusion

La mesure des caractéristiques mécaniques des enrobés recyclés à été réalisée en utilisant le même bitume utilisé pour la confection d'un BBSG0/14 neuf qui est l'enrobé de référence; toute fois un effort important a été porté à la préparation des constituants et à la fabrication des éprouvettes dans le but d'étudier des enrobés de composition en granulats et en teneur en liant identiques à ceux de l'enrobé de référence. Ceci a permis la comparaison des performances Marshall, Duriez et de traction indirecte. L'ajout d'Agrégats d'Enrobés, appelés communément fraisat, dans la limite de notre étude, a amélioré d'une manière générale les performances de l'enrobé recyclé.

Ainsi :

- La stabilité augmente avec l'augmentation du taux de fraisat.
- La valeur de la masse volumique apparente de l'enrobé neuf a été améliorée.
- La résistance au fluage diminue avec l'augmentation de % de fraisât et à 50% il dépasse la valeur imposée par les recommandations CTTTP.
- La courbe du Quotient Marshall diminue au fur et à mesure que le taux d'AE augmente ce qui signifie que l'ajout de fraisat affecte la résistance aux déformations de l'enrobé final.

- L'ajout d'AE améliore les compacités de l'enrobé bitumineux recyclé. Au taux supérieurs à 20%, la compacité dépasse le seuil maximal imposé par les recommandations du CTPP.
- L'ajout de fraisat améliore la résistance à la compression à sec et en immersion.
- La tenue à l'eau du mélange final diminue avec l'ajout de fraisat. Cette baisse semble s'atténuer à partir de 50% d'ajout. Mais l'ensemble des résultats donne une tenue au désenravage satisfaisante ($> 0,75$).
- On constate une augmentation de la résistance à la traction avec tendance à la stabilisation pour les taux dépassant les 20%.

Pour tous les taux étudiés - 10 ; 20 ; 30 ; 40 et 50% - seule la compacité et le fluage qui ont posé problème pour les taux supérieurs à 20% pour les compacités et à 50% pour le fluage; une étude de rectification du squelette granulaire peut apporter une solution au problème.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La prise en compte des critères de développement durable s'est concrétisée dans le domaine de la construction routière par un engagement volontaire entre les acteurs, constructeurs et gestionnaires, des infrastructures de transport et les représentants des institutions dans de nombreux pays. Parmi les axes de développement qu'il regroupe, cet engagement incite à la mise en œuvre d'actions visant à réduire l'utilisation de matières premières non renouvelables par le recyclage des fraisats.

Dans un souci de nous imprégner de cette nouvelle technique et d'apporter une contribution aussi modeste soit-elle, un travail de recherche a été mené dans le cadre de ce mémoire.

Ce mémoire s'est attachée à comprendre les principes régissant le recyclage des enrobés, tant du point de vue formulation que production. Ainsi, le rappel bibliographique sur la formulation et les particularités du recyclage des enrobés : problème de « remobilisation » du vieux liant, de sa qualité, de nature de l'enrobé d'apport qu'il faut envisager pour obtenir un enrobé recyclé équivalent à l'enrobé de référence etc. Quelques études mettant en relief les bonnes performances des enrobés recyclés avec un liant d'apport corrigé ou pas sont rapportées dans ce mémoire.

Pour mettre en application les notions mentionnées en bibliographie, nous avons formulé un enrobé témoin, un BBSG 0/14 fabriqué avec un bitume 40/50; puis nous avons incorporé des agrégats d'enrobés à différents taux : 10 ; 20 ; 30 ; 40 et 50%. Le liant d'apport n'a pas été modifié. Les fraisats sont tous issus d'un même site ; leur granulométrie avant et après désenrobage indique que ces derniers peuvent être utilisés sans conditionnement préalable. Les caractéristiques mécaniques des enrobés recyclés ont été mesurées afin de quantifier l'influence sur celles-ci du taux de recyclage de l'enrobé,

Les performances testées sont celles recommandées par les directives du CTTTP, à savoir les performances Marshall et Duriez, complétés par la traction indirecte.

La conclusion pour cette partie expérimentale est que l'ajout d'Agrégats d'Enrobés, appelés communément fraisat, dans la limite de notre étude, a amélioré d'une manière générale les performances de l'enrobé recyclé. Cependant, les essais utilisés font partie de la catégorie

"des essais empiriques" dans lesquels le mode de sollicitation est très différent de celui existant in situ, et qui ne permettent pas de caractériser le comportement à long terme. Il est raisonnablement admis, par les professionnels de la route que les propriétés recherchées afin de caractériser les performances des chaussées à long terme sont : le module, la résistance à la fatigue mécanique ; la résistance aux déformations permanentes, la résistance aux sollicitations thermiques, la résistance aux fissurations de retrait hydraulique etc.

Notre étude, pour être concluante devrait être complétée par les essais cités plus haut, cependant, il est à noter que les essais relatifs au comportement à long terme ne sont pas encore d'actualité dans les laboratoires algériens.

Par ailleurs, d'autres pistes sont à explorer telles que : la question du « degré de remobilisation du vieux bitume », « l'homogénéité du mélange vieux bitume-liant d'apport », « le choix du liant d'apport », « l'influence des conditions de fabrication sur les performances de l'enrobé recyclé », « caractérisation des fraisats » ...

Ce projet nous a permis de faire une immersion dans le domaine des produits noirs, de découvrir un axe de recherche qui est peu connu en Algérie pendant que d'autres pays se fixent comme « objectif de recycler de plus en plus et d'augmenter progressivement les taux des AE dans les divers mélanges d'enrobés à chaud. Cette nouvelle approche permettra de diminuer l'utilisation des ressources naturelles, de l'énergie de fabrication et de mise en œuvre des chaussées souples. Dans un contexte actualisé de développement durable et de préservation de l'environnement, les efforts de tous les intervenants doivent continuer tout en ayant comme objectif ultime que 100 % des Agrégats d'Enrobés produits annuellement soient recyclés ! » [3].

- [1] **JOURNEE TECHNIQUE** : « Recyclage des enrobes bitumineux », SONATRO (Alger), décembre 1997
- [2] **HASSOUN, B** : « Contribution a la faisabilité du recyclage des enrobes bitumineux des chaussées en Algérie», Thèse magister Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2009
- [3] **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
- [4] **MONTALANT, A** : « Etude de l'influence du recyclage d'enrobés tièdes contenant l'additif SASOBIT», mémoire de projet de fin d'étude, INSA Strasbourg, 2011.
- [5] **HARKAT, B** : « Technique innovant en construction routière pour assise de chaussée». Mémoire d'ingénieur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ENP, juin 2010
- [6] **JEAN-MARIE, D et al** : «Manuel d'identification des dégradations des chaussées souples», Québec 2002
- [7] **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
- [8] **DI BENEDETTO H., CORTE J.F.**: « Matériaux routiers bitumineux 1 : description et propriétés des constituants », Hermès, 2004.
- [9] **SAOULA, S** : « Approche modéliste et valorisation des enrobes modifiées par ajout de polymères - impact sur l'environnement », Thèse de Doctorat Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 2010.
- [10] **SADOON, S** : « Etude du renforcement du béton bitumineux recycle par des granulats plastiques». Mémoire de magister, université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2009
- [11] **MALLOUK, J** : « les enrobés bitumineux». Tome 1 : Théorie, Tome 2 : Laboratoires. Modulo éditeur, 1982
- [12] **OLARD, F** : « Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures : Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé », thèse de doctorat à l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2003.
- [13] **BÉGHIN, A** : « Apport de mesures rhéologiques et de pelage a l'analyse de la rupture de liants bitumineux», Thèse de doctorat Université de Paris 6, 2003
- [14] **MADANI, T** : «Caractérisation du fonctionnement des tambours sécheurs enrobeurs en vue de leur commande», Thèse de Doctorat l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 2005

- [15] **CTTP**, « Recommandation algériennes sur l'utilisation des bitumes et enrobes bitumineux a chaud », MTP 2004.
- [16] **GUIDE TECHNIQUE** : « Conception et dimensionnement des structures de chaussée ». Ed LCPC et SETRA, Paris, décembre 1994.
- [17] **MAGRAMANE, Dj**: « Amélioration des performances des enrobés bitumineux par la modification à base de polymères : poudrette de caoutchouc », Mémoire de magister, Ecole Nationale des Travaux Publics d'Alger – ENTP, 2009.
- [18] **Florian, PY** : « Etude de la sensibilité du module des enrobes à module élève, influence de la teneur en liant, de la compacité et du pourcentage d'agrégats d'enrobé du matériau », mémoire de projet de fin d'étude, INSA Strasbourg, 2010.
- [19] **CATALOGUE 3** : « Structure et types chaussées », revue française
- [20] **PRESENTATION ORALE** : « Constituants des enrobés en France », Québec, 2006
- [21] **CERIU INFRASTRUCTURES** : « Les revêtements très minces et ultra-minces démystifiés » Bulletin d'information du Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines, Vol. 9, 2002
- [22] **DONGMO, B-J** : « Caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2005.
- [23] **MAILLARD, S** : « Fissuration et autoréparation des liants bitumineux – apport de l'essai de rupture locale répétée sur bitume » Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes, 2005
- [24] **TP ROUTES**. « Le recyclage tient la route » - Toute l'info – revue française : Le Moniteur.fr
- [25] **HARKAT, B**: « Technique innovant en construction routière pour assise de chaussée ». Mémoire d'ingénieur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ENP, juin 2010
- [26] **GUIDE SETRA** : « Retraitement des chaussées et recyclage des matériaux bitumineux de chaussées », juillet 2004
- [27] **ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE** : « recyclage des chaussées », France, 2003
- [28] **GUIDE SETRA** : « Témorécyclage », CFTR, Mai 2004
- [29] **MINISTERE DES TRANSPORTS** : « Régénération des couches de surface de chaussées », LCPC, SETRA, Mai 1981
- [30] **SOLEYMANI, H . R., ANDERSON , M. R. McDaniel and M. Abdelrahman** : « Investigation of the black rock issue for recycled asphalt mixtures », *Journal Of The*

Association Of Asphalt Paving Technologists, Asphalt Paving Technology 2000, 69, 366-390.

[31] HAJI, E.Y. SEBAALY, P.E. and SHRESTHA, R.: « A laboratory Evaluation on the Use of Recycled Asphalt Pavement in HMA Mixtures», *Final Report, Regional Transportation Commission, 2007*

[32] MCDANIEL, R. SLAH, A. HUBER and G.A. V. GALLIVAN: « Investigation of Properties of Plant-Produced RAP Mixtures», *Transportation Research Board (TRB) 86th Annual Meeting, 21-25 January 2007, Washington.*

[33] MCDANIEL, R. SOLEYMANI, H and SLAH, A. «Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Under Superpave Specifications: A Regional Pooled Fund Project», *Technical Summary, Final Report, INDOT Research, 2000*

[34] MCDANIEL, R. SOLEYMANI H, R. ANDERSON, M. TURNER ,P and PETERSON, R.: « Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method, *Contractor's Final Report*», National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Project D9-12, 2000

[35] HAJI E.Y. SEBAALY, P.E. and SHRESTHA, R.:« A laboratory Evaluation on the Use of Recycled Asphalt Pavement in HMA Mixtures», *Final Report, Regional Transportation Commission, 2007*

[36] SAMUELS, J: « NCHRP Report 452: Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the superpave mix design method: Technician's manual». Transportation Research Board. p.58, 2001

[37] BAAJ, H : « Comportement en fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés». INSA Lyon, 2002.

[38] R. Mcdaniel and R.M. Anderson: « Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method» , Technician's Manual, *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 452, 2001*

