

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE



FACULTÉ DE GÉNIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

En Génie Civil

Spécialité : géotechnique.

Par M^{lle} **M'SILI AMINA**

Sujet

**INFLUENCE DU CALIBRE DES CLASSES GRANULAIRE SUR LES
PERFORMENCES MECANIQUES DES ENROBES BITUMINEUX**

Soutenu publiquement : le 12 juillet 2012 devant le jury composé de:

Mme F. KHARCHI	Professeur, à USTHB	Présidente
Mme. K. AIT MOKHTAR	Maître de conférences/A, USTHB	Directrice de mémoire
M ^r . M. BELACHIA	Professeur, Université de Skikda	Examineur
M ^r . ZERZOUR	Professeur, ENSTP	Examineur
M ^r . S. HADDADI	Maître de Conférences/A, USTHB	Examineur

A mes chers parents,

A mes soeurs Meriem, Khadidja et Asma

A mes frères Mohamed, Hamza et Abd el hak

A ma tante Farida.

A mon cher mari

A toute ma famille et ma belle famille.

A tous mes amis.

Remerciements

Je remercie dieu tout puissant de m'avoir donné la force et le courage pour accomplir ce travail.

Je tiens à remercier mes parent qui m'ont toujours soutenue et encouragé

J'adresse mes sincères remerciements toute personne qui a contribué de pré ou de loin a la réalisation de ce mémoire de magister.

Je tiens à exprimer, ma gratitude et ma reconnaissance à Madame K. Ait Mokhtar, Maître de conférences à l'USTHB qui m'a encadré et guidé pour accomplir ce travail, pour ses conseils, son soutien moral et sa compréhension pendant ces années.

J'exprime aussi ma gratitude et mes remerciements aux personnes qui m'honorent en étant membre du jury, à noter :

- *Madame Mme F. KHARCHI Professeur, à USTHB qui ma fait l'honneur d'accepter de présider ce jury.*
- *Monsieur M. M. BELACHIA Professeur à l'université de Skikda qui a accepté de faire le déplacement.*
- *Monsieur A. Zerzour, Directeur de l'ENSTP, qui ma fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury.*
- *Monsieur, S. Haddadi, Maître de conférences à l'USTHB, qui n'a pas hésité à accepter de me faire l'honneur d'apporter sa contribution productive à la discussion des résultats de ce travail.*

Aussi, un grand remerciement à l'équipe du Laboratoire Route et Aérodrome de la faculté Génie Civil, USTHB, en particulier, K. Ait Mokhtar S. Haddadi et D. Benour, pour le soutien moral qui m'ont apportés.

Et pour finir, mes remerciements s'adressent aussi au personnel du laboratoire de l'Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Résumé

L'objectif de la présente étude est de déterminer l'influence du calibre des classes granulaires sur les propriétés physiques et mécaniques du bitume et des béton bitumineux.

L'étude a montré que :

- La modification du bitume avec du caoutchouc naturel (NR) améliore ses caractéristiques physiques et mécaniques (pénétrabilité, TBA, ductilité).
- L'utilisation des granulaires serrées améliore les caractéristiques mécaniques des bétons bitumineux et cela se traduit par
 - Une augmentation de la stabilité
 - Une diminution du fluage Marshall
 - Une augmentation de la compacité
- La modification des bitumes améliore le comportement des enrobés bitumineux. Cette amélioration se traduit par :
 - Une augmentation de la stabilité, la compacité, et le quotient Marshall,
 - Une diminution du fluage Marshall,
 - Une augmentation de la résistance aux déformations de fluage,
 - Une atténuation de la déformation initiale de l'enrobé bitumineux.

Mots Clés : granulats, classes granulaires, Bitume, Poudrette de caoutchouc, Caoutchouc naturel NR, Enrobés bitumineux, Marshall.

Abstract

The objective of this work is to determine the influence of the modification of the bitumen with the rubber fine powder on the one hand on the physical properties, chemical and mechanics of the bitumen and the bituminous mix and on the other hand on rheological behaviour with the static creep of the bitumen binders.

The study shows that :

- The modification of the bitumen with Natural Rubber (NR) improves its physical and mechanical characteristics (penetrability, TBA, ductility, thermal susceptibility, etc).
- The modification of the bitumens improves the behavior of the bitumen binders. This improvement is translated by :
 - An increase in stability, compactness and the Marshall quotient,
 - A reduction in Marshall Creep,
 - An increase in resistance to the deformations of creep,
 - An attenuation of the initial deformation of the bitumen binder.

In addition to the improvement of the characteristics of the bitumen binders which will be reflected on the durability of the bituminous structures, the environment by this practice will be preserved by the valorisation of the industrial waste in particular the worn tires.

Key Words Bitumen, rubber Poudrette, Natural rubber NR, bitumen Binders, Marshall, Creep.

الملخص

الهدف المنشود من هذه الدراسة هو تحديد تأثير تعديل الزفت مع مسحوق المطاط على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للزفت والإسفلت من ناحية، ومن ناحية أخرى على السلوك الريولوجي للتشوه الساكن للإسفلت. وتشير الدراسة إلى أن :

• تعديل الزفت مع المطاط الطبيعي (NR) يحسن الخصائص الفيزيائية والميكانيكية (الاختراق، TBA، الليونة، وقابلية التمدد الحراري، الخ)..

• تعديل الزفت يحسن سلوك الإسفلت وينعكس هذا التحسين على :

- زيادة في الاستقرار، لضرورة معامل مارشال،
- انخفاض تميع مارشال،
- زيادة مقاومة تشويه التميع،
- تخفيض التشوه الأولي للإسفلت.

وبالإضافة إلى تحسين خصائص الإسفلت والتي ستؤثر على متانة الهياكل الإسفلتية، فإن البيئة هي المستفيد الثاني من إعادة معالجة النفايات الصناعية بما فيها إطارات السيارات المستعملة.

الكلمات الرئيسية : الزفت، مسحوق المطاط، المطاط الطبيعي (NR) ، الإسفلت ، مارشال، التميع.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : ELABORATION DES GRANULATS EN CARRIERE	
I.1. INTRODUCTION	4
I.2. LES MATERIAUX DU GENIE CIVIL.....	4
I.2.1. LES MATERIAUX ERUPTIFS OU MAGMATIQUES	4
I.2.2. LES MATERIAUX METAMORPHIQUES.....	5
I.2.3. LES MATERIAUX SEDIMENTAIRES MEUBLES	5
I.3. CARRIERES	6
I.3.1. LES CARRIERES DE ROCHES MASSIVES	6
I.3.2. LES CARRIERES DE ROCHES MEUBLES	6
I.3.3. LES CARRIERES DE PIERRES DE TAILLE.....	7
I.4. EXPLOITATION DES CARRIERES.	7
I.4.1. L'EXTRACTION	8
I.4.1.1. Gisements alluvionnaires	8
I.4.1.2. Gisements massifs	9
I.4.1.3. Gisements marins.....	12
I.5. PRODUCTION DE GRANULATS	13
I.5.1. LE MARINAGE	14
I.5.2. LE CONCASSAGE ET LE BROYAGE	14
I.5.3. LE CRIBLAGE.....	16
I.5.4. LE LAVAGE	17
I.5.5. LE STOCKAGE	19
I.5.6. LE CONTROLE DE QUALITE	21
I.6. CONCLUSION	22
Chapitre II : ESSAIS SUR LES GRANULATS	
II.1. INTRODUCTION	24
II.2. ESSAIS CARACTERISANT LES PROPRIETES DE LA FABRICATION	24
II.2.1. L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE	24
II.2.2. L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SIDIMENTOMETRIE	25
II.2.3. COEFFICIENT D'APLATISSEMENT [EN 933-3]	25
II.2. 4. LA PROPETE SUPERFICIELLE DES GRANULATS	26
II.3. ESSAIS CARACTERISANT LES PROPRIETES INTRINSEQUES.....	27
II.3.1 LA RESISTANCE AUX CHOCS : ESSAI LOS ANGELES NFP 18-573	27
II.3.2. LA RESISTANCE A L'USURE ESSAI MICRO DEVAL NFP 18-572	28
II.3.3. LA FRAGMENTATION DYNAMIQUE NFP 18-574	29
II.4. ESSAIS CARACTERISANT LE SABLE	30
II.4.1. L'EQUIVALENT DE SABLE [NFP 18-597, NFP 18-598, EN 933-8]	30

II.4.2. L'ESSAI AU BLEU DE METHYLENE [EN 933-9].5	30
II.4.3. LA FRIABILITE DES SABLES NFP 18-576.....	31
II.5. CONCLUSION	31
Chapitre III: NORMALISATION ROUTIERE EN MATIERE DE GRANULATS	
III.1 INTRODUCTION	33
III.2. LES DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS	33
III.2.1 CLASSEMENT SELON L'ORIGINE DE LA ROCHE	33
III.2.1.1. Les granulats alluvionnaires	33
III.2.1.2. Granulats issus de roches massives.....	33
III.2.2. CLASSEMENT SELON L'UTILISATION	34
III.2.2.1. Granulats recyclés	34
III.2.2.2. granulats de laitier.....	34
III.2.2.3. Les granulats artificiels	35
III.2.3 CLASSEMENT SELON LA DIMENSION	35
III.3 CARACTERISTIQUES DES GRANULATS	36
III.3.1 LES CARACTERISTIQUES DE FABRICATION.....	36
III.3.1.1. La granularité.....	36
III.3.1.2. La forme	37
III.3.1.3. L'angularité.....	37
III.3.1.4. La propreté.....	37
III.3.2. PROPRIETES INTRINSEQUES.....	37
III.3.2.1. RESISTANCE A LA FRAGMENTATION (CHOCS).....	37
III.3.2.2. Résistance à l'attrition et à l'usure	37
III.5. LA CODIFICATION DES GRANULATS	38
III.5.1. CODIFICATION DES GRANULATS EN FONCTION DE LEURS CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES.....	38
III.5.1.1. Les gravillons et graves.....	38
III.5.1.2. Sables	39
III.5.2. CODIFICATION DES GRANULATS EN FONCTION DE LEURS CARACTERISTIQUES DE FABRICATION	40
III.5.2.1. Granularité	40
III.5.2.2. Teneur en matières organiques	40
III.5.2.3. Degré de concassage des granulats alluvionnaires	40
III.5.2.4. Codification des gravillons.....	41
III.5.2.5. Codification des sables	42
III.6. LES FUSEAUX GRANULOMETRIQUES	42
III.6.1. FUSEAU ENVELOPPE.....	42
III.6.2. FUSEAU DE SPECIFICATION	42
III.6.3. FUSEAU DE FABRICATION	42
III.7. SITUATION EN ALGERIE EN MATIERE DE RESPECT DES NORMES	43
III.7.1. PROVENANCE DES GRANULATS.....	43
III.7.2. LES CARACTERISTIQUES DES GRANULATS.....	44
III.7.2. FUSEAUX GRANULOMETRIQUES ET GRANULARITE:.....	44
III.7.3.RESULTATS DE L'ENQUETE :	47
III.7.3.1 La granularité.....	47
III.7.3.2. Forme et propreté :	47

III.7.3.3. Essais mécaniques	48
III.7.4. RESULTATS	50
III.8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	50
Chapitre IV : LES LIANT HYDROCARBONES	
IV.1. DEFINITION	52
IV.2 COMPOSITION ET STRUCTURE DES BITUMES	52
IV.3. LES BITUMES MODIFIES	54
IV.3.1. LES AGENTS MODIFIANT UTILISES	54
IV.3.1.1. Les polymères thermodurcissables	55
IV.3.1.2. Les polymères thermoplastiques	55
IV.3.2. LE LATEX	57
IV.3.2.1. Caoutchouc naturel (NR) « Naturel Rubber »	57
IV.3.2.1. Le caoutchouc styrène butadiène (SBR).....	59
IV.3.2.3. Le polychloroprène (CR).....	59
IV.4. LE BITUME CAOUTCHOUC	60
IV.4.1. PROCEDE DE FABRICATION D'UN BITUME CAOUTCHOUC.....	61
IV.4.1.1. Modification par voie humide "Wet process"	61
IV.4.1.2. Modification par voie sèche "Dry process"	61
IV.4.2. INFLUENCE DES PARAMETRES DE FABRICATION SUR LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU BITUME - CAOUTCHOUC [2].....	62
IV.5. CONCLUSION.....	63
Chapitre V: LA NORMALISATION EN MATIERE D'ENROBES BITUMINEUX	
V.1. INTRODUCTION.....	66
V.2. DEFINITIONS.....	66
V.2.1. LES GRAVE BITUME.....	66
V.2.2. LES BETONS BITUMINEUX.....	66
V.3. CONSTITUTION ET CONSTITUANTS DES ENROBES BITUMINEUX.....	66
V.3.1. LES GRANULATS.....	67
V.3.1.1. Les fines.....	67
V.3.1.2 Les sables	67
V.3.1.3. Les gravillons	67
V.3.2. LE BITUME.....	68
V.4. FORMULATION DES ENROBE BITUMINEUX	68
V.4.1. SELECTION DU SQUELETTE GRANULAIRE.....	68
V.4.2. DETERMINATION DE LA TENEUR EN LIANT	69
V.5. LES PROPRIETES D'USAGE DES BETONS BITUMINEUX.....	70
V.6.INFLUENCE DE LA GRANULOMETRIE SUR LA QUALITE D'UN BETON BITUMINEUX	71
V.7. CONCLUSION.....	72

Chapitre VI PRESENTATION ET ANALYSE DES MATERIAUX

VI.1. LES GRANULATS	75
VI.1.1. ORIGINE DES GRANULATS ET DU SABLE	75
VI.1.2. ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE	75
VI.1.3. ANALYSE GRANULOMETRIQUE	77
VI.1.4. CARACTERISTIQUES DES GRANULATS	81
VI.1.4.1. Caractéristiques de fabrication des granulats.....	81
VI.1.4.2. Caractéristiques intrinsèques des granulats :	83
VI.2. BITUME	84
VI.2.1. CARACTERISTIQUES DU BITUME	85
VI.2.1.1. Essai de pénétrabilité à l'aiguille.....	85
VI.2.1.2. Détermination de la température Bille Anneau.....	86
VI.2.1.3. Susceptibilité thermique	87
VI.2.1.4. La ductilité.....	89
VI.2.1.5. Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test".....	90
VI.2.1.6. Caractérisation du bitume par FTIR	92
VI.3. LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC	92
VI.3.1. CARACTERISTIQUES DE LA POUDRETTE.....	93
VI.3.1.1. L'analyse granulométrique de la poudrette.....	93
VI.3.1.2. Mesure de la densité de la poudrette.....	95
VI.3.1.3. Caractérisation de la poudrette par FTIR	95
VI.4 CONCLUSION.....	96
Chapitre VII : ETUDE DU BITUME MODIFIE	
VII.1. NOMENCLATURE DES MATERIAUX	97
VII.2. FABRICATION DU BITUME CAOUTCHOUC	97
VII.2.1. PRINCIPE ET MATERIELS UTILISE	97
VII.2.2. MODE OPERATOIRE.....	98
VII.3. INFLUENCE DE LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC SUR LES CARACTERISTIQUES DU BITUME.....	99
VII.3.1. INFLUENCE DE LA TENEUR EN NR SUR LA PENETRABILITE	99
VII.3.2. TAUX VARIATION DE LA PENETRABILITE DU BITUME MODIFIE PAR RAPPORT AU BITUME PUR	99
VII.3.3. INFLUENCE DE LA TENEUR EN POUDRETTE SUR LA TEMPERATURE BILLE ET ANNEAU	100
VII.3.4. TAUX VARIATION DE LA TEMPERATURE DE RAMOLLISSEMENT DU BITUME MODIFIE PAR RAPPORT AU BITUME PUR	101
VII.4. CONCLUSION.....	102
Chapitre VIII: INFLUENCE DU CALIBRE DES GRANULATS SUR LE BETON BITUMINEUX	
VIII.1. FORMULATION DE L'ENROBE BITUMINEUX A BASE DE GRANULATS CLASSIQUES.	105
VIII.1.1. DETERMINATION DE LA COURBE DU MELANGE	105
VIII.1.2. DETERMINATION DE LA TENEUR EN LIANT OPTIMALE	106
VIII.1.3. ANALYSE DE L'ENROBE A BASE DE GRANULATS CLASSIQUE	108
VIII.1.4. RESULTATS	113
VIII.2. FORMULATION ET ETUDE DE L'ENROBE BITUMINEUX A BASE DE GRANULATS USUEL	113
VIII.2.1 COMPARAISON DES CLASSES GRANULAIRES	113
VIII.2.2. DETERMINATION DE COURBE GRANULOMETRIQUE DU MELANGE	114
VIII.2.2.1. Exigences de granularité pour la formulation de mélanges hydrocarbonés.	114

VIII.2.3. DETERMINATION DE LA TENEUR EN LIANT OPTIMALE	116
VIII.2.4. ETUDE DE L'ENROBE BITUMINEUX A BASE DE CLASSES ROUTIERES	119
VIII.3. ETUDE COMPARATIVE DES DEUX ENROBE BITUMINEUX	119
VIII.3.1. SQUELETTE GRANULAIRE	119
VIII.3.2. COMPARAISON DES RESULTATS MARSHALL	120
VIII.4. CONCLUSION.....	122
Chapitre IX : ETUDES DES BETONS BITUMINEUX MODIFIES	
IX.1. NOMENCLATURE DES MATERIAUX	125
IX.2. INFLUENCE DE LA TENEUR EN POUDRETTE SUR LES CARACTERISTIQUES MARSHALL DE L'ENROBE MODIFIES	125
IX.3. COMPARAISON DU BBU (0) AVEC LE BBCM MODIFIE A DIFFERENTES TENEURS EN POUDRETTE.....	128
IX.4. CONCLUSION	130
CONCLUSION GENERALE.....	132

Liste des figures

Figure I.1. Schéma simplifié d'une exploitation.....	7
Figure II.1. Analyse granulométrique.....	23
Figure II.2. Grilles pour coefficient d'aplatissement.....	25
Figure II.3 Machine Los Angeles.....	26
Figure II.4 Machine Micro Deval.....	27
Figure II.5 Machine pour la fragmentation dynamique.....	29
Figure III.1. Granulats du laitier.....	33
Figure III.2. Les différents fuseaux granulométriques.....	40
Figure VI.1. Composition des bitumes.....	51
Figure VI.2. Etat colloïdal des bitumes.....	51
Figure VI.3. Schématisation de la structure colloïdale.....	52
Figure VI.4. Influence de l'ajout du SEBS sur la pénétrabilité et le ramollissement du bitume.....	54
Figure VI.5. Influence de l'EVA sur la pénétrabilité des bitumes.....	54
Figure VI.6. Influence de l'EVA sur la température de ramollissement des bitumes.....	55
Figure VI.7. Influence de la teneur en EVA sur la pénétrabilité et le point de ramollissement du bitume avant et après RTFOT.....	55
Figure IV.8 Evolution de la température bille et anneau « TBA » au vieillissement des liants bitumineux.....	56
Figure IV.9. Influence de la teneur en NR sur l'indice de pénétrabilité « IP ».....	56
Figure IV.10. Influence de la teneur en NR sur la ductilité à 25 °C	57
Figure VI.11. Mode de fabrication d'un bitume modifié.....	59
Figure VI.12. Dissolution du caoutchouc dans le bitume en fonction du temps de malaxage.....	60
Figure VI.13 .Dissolution du caoutchouc dans le bitume en fonction de la température de malaxage	61
Figure VI.1. Résultats de l'analyse granulométrique des classes classiques	75
Figure VI.2. Résultats de l'analyse granulométrique des classes routières.....	77
Figure VI.3. Essai de pénétrabilité pour le bitume.....	81
Figure VI.4. Détermination du point de ramollissement.....	82
Figure VI.5. La susceptibilité thermique du bitume.....	84
Figure VI.6. Principe de l'essai de Ductilité.....	85
Figure VI.7. Principe de l'essai RTFOT.....	86
Figure VI.8. Résultats du Spectre FTIR du bitume étudié.....	88
Figure VI.11. Résultat du Spectre FTIR de la poudrette de caoutchouc [NR].....	91
Figure VII.1. Schéma du dispositif utilisé pour la fabrication du bitume modifié.....	96

Figure VII.2. Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité à 25 °C.....	97
Figure VII.3. Influence de la teneur en poudre sur la pénétrabilité du bitume.....	97
Figure VII.4. Taux de variation de la pénétrabilité du bitume.....	98
Figure VII.5. Influence de la teneur en poudre sur le point de ramollissement du bitume.....	99
Figure VII.6. Variation du point de ramollissement du bitume en fonction de la teneur en NR.....	100
Figure VIII.1. Courbe granulométrique du mélange granulaire du BBC.....	104
Figure VIII.2.Principe de l'essai Marshall.....	106
Figure VIII.3.Presse Marshall.....	107
Figure VIII.4 Stabilité Marshall du BBC en fonction de la teneur en bitume.....	108
Figure VIII.5. Fluage Marshall du BBC en fonction de la teneur en bitume.....	108
Figure VIII.6. Le quotient Marshall du BBC en fonction de la teneur en bitume.....	109
Figure VIII.7. La compacité Marshall du BBC en fonction de la teneur en bitume.....	109
Figure VIII.8. Courbe granulométrique du mélange granulaire à basse de granulats routiers.....	113
Figure VIII.9. Stabilité Marshall du BBU en fonction de la teneur en bitume.....	115
Figure VIII.10. Le fluage Marshall du BBU en fonction de la teneur en bitume.....	115
Figure VIII.11. La compacité Marshall du BBU en fonction de la teneur en bitume.....	116
Figure VIII.12 Le quotient Marshall du BBU en fonction de la teneur en bitume.....	116
Figure VIII.13. Courbes granulométriques des mélanges granulaires	118
Figure VIII.14. Comparaison entre les stabilités Marshall des deux enrobés	119
Figure VIII.15. Comparaison entre les fluages Marshall des deux enrobés.....	119
Figure VIII.16. Comparaison entre les quotients Marshall des deux enrobés	120
Figure IX.1. La stabilité Marshall des enrobés modifiés en fonction de la teneur en poudre	124
Figure IX.2. Le fluage Marshall des enrobés modifiés EN fonction de la teneur en poudre	125
Figure IX.3. Le fluage Marshall des enrobés modifiés EN fonction de la teneur en poudre	125
Figure IX.4.Influence du calibre des classes granulaire sur le Quotient Marshall des enrobés bitumineux.....	127
Figure IX.5. Influence du calibre des classes granulaire sur la Compacité Marshall des enrobés bitumineux	127
Figure IX.6. Influence du calibre des classes granulaire sur la Compacité Marshall des enrobés bitumineux	128

Liste des photos

Photo I.1.: Extraction par gradin	8
Photo I.2. Extraction des granulats alluvionnaires	9
Photo I.3. Installation des explosifs	10
Photo I.4. Explosion sur un front	11
Photo I.5. Chargement pour le traitement en usine	11
Photo I.6 : gisement marin	12
Photo I.7. Chargement d'un dumper pour l'usine	14
Photo I.8	15
a) Concasseurs à mâchoires	
b) Concasseurs à percussion	
Photo I.9 : Broyeur pour broyage secondaire et tertiaire	16
Photo I.10. Lavage des granulats	17
Photo I-11 : stockage de granulats	21
Photo VI.1 L'aspect de la poudrette NR	89

Liste des tableaux

Tableau II.1. Nombre de boulets en fonction des classes granulaires.....	27
Tableau II.2. Charge abrasive fonction des classes granulaires.....	28
Tableau II.3. Nombre de coups fonction des classes granulaires.....	28
Tableau III.1. Codification des caractéristiques intrinsèques des Gravillons.....	37
Tableau III.2. Codification de PSV de la roche mère des sables.....	37
Tableau III.3. Codification du degré de concassage des granulats alluvionnaires.....	38
Tableau III.4 : codification du coefficient d’aplatissement des gravillons.....	39
Tableau III.5 : codification de la teneur en fine des gravillons	39
Tableau III.6. Dimension des tamis pour la spécification des classes granulaires	43
Tableau III.7. Caractéristiques générales de granularité.....	44
Tableau III.8.Limites générales de granularité des gravillons au tamis de dimension intermédiaire.....	44
Tableau III.9. Coefficients de propreté et d’aplatissement.....	45
Tableau III.10. Résultats du LA et du MDE	47
Tableau III.11 Spécifications	48
Tableau VI.1. Différents agents modifiants.....	58
Tableau V.1. Coefficient de richesse des enrobé bitumineux.....	68
Tableau V.2. Fuseau granulométrique 0/10.....	70
Tableau V.3. Fuseau granulométrique 0/14.....	70
Tableau VI.1. Provenance des granulats utilisés.....	72
Tableau VI.2. Analyse chimique sommaire des différents types de granulat.....	72
Tableau VI.3. Classification des granulats.....	73
Tableau VI.4. Résultats de l’analyse granulométrique des classes classiques.....	74
Tableau VI.5. Résultats de l’analyse granulométrique des classes routières.....	76
Tableau VI.6 : Propreté des granulats.....	78
Tableau VI.7 : poids spécifiques des granulats.....	78
Tableau VI.8 : coefficient d’aplatissement.....	79
Tableau VI.9 : résultats des essais LOS ANGELES.....	79
Tableau VI.10 : résultats des essais MICRO DEVAL.....	79
Tableau VI.11 : caractéristiques des granulats.....	79
Tableau VI.12. Pénétrabilité du bitume	81
Tableau VI.13. Point de ramollissement du bitume.....	82
Tableau VI.14. la suseptibilité termique du bitume.....	84
Tableau VI.15. mesure de la suceptibilité du bitume.....	85
Tableau VI.16. Ductilité du bitume.....	85

Tableau VI.18. Caractéristiques du bitume après RTFOT.....	86
Tableau VI.19. Caractéristiques du bitume.....	87
Tableau VI.20. L'analyse granulométrique de la poudrette de caoutchouc [NR].....	89
Tableau VI.21. Densité de la poudrette de caoutchouc [NR].....	90
Tableau VII.1 Nomenclature des matériaux en fonction de la teneur en NR.....	95
Tableau VII.2. Classement des bitumes modifié en fonction de la teneur en NR.....	101
Tableau VIII.1.Teneur en liant en fonction de K.....	105
Tableau VIII.2. Résultats Marshall de l'enrobe BBC	107
Tableau VIII.3. Composition de la formule utilisée pour l'enrobé classique.....	111
Tableau VIII.4. Résultats de l'essai Marshall du mélange étudié.....	111
Tableau VIII.5. Ecart granulaire.....	112
Tableau VIII.6. Granularité des classes routières fabriquées au laboratoire.....	113
Tableau VIII.7. Teneur en liant en fonction de K	114
Tableau VIII.8. Résultats Marshall BBU.....	114
Tableau VIII.9. Formule adopté pour l'enrobé usuel.....	117
Tableau VIII.10. Résultats de l'essai Marshall du mélange a base de granulats routiers.....	118
Tableau IX.1. Nomenclature des matériaux en fonction de la teneur en NR.....	123
Tableau IX.2. Caractéristiques mécaniques du BBCM en fonction de la teneur en NR.....	124
Tableau IX 3. Caractéristiques mécaniques du BBUM en fonction de la teneur en NR.....	124

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans la construction routière la qualité des granulats constitue un élément d'importance capitale ;En Algérie et juste après l'indépendance, les carrières produisaient deux séries de granulats à savoir celle destinée au béton (0/3, 3/8, 8/15 et 15/25) et celle destinée aux routes (0/2-2/4-4/6,3-6,3/10 et 10/14).

La demande en granulats pour béton ayant dépassée l'offre, les carriers abandonnèrent peu à peu la série de granulats destinée aux travaux routiers pour ne produire à la fin des années 1980 que la série destinée au Béton de ciment.

Les ingénieurs routiers furent donc obligés d'utiliser des granulats non destinés aux routes tout en continuant d'utiliser des normes et des spécifications élaborées à base de granulats routiers.Ceci a sans doute contribué, en plus de bien d'autres facteurs, à la non qualité de nos routes dont la durée de vie avant entretien, est devenue très courte. La question qui se pose aujourd'hui est de savoir jusqu'à quel point l'utilisation de fuseaux élaborés à la base pour les granulats routiers mais avec des granulats pour béton affectent les caractéristiques mécaniques de nos enrobés bitumineux qu'ils soient modifiés ou non.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre recherche intitulée "**INFLUENCE DU CALIBRE DES CLASSES GRANULAIRES SUR LES PERFORMANCES MECANIQUES DES ENROBES BITUMINEUX**".

Le travail que nous nous somme fixé est partagé en deux partie, la première est de savoir si le calibre des granulats utilisés en technique routière à une influence sur les performances des couches de roulement en béton bitumineux et la deuxième est d'évaluer cette même influence dans le cas des enrobés modifiés.

Nous étudierons l'influence du calibrage des granulats à l'aide d'une comparaison des performances de deux bétons bitumineux (0/14) qui seront confectionnés avec deux ensembles de classes granulaires différentes, un premier béton bitumineux sera confectionné avec les classes utilisées en Algérie (0/3, 3/8 et 8/15) et qui ne sont pas conformes aux normes et un autre confectionné avec les classes normalisées (0/2, 2/4, 4/6,3, 6,3/10 et 10/14).

L'objectif final de cette étude est de sensibiliser les décideurs sur la nécessité de revenir à des classes granulaires normalisées pour les routes en montrant que l'utilisation ces classes améliore la qualité de nos enrobés.

INTRODUCTION GENERALE

Pour mener à bien notre travail nous suivons le plan suivant;

Une première partie bibliographique dans laquelle nous allons présenter :

- Les granulats depuis leur élaboration en carrière jusqu'à leur caractérisation en laboratoire,
- la normalisation en matière de granulats pour les routes,
- Les bitumes et les bitumes modifiés
- Les enrobés bitumineux

Une deuxième partie consacrée à l'étude expérimentale présentée comme suit :

- Les propriétés et caractéristiques des granulats utilisés
- Les propriétés physico-chimiques du bitume pur et du polymère utilisés,
- La détermination de l'influence de la teneur en polymère sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du bitume modifié,
- La détermination de l'influence du calibre des granulats sur les caractéristiques Marshall de l'enrobé bitumineux
- La détermination de l'influence de la teneur en polymère sur les caractéristiques Marshall de l'enrobé bitumineux.

**ELABORATION DES GRANULATS
EN CARRIERE**

I.1. INTRODUCTION

En génie civil les granulats ont une place primordiale et prépondérante dans toutes les structures allant de la plus petite à la plus imposante et complexe des structures.

Dans ce chapitre nous nous intéresserons à l'élaboration de ces granulats.

Dans une première partie nous déterminerons leurs origines et leurs provenances, leurs fabrications, leurs stockages, les contrôles et pour finir les normes réglementaires.

I.2. LES MATERIAUX DU GENIE CIVIL

Depuis le Paléolithique, l'Homme exploite les ressources géologiques à son profit. Cette exploitation visait d'abord à la fabrication d'armes et d'outils. Elle a ensuite concerné la recherche de matériaux transformables (métaux), à destination énergétique (charbon, pétrole, gaz, uranium), utiles dans la réalisation d'ouvrages architecturaux (calcaires, grès, granite,...), ou encore nécessaires pour l'amendement des sols de culture (calcaire, argile, phosphates).

Dans le domaine du génie civil, on utilise les matériaux suivants :

I.2.1. Les matériaux éruptifs ou magmatiques

Les roches magmatiques résultent de la cristallisation d'un magma venant des profondeurs de l'écorce terrestre. Leur mode de mise en place conditionne en grande partie leur structure.

- ❖ si le refroidissement du magma est rapide, cas de coulées de lave par exemple, les cristaux n'ont pas eu le temps de se former et ne sont donc pas visibles à l'œil nu ; La roche est dite vitreuse et présente une structure microlitique (présence de petits cristaux non visibles à l'œil nu). On parle alors de matériaux éruptifs ou volcaniques.
- ❖ si le refroidissement du magma est suffisamment lent, les minéraux se sont largement développés. La roche présente alors une texture grenue où les minéraux de dimension millimétrique sont bien visibles à l'œil nu. On parle alors de matériaux magmatiques.

Les matériaux éruptifs ou magmatiques sont classés en fonction de leur teneur en silice (entre 20 et 60 % pour un granite), en feldspaths alcalins (plus de 90 % pour une syénite), en plagioclases (plus de 90 % pour une diorite) et en feldspathoïdes (de 60 à 100 % pour un feldspathoïdolite).

I.2.2. Les matériaux métamorphiques

Les roches métamorphiques résultent de la transformation à l'état solide d'autres roches (sédimentaires, magmatiques ou métamorphiques) lors d'un changement de leurs conditions de pression et de température. Ce changement entraîne une modification minéralogique (par réaction chimique) et texturale de la roche.

On distingue deux sortes de métamorphisme :

- ❖ Le métamorphisme de contact dû à l'intrusion d'un corps chaud (magma, laves) dans une roche préexistante. Il est généralement d'origine thermique et son extension est relativement réduite autour de l'intrusion (de quelques mètres à quelques centaines de mètres). Les roches types sont les Schistes et les cornéennes.
- ❖ Le métamorphisme général affecte l'ensemble des roches sur des épaisseurs et des surfaces importantes. Il est généralement lié aux zones de contraintes engendrées par la tectonique des plaques. Les roches types sont les micaschistes et les gneiss.

I.2.3. Les matériaux sédimentaires meubles

Les roches sédimentaires se forment à la surface de la terre en conditions continentales (lacs, fleuves, rivières, eau douce) ou marines (lagunes, mer, océan) et au contact très souvent du milieu vivant (d'où la présence possible de fossiles)... Elles se forment par accumulation de sédiments ou d'organismes :

Matériaux et substances issus de l'érosion des roches affleurant à la surface de la terre.

L'érosion fait naître des morceaux, des grains (sables, graviers,...), des particules fines (argiles) et des substances dissoutes (calcaires, gypse, roches salines).

Les roches sédimentaires meubles peuvent avoir deux origines :

- ❖ Les roches détritiques non consolidées qui résultent de l'accumulation de débris hérités d'autres roches sans cimentation ultérieure. Il s'agit notamment des gisements de sables anciens ou des alluvions plus récents.
- ❖ Les roches résiduelles qui sont les roches qui restent sur place une fois subis les phénomènes d'érosion et/ou d'altération. Il s'agit, par exemple, des arènes granitiques qui font suite à une altération des granites.

I.3. CARRIERES

La carrière est un lieu d'où sont extraits des matériaux qui par leur nature géologique, leurs caractéristiques géotechniques, leur composition minéralogique sont valorisés pour répondre aux besoins liés à l'aménagement de notre cadre de vie (construction de routes et d'infrastructures linéaires diverses, ouvrages d'art, logements individuels et bâtiments collectifs, etc.). Leur finalité est la production de granulats.

On distingue en général trois types de carrières en fonction des techniques d'extraction et de l'utilisation des matériaux.

- Les carrières de roches massives
- Les carrières de roches meubles
- Les carrières de pierres de taille

I.3.1. Les carrières de roches massives

Elles correspondent à l'exploitation de matériaux de trois origines différentes :

- Les matériaux éruptifs
- Les matériaux métamorphiques
- Les matériaux sédimentaires massifs ou consolidés

Elles présentent une zone d'extraction dont la configuration dépend à la fois du gisement exploité et du relief des terrains concernés, une zone dite de traitement où les matériaux extraits font l'objet d'un traitement physique par concassage et criblage de manière à obtenir les granulats des zones annexes de stockage (découverte et granulats).

I.3.2. Les carrières de roches meubles

Elles correspondent à l'exploitation de matériaux sédimentaires détritiques non consolidés de trois origines différentes

- les matériaux détritiques anciens (sables pliocènes), voire plus récents (arènes, granitiques).

- Les matériaux alluvionnaires des rivières ou fleuves
- Les matériaux sableux des plages et dunes littorales

Leur finalité est la production de granulats.

Elles présentent une zone d'extraction dont la configuration dépend essentiellement de la présence ou non d'eau, une zone dite de traitement où les matériaux extraits font

l'objet d'un traitement physique par criblage et lavage le plus souvent, de manière à obtenir des granulats.

I.3.3. Les carrières de pierres de taille

Elles correspondent à l'exploitation de matériaux de deux origines différentes :

- Les matériaux éruptifs (granite).
- Les matériaux métamorphiques (marbres).

Leur finalité est la production de blocs destinés ensuite au façonnage en usines pour fabriquer des produits pour l'art funéraire, le bâtiment, la voirie ou encore la décoration.

Elles présentent une zone d'extraction dont la configuration dépend à la fois du gisement exploité et du relief des terrains concernés des zones annexes de stockage (découverte, rebuts d'exploitation).

I.4. EXPLOITATION DES CARRIERES.

La figure ci après représente la chaîne d'élaboration des granulats en carrière.

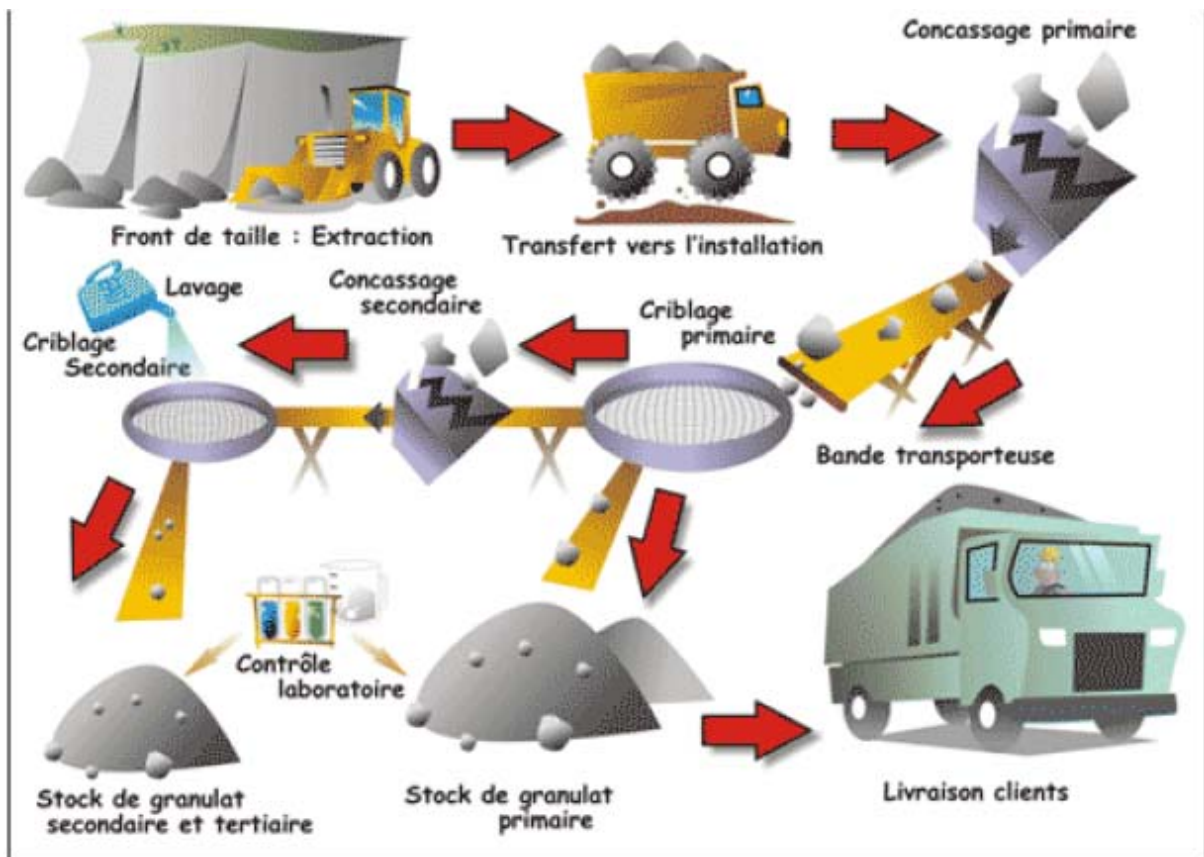


Figure I.1. Schéma simplifié d'une exploitation

I.4.1. L'extraction

L'extraction dépend du type de gisement, on distingue en général 3 cas :

I.4.1.1. Gisements alluvionnaires

En site terrestre (milieu sec) : Quand le gisement alluvionnaire se situe au niveau de l'eau (nappe phréatique, eau de la rivière,...), on exploite directement les matériaux avec les engins adaptés aux gisements tels que des pelles ou des chargeuses ; l'extraction peut avoir lieu en fouille (par le haut) ou en butte (par le bas) avec une progression latérale du front de taille.

L'extraction s'effectuera hors d'eau au chargeur sur pneus, par gradins d'une hauteur maximale de 10 m, un mètre au minimum de matériaux alluvionnaires seront laissés en place au-dessus du niveau de la nappe.

Les matériaux extraits seront chargés sur un dumper qui acheminera le tout-venant jusqu'à l'installation de traitement située à proximité.

La photographie I.1 nous montre un cite d'extraction.



Photo I.1.: Extraction par gradin.

En site immergé (milieu hydraulique, niveau de la nappe phréatique supérieur à celui du toit) ; il peut être possible, lorsque les caractéristiques du gisement le permettent, (mur imperméable, (argile, marnes) matériaux à faible transmissivité), de procéder économiquement à un rabattement de la nappe total du site, le gisement totalement inondé est alors exploitable comme un gisement terrestre avec tous les avantages que cela implique, les matériaux sont extraits à la pelle hydraulique.

Dans la négative deux cas se présentent ;

- Si le niveau de la nappe se situe au maximum à 8 mètres au dessus du mur, l'engin d'extraction flottant couramment utilisé est la drague à godet lorsque le tirant est suffisant (> 3 mètres).
- Si le niveau de la nappe se situe à plus de 8 mètres au dessus du mur, on utilisera préférentiellement dans ce type de gisement des engins d'extraction flottant du type drague suceuse ou drague à grappin [1].



Photo I.2. Extraction des granulats alluvionnaires.

I.4.1.2. Gisements massifs

Il correspond à des situations géologiques très différentes : roches éruptives, métamorphiques ou sédimentaires consolidées, de sorte que l'extraction peut se faire dans

des situations géographiques diverses (plaine, plateau, montagne...) par puits ou à flanc de coteau. Toute extraction se fait alors à sec.

La roche saine d'un site d'extraction n'est accessible qu'après décapage de la couche de terre végétale et de la roche altérée dont l'épaisseur variable peut atteindre une dizaine de mètres. On procédera alors durant cette phase au :

- Décapage de la terre végétale et stockage pour réutilisation ultérieure (réhabilitation du site ou réaménagement partiel).
- Extraction des roches altérées éventuellement fragmentées à l'explosif, qui sont intégrées dans les réaménagements du site, ou stockées, ou commercialisées si débouchés (remblais, couches de fondation).

Une fois la roche atteinte, on procédera à l'opération d'abattage qui consistera à détacher du massif rocheux par tir de mine un volume de matériaux fragmentés avec une blocométrie adaptée à l'exploitation, les plus gros blocs de taille variable pouvant dépasser 1 mètre dans leur plus grande dimension.

Trois opérations sont faites durant cette étape.



Photo I.3. Installation des explosifs

- Implantation des trous de foration : selon le profil du front de taille, les trous à forer sont positionnés en 3D après un relevé précis pour optimiser le positionnement des charges explosives.
- Foration : c'est la réalisation des trous suivant les paramètres définis en foration et dans un diamètre choisi en fonction des volumes à abattre et de la blocométrie voulue.
- Tir : après chargement des explosifs par pompage et déversement dans les forages, et amorçage méthodique défini dans un plan de tir étudié, le tir permet de réduire la roche en fragments. Il est exécuté de façon à limiter les nuisances (vibrations) aux abords de l'exploitation [35].

Quelle que soit la qualité de la préparation du plan de tir et d'exécution du tir l'abattage comportera un certain pourcentage de blocs trop gros pour être manipulés par les engins de chargement ou accepté par le concasseur primaire de l'usine.

Plusieurs techniques sont employées pour le fractionnement complémentaire à savoir ;

- Le pétardage qui consiste à l'emploi d'explosifs en petites charges dans le cas de blocs peu nombreux ou très résistants.
- La chute des masses qui consiste à lâcher une masse en acier pesant plusieurs centaines de kilos soulevée par une grue ou une pelle équipée d'une flèche et d'un câble, à une certaine hauteur (5 à 15 mètres) et la relâchée pour qu'elle tombe sur le bloc.
- Le marteau brise bloc : se sont des marteaux hydrauliques lourds (1 tonne ou plus) fixes sur la flèche d'une pelle hydraulique et le brisant par percussion[1].



Photo I.4. Explosion sur un front.



Photo I.5. Chargement pour le traitement en usine.

I.4.1.3. Gisements marins.

Ayant une origine géologique le plus souvent identique à celle des matériaux alluvionnaires terrestres, les granulats entrent dans le cadre normatif commun à l'ensemble des granulats. L'extraction des granulats marins au sein d'un écosystème fragile implique de nombreuses précautions et l'utilisation de technique en constante évolution.



Photo I.6 : Gisement marin.

Les gisements sont extraits à points fixes ou à l'avancement, à l'aide d'élinde traînante permettant l'exploitation des gisements moins épais et de plus grandes surfaces.

Les systèmes de localisations traditionnelles ou par satellite assurent un positionnement très précis, garantissant une exploitation optimale du gisement.

Les dragues assurent le transport entre le gisement et le port ce qui permet aux exploitants une grande autonomie pour satisfaire des marchés géographiquement variés.

I.5. PRODUCTION DE GRANULATS

Petit morceau de roches destiné à réaliser des ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment, d'une taille comprise entre 0 et 125 mm, le granulat est après l'eau le produit naturel le plus consommé et est considéré comme l'or noir de la construction.

Le granulat est un produit de première nécessité dont l'approvisionnement doit être assuré durablement pour les générations futures.

L'élaboration des granulats de roches massives se fait après un emploi maîtrisé d'explosifs pour détacher la roche de son massif et la fragmenter au maximum. Ensuite nous assisterons à une succession d'opérations automatisées de concassage, criblage et lavage permettant d'obtenir une gamme de granulats de différents calibres (granulométries) répondant aux diverses utilisations, jusqu'au plus petit "grain de sable".

L'élaboration des granulats de roches meubles - familièrement appelés granulats roulés ne nécessite pas l'emploi d'explosifs et très peu de concassage. Par contre, leur lavage pour les débarrasser de la gangue argileuse qui les enrobe est une opération essentielle.

Des granulats sont également élaborés à partir de gisements marins "dragués" au moyen de navires sabliers ou encore par recyclage des bétons de démolition.

La fabrication des granulats se fait en 2 phases :

1) la production brute : concassage et broyage, séchage, criblage, scalpage, tamisage et lavage de façon à obtenir la granulométrie et la propreté voulues.

2) l'amélioration des qualités par d'autres traitements, comme la séparation en milieu dense ou par différence de densité, la classification dans un courant vertical et le broyage.

Les étapes de la production brute sont les suivantes :

- Le marinage
- Le concassage

- Le broyage
- Le lavage
- Le criblage
- Le contrôle de qualité

Nous allons passer brièvement sur chacune de ces étapes :

I.5.1. Le marinage

Les opérations précédentes ont disposées, au pied du front de taille une butte d'abattage composé de fragment plus ou moins gros de la roche abattue.

La dimension des fragments varie de 0mm à 1000mm ou 2000mm.

Les matériaux abattus sont chargés dans des camions (dumpers) qui déversent ensuite leur chargement dans le concasseur primaire. Le transport du front de taille aux concasseurs s'effectue dans le respect le plus strict des normes de sécurité [1].



Photo I.7. Chargement d'un Tombereau pour l'usine.

I.5.2. Le concassage et le broyage

Le concassage est la division des matières dures en fragments grossiers, le broyage est la réduction d'une matière en fragments plus fins.

A l'heure actuelle, le concassage et le broyage sont deux fonctions essentielles dans le traitement de l'ensemble des roches, quelle que soit leur destination et en particulier pour la production de granulats.

- ❖ Concassage primaire : il réduit les matériaux à une taille maximale de 250 mm.
- ❖ Concassage secondaire : les concasseurs secondaires sont des appareils destinés à prendre les matériaux préconcassés à l'étage primaire afin de les ramener à une dimension admissible pour les appareils finisseurs 60mm(maximum).

La plupart du temps, ils ne sont pas utilisés pour fabriquer des matériaux finis, sauf pour le ballast [1].

- ❖ Concassage tertiaire : il permet de traiter des matériaux durs et abrasifs, en particulier pour obtenir des gravillons de bonne cubité nous avons recours à eux. En effet ils sont capables de traiter des débits importants avec un rapport de réduction satisfaisant et une usure relativement modique même avec des matériaux à fort pourcentage de silice. Ils réduisent les matériaux à une dimension maximale de 20 mm.

On distingue 2 types de concasseurs tertiaires :

- a) Les concasseurs à mâchoires sont conçus pour des matériaux durs et abrasifs.
- b) Les concasseurs à percussion sont conçus pour des matériaux plus tendres et peu abrasifs.



Photo I.8.

a) Concasseurs à mâchoires

b) Concasseurs à percussion



Photo I.9 : Broyeur pour broyage secondaire et tertiaire

Il peut y avoir un concassage quaternaire par recyclage à l'étage tertiaire de certains matériaux déjà concassés afin de réduire encore leur taille [1].

I.5.3. Le criblage

Le criblage est une opération qui revient à séparer un ensemble d'éléments granulaire en deux sous ensembles, les plus gros et les plus fins qu'une dimension déterminée.

Le criblage est la présentation des grains sur des surfaces perforées qui laissent passer tout ce qui est inférieur à l'ouverture de la perforation et retiennent ce qui lui est supérieur.

Lorsque le matériau provenant du front de taille, parvient au départ de l'installation de préparation des granulats, on a souvent intérêt à procéder à des éliminations. Suivant les cas ces éliminations peuvent avoir des buts différents, voire opposés.

On peut chercher à éliminer les plus gros éléments qu'il ne serait pas économique de traiter. On peut aussi chercher à éliminer les éléments les plus fins qui contiennent de la terre, des matériaux tendres, etc.

On utilise comme procédé le scalpage, qui est l'élimination avant le débitage d'éléments trop gros pour être économiquement traités par l'installation. Le scalpage est essentiellement pratiqué dans les exploitations de gisements alluvionnaires, où très souvent on élimine les éléments plus gros que 200mm.

Dans le cas d'utilisations routières des granulats produits, ce scalpage peut être fâcheux, car il interdit l'introduction de matériaux qui produiraient des éléments très concassés.

L'élimination peut se faire soit avant le débitage, soit immédiatement après. Dans l'un comme dans l'autre cas il s'agit d'éliminer les matériaux les plus petits qu'une certaine dimension [1].

I.5.4. Le lavage



Photo I.10. Lavage des granulats.

Le traitement de granulats par voie humide vise à améliorer la propreté des granulats.

Le lavage énergique qui élimine les produits polluants et notamment les fines argileuses. La plus grande partie de ces produits est éliminée immédiatement après l'extraction ; mais des traitements ultérieurs sont souvent nécessaires en cours d'élaboration pour affiner la propreté des granulats, gravillons et sables.

Le traitement par voie humide utilise de grandes quantités d'eau qui après traitement sont polluées par des fines ; le recyclage et la clarification des eaux sont donc le plus souvent des opérations complémentaires indispensables.

Les équipements nécessaires doivent tenir compte en amont de la nature des gisements et des pollutions et en aval des qualités exigées pour les matériaux.

Les principales pollutions rencontrées dans le gisement sont :

- La présence de produits enrobant les matériaux sains (argile servant de ciment de conglomerats).

- La présence d'éléments fins (argiles, limons).

- La présence d'impuretés (déchets végétales:herbes, bois, racines,lignites ; déchets animaux: coquillages ; matériaux fragiles,poreux,friables (calcaires tendres),scories,schistes, ardoises.))

L'élaboration d'un schéma de traitement devra, au départ, tenir compte :

- D'une part, de la nature de la pollution ;

- D'autre part, de la quantité de pollution rapportée à la quantité de matériaux à traiter.

Le terme de lavage désigne les actions permettant de détacher, grâce à des moyens mécaniques, hydrauliques ou vibratoires, les éléments fins agglomérés entre eux ou collés à la surface des granulats afin de les éliminer avec l'eau ayant servi à cette action et dans le but de récupérer les granulats égouttés et exempts des éléments nuisibles.

En fonction de l'importance et de la nature de la pollution des matériaux, les actions de lavages peuvent être incorporées à différents niveaux de traitement des matériaux ; elles peuvent être simples, ou complexes avec plusieurs opérations de traitement réalisées par des appareils tels que débourbeur, cellule d'attrition, roue laveuse, cyclone, etc.

Le lavage est une opération qui peut se réaliser aux différents stades des chaînes de traitement du niveau primaire au niveau classification des sables.

Le lavage des matériaux tout-venant après extraction, permet l'élimination de l'essentiel des éléments polluants .Placé en tête de la chaîne de traitement,le lavage assure un approvisionnement des concasseurs et broyeurs en gros matériaux propres,condition indispensable à l'obtention de granulats concassés et broyés de qualité.

Le lavage peut permettre également la revalorisation des matériaux éliminés à l'étage primaire apportant ainsi un accroissement de production qui peut être important.

Le lavage est surtout envisagé dans les installations traitant des produits alluvionnaires qui par essence contiennent des limons.Dans les carrières, une élimination des produits terreux par précriblage avant concasseur primaire ou par post-criblage après concasseur primaire est en général suffisante pour l'obtention de produits propres. A l'extrême limite on peut envisager un lavage sur crible.

Dans les ballastières un tel lavage est souvent insuffisant. Il faut prévoir le lavage dans un poste spécial utilisant des laveurs débourbeurs [1].

I.5.5. Le stockage

Lors de la production de granulats deux stockages différents sont nécessaires :

Stock tampon entre l'exploitation du gisement et l'usine d'élaboration, le stock primaire est la source de matière première de cette usine d'élaboration qui peut, grâce à lui, fonctionner de manière aussi continue que possible. L'alimentation de ce stock et sa reprise ne peuvent se faire que par des manutentions dont l'étude est liée à celle du stock car elles présentent quelques caractères particuliers.

En fin de production, il faut stocker les produits finis ; là encore cette opération de stockage est liée à des manutentions.

Dans le cadre des installations qui nous intéressent, c'est-à-dire pour la préparation des granulats, destinés aux chantiers de travaux publics et du bâtiment, la manutention continue est une opération qui consiste, à l'aide d'appareils mécaniques, à assurer d'une façon continue le déplacement des produits en vrac, depuis un point jusqu'à un autre.

Il constitue une part élevée de l'investissement global, et il doit être fiable comme le broyeur ou comme le crible, pour ne pas provoquer l'arrêt de la production.

La manutention peut se faire par des appareils à bande transporteuse, qui n'est pas le seul engin de transport continu, car la goulotte peut faire cet office.

Il faut cependant remarquer que dans ce cas, on est obligé d'utiliser comme force motrice la pesanteur et que par conséquent l'utilisation généralisée de goulottes nécessite d'étaler l'installation sur une dénivellation, sauf si on utilise des transporteurs à bandes pour remonter les matériaux.

Il est utile et peut sembler indispensable d'avoir entre les différents stades de préparations de matériaux des stocks tampons, à partir desquels on règle le débit pour chacun des appareils en aval.

De cette façon, pour un investissement donné, on parvient à une plus grande régularité et à une moindre consommation d'énergie.

Il serait cependant excessif de prévoir à l'amont de chaque appareil, un stock tampon susceptible d'amortir les variations de débit des appareils d'amont et il est bien clair que l'on doit diviser l'usine en stades importants. La plus importante de ces divisions est celle qui distingue le poste primaire et l'usine d'élaboration avec entre ces deux stades le stock primaire.

Les stocks de produits finis doivent permettre de continuer la fabrication même s'il y a interruption dans l'évacuation des matériaux.

On a l'habitude de parler de trémies de stockage lorsque la section du récipient est carrée ou rectangulaire, et de parler de silos de stockage lorsque cette même section est circulaire.

Pour les trémies d'une capacité supérieur à 40m^3 , et jusqu'à 200m^3 par cellule, le poids de métal nécessaire est en général de l'ordre de 140 à 150 kg /m^3 de matériau logé, ceci pour des constructions en tôles se répartissent respectivement entre les zones verticales supérieures les zones intermédiaires et les zones inclinées. Les silos à section circulaire ont pour avantage de nécessiter pour leur construction moins de métal pour des capacités identiques.

Les stocks aux sols supposent que l'on apporte beaucoup de soin à la préparation des aires de stockage.

Afin d'éviter la pollution, le sol naturel sera décapé et une couche de matériaux intermédiaires sera déposée et soigneusement compactée ; la meilleure solution consiste bien entendu à réaliser une Chappe de béton ou en enrobé surtout si les matériaux doivent être repris à la chargeuse dans leur intégralité.

Mais le type de stockage le plus employé dans les carrières est le stock au sol et l'alimentation se fait grâce à des transporteurs qui élèvent le matériau au dessus du tas [1].

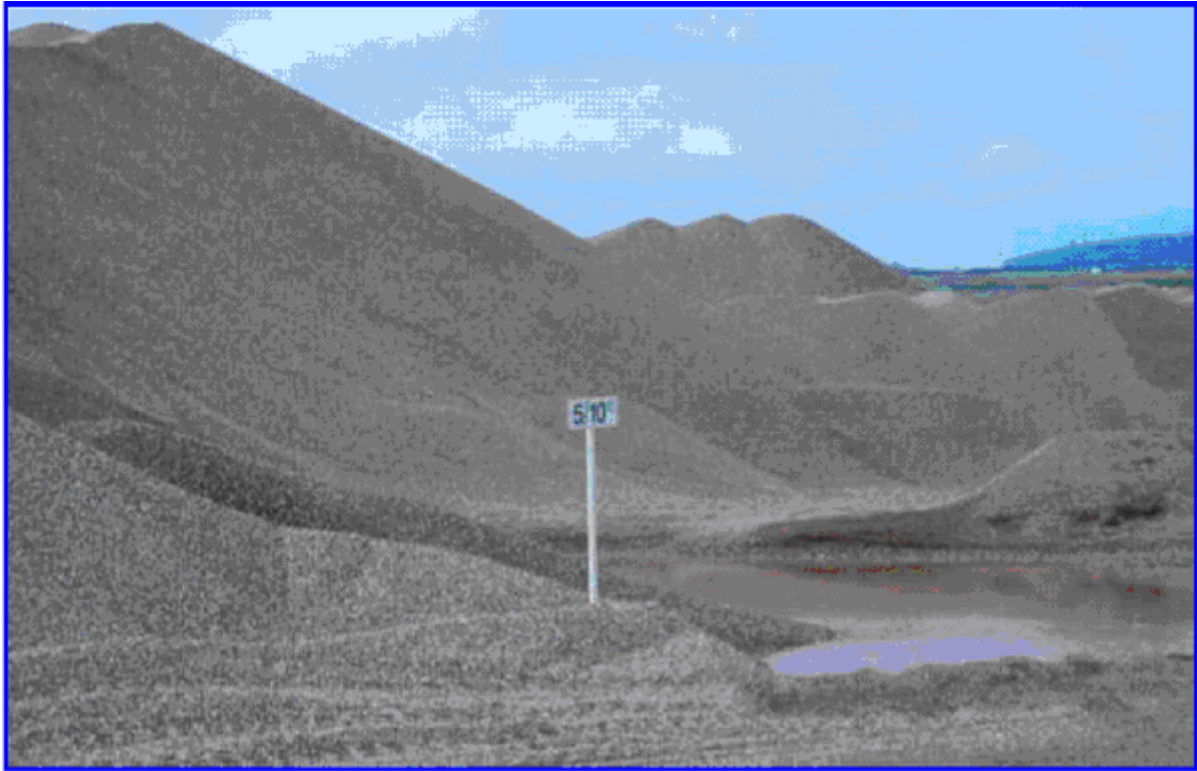


Photo I-11 : stockage de granulats.

I.5.6. Le contrôle de qualité

Tout au long du processus de fabrication, on procède à des opérations régulières de contrôle de qualité portant sur différents paramètres (dureté, calibrage, propreté, respect des normes,...).

La qualité des granulats a une forte influence sur le bon comportement des principaux matériaux mis en œuvres dans le génie civil.

Le contrôle de production s'appuie nécessairement sur une bonne connaissance du gisement et de l'installation. Il faut avoir décelé les caractéristiques du gisement et du matériel qui peuvent varier en cours d'exploitation et influencer sur la qualité des granulats produits.

L'exploitation du gisement doit être guidée par une carte géotechnique. Dans les carrières de roches massives, la carte géotechnique de la carrière comprend un découpage des fronts de taille en zones différenciées par les difficultés que leur exploitation peut apporter dans l'obtention de produits finis corrects.

Le réglage de l'installation doit être guidé par un schéma de l'installation représentant :

- Les postes de fabrication ;
- Les matériels composant les différents postes ;

- Les liaisons entre les postes et les matériels ;

On doit établir une fiche technique sur les appareils indiquant leur capacité, leur performance suivant leur mode d'alimentation et leur comportement dans le temps.

L'optimisation du fonctionnement de la carrière et l'obtention de la qualité dans une carrière ne sont pas forcements antinomiques.

Il convient de s'assurer que les choix qui ont été faits pour optimiser le fonctionnement de l'installation conservent au cours du temps leur raison d'être car la loi du plus fort débit n'est pas toujours la meilleure. Des méthodes de surveillance systématique doivent être mises en place à l'extraction et l'installation.

Il s'agit en fait de surveiller en particulier les points sensibles de l'installation que constituent les postes de la fabrication, les éléments ou les machines de ces postes dont les modifications des réglages créent une hétérogénéité dans la fourniture.

Le contrôle de conformité porté sur les granulats produits soit avant leur expédition, soit après leur livraison sur l'aire de stockage du chantier.

Ce contrôle consiste à effectuer des prélèvements et des analyses pour apprécier avec suffisamment de précision que les granulats d'un lot bien défini sont conformes aux spécifications.

Enfin, lorsque le débit de la carrière est important, l'appréciation de la qualité de la fourniture doit être faite rapidement car il ne faut attendre que plusieurs centaines de tonnes ne répondant pas aux spécifications soient produites pour intervenir. Par voies de conséquence étant donné le temps nécessaire à la préparation et à l'exécution des essais, leur nombre doit être limité [1].

I.6. CONCLUSION

Le granulat est un produit de première nécessité dont l'approvisionnement doit être assuré durablement pour les générations futures. Ceci entraîne des nombreuses interactions entre les carrières et l'environnement. Les carrières sont le plus souvent ressenties par le grand public au travers des atteintes qu'elles portent à l'environnement par suite des différentes nuisances et des bouleversements des sols qu'elles engendrent, raison pour laquelle l'exercice de l'activité d'exploitation de carrière doit être soumise à la réglementation [1].

ESSAIS SUR LES GRANULATS

II.1. INTRODUCTION

Les granulats sont le constituant de base de tous travaux de Génie Civil, Il est donc important de maîtriser l'ensemble de leurs propriétés.

Dans le présent chapitre nous allons présentés les différent essais caractérisant les granulats.

II.2. ESSAIS CARACTERISANT LES PROPRIETES DE LA FABRICATION

II.2.1. L'analyse granulométrique par tamisage[NF P94-057]

L'essai consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant une classe granulaire dont les dimensions sont comprises entre 0,08 et 125 mm, a l'aide d'une grille de tamis de tailles normalisées.

On appelle :

- ❖ REFUS sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur se dernier.
- ❖ TAMISAT (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

L'échantillon, de masse humide (M_h) supérieure à 400ϕ (avec ϕ le diamètre du plus gros grain exprimé en mm et la masse obtenue en grammes), est lavé puis séché a l'étuve a 105°C .

Le tamisage peut se faire au moyen d'une tamiseuse ou bien manuellement, une fois l'opération terminé on pèse les refus cumulés pour chaque tamis à 1 g près et on calcule le pourcentage de tamisât cumulé sur les différents tamis.



Figure II.1. Analyse granulométrique.

II.2.2. l'analyse granulométrique par sédimentométrie

La sédimentométrie complète l'analyse granulométrique par tamisage; elle donne la répartition des grains inférieurs à 0,1 mm.

Cette méthode est basée sur la loi de STOKES qui donne une relation entre la vitesse de décantation d'une particule sphérique dans un liquide et le diamètre de cette particule.

II.2.3. Coefficient d'aplatissement [NFP18-561]

Selon leur origine, leur nature et leur mode d'élaboration, les granulats peuvent avoir des formes sphériques, cubiques, nodulaires, plates ou allongées.

Ces caractéristiques, ainsi que l'état de surface des grains influent l'aptitude à la mise en place du béton frais, sa tenue au démoulage immédiat et la résistance mécanique du béton durci, à la compacité des remblais et couches de forme, à la rugosité des couches de roulement, l'adhérence avec les liants bitumineux etc.

La forme d'un granulats est définie par trois dimension principales :

- La longueur (L) : le plus grand écartement d'un couple de plans tangents parallèles,
- L'épaisseur (E) : le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles
- La grosseur (G) : dimension de la maille carrée minimale à travers laquelle passe l'élément.

Le coefficient d'aplatissement des granulats permet de caractériser la forme des granulats dont la dimension est comprise entre 4 et 80 mm et de suivre la régularité des fournitures de gravillons.

Un gravillon de forme défavorable (plate ou allongée) présente un coefficient d'aplatissement élevé (20 à 40 %).

Un gravillon de forme favorable (sphérique, cubique, nodulaire) présente un coefficient d'aplatissement généralement compris entre 5 et 20 %.

L'essai consiste à effectuer deux tamisages successifs :

- un tamisage sur tamis à mailles carrées qui permet de classer l'échantillon en différentes classes granulaires d/D (d étant la dimension des plus petits éléments en mm, D étant la dimension des plus gros éléments en mm.
- un tamisage des différentes classes granulaires d/D , sur des grilles à fentes parallèles d'écartement : $D/2$.

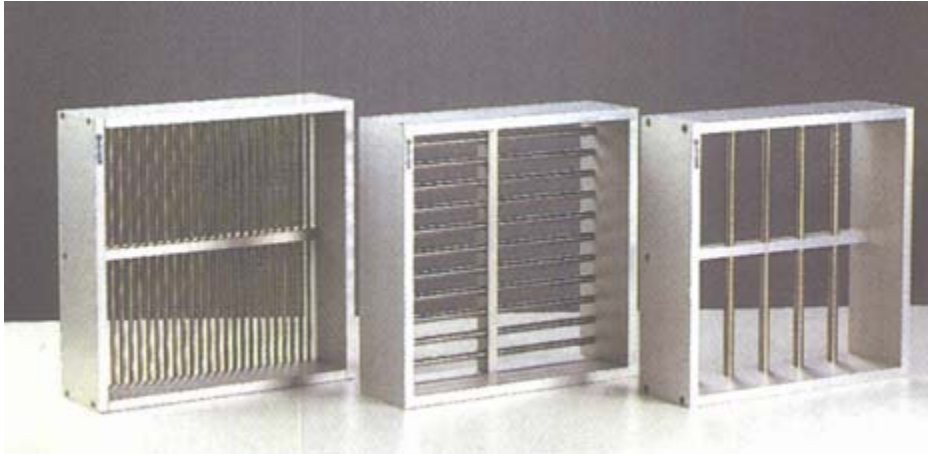


Figure II.2. Grilles pour coefficient d'aplatissement

II.2. 4. La propreté superficielle des granulats

La propreté des granulats se traduit par l'absence d'éléments fins, provenant de la pollution du gisement, du concassage des roches, de la mise en stock ou lors du transport des granulats.

La qualité des granulats utilisés dans les bétons hydrauliques ou bitumineux est un facteur très important : en plus d'une bonne répartition granulairé et d'une forme favorable, un granulat doit présenter une propreté satisfaisante.

En effet, si les granulats sont enrobés par une quantité excessive d'éléments fins, généralement argileux, ceux-ci empêchent une bonne adhérence (adhésivité) de la pâte liante, entraînant ainsi une chute des résistances mécaniques et des variations de propriétés rhéologiques des mélanges.

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules de dimensions inférieures à 0.5mm adhérentes à la surface ou mélangées à un granulat de dimension supérieure à 2 mm.

Les éléments fins contenus dans le granulat à tester sont séparés par lavage sur un tamis d'ouverture 0.5 mm. Leur pourcentage est déterminé par pesées après séchage du refus.

II.3. ESSAIS CARACTERISANT LES PROPRIETES INTRINSEQUES

II.3.1 La résistance aux chocs : essai los Angeles [NFP 18-573]

Cet essai a pour but de mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite par fragmentation, en soumettant le matériau à des chocs de boulets à l'intérieur d'un cylindre en rotation.

L'essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau à une série de chocs et de frottements dans la machine Los Angeles.

A un coefficient Los Angeles faible correspond un excellent matériau.

Dans la machine Los Angeles, introduire avec précaution la prise d'essai $M = 5000$ g et la charge de boulets de la classe granulaire choisie. Après 500 rotations de la machine, à une vitesse régulière comprise entre 30 et 33 tr/min, recueillir le granulat et le tamiser à 1.6 mm, peser le refus, soit m le résultat de la pesée.

Le passant au tamis de 1.6 mm sera $p = 5000 - m$.

Par définition, le coefficient Los Angeles est le rapport de la masse m par M multiplié par cent.



Figure II.3 Machine Los Angeles.

Tableau II.1. Nombre de boulets en fonction des classes granulaires.

Classe granulaires	4-6.3	6.3-10	10-14	10-25	16-31	25-50
Nombre de boulets	7	9	11	11	12	12

II.3.2. La résistance a l'usure essai Micro DevalNFP 18-572

Cet essai permet de mesurer la résistance à l'usure par frottements entre les granulats et une charge abrasive.

Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite dans un broyeur, dans des conditions bien définies, à sec ou en présence d'eau.

Tableau II.2. Charge abrasive fonction des classes granulaires.

Classe granulaire	4-6.3	6.3-10	10-14
Charge abrasives (g)	2000± 5	4000± 5	5000± 5



Figure II.4 Machine Micro Deval.

Dans les cylindres de la machine, introduire chaque prise d'essai $M = 500$ g et la charge abrasive (billes en acier de 10mm de diamètre) correspondant à la classe granulaire choisie. Les essais peuvent s'effectuer à sec ou humide, Dans ce dernier cas, on ajoutera 2.5 litres d'eau par essai.

Après rotation des cylindres à une vitesse de 100 tr/min pendant deux heures, tamiser le matériau sur le tamis de 1.6 mm et peser le refus. Soit m le résultat de la pesée, le passant

au tamis de 1.6 mm sera $p = 500 - m$. Par définition, le coefficient micro-Deval est le rapport : m par M multiplié par cent.

II.3.3. La fragmentation dynamique [NFP 18-574]

L'essai permet de mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un granulat. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée. Cette quantité est appelée coefficient de fragmentation dynamique. Cet essai a été conçu de manière à trouver, sur un même matériau, un résultat aussi proche que possible du coefficient Los Angeles, le processus d'évolution des granulats étant le même dans les deux essais.

Introduire la prise d'essai $M = 350$ g, donner le nombre de coups de masse correspondant à la classe granulaire choisie. Recueillir et tamiser après l'essai sur le tamis de 1.6 mm, peser le refus. Soit m le résultat de la pesée, le passant au tamis de 1.6 mm sera $p = 350 - m$.

Par définition, le coefficient de fragmentation dynamique est le rapport : m par M multiplié par cent.

Tableau II.3. Nombre de coups en fonction des classes granulaires.

Classe granulaire	4-6.3	6.3-10	10-14
Nombre de coups de la masse	16	22	28



Figure II.5. Machine pour la fragmentation dynamique.

II.4. ESSAIS CARACTERISANT LE SABLE

II.4.1. L'équivalent de sable [NFP 18-597]

L'équivalent de sable est un rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres. Il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique.

L'essai d'équivalent de sable rend compte globalement de la quantité des éléments les plus fins contenus dans les granulats, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments plus fins (argile par exemple).

- ❖ Les éléments sableux sont les éléments grenus et non floculables qui sédimentent dans le fond de l'éprouvette.
- ❖ Les éléments fins sont les éléments formant le floculat, qui restent en suspension dans la solution

L'essai consiste à faire floculer les éléments fins d'un sable mis en suspension dans une solution lavante puis, après un temps de mise au repos donné, à mesurer la hauteur des éléments sédimentés. Il est effectué sur la fraction du sable passant au tamis à mailles carrées de 2 mm (il peut être réalisé sur la fraction 0/4).

L'équivalent de sable (SE) est le rapport multiplié par 100 de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du floculat et de la partie sableuse sédimentée.

C'est désormais l'essai pris en référence dans l'ensemble des nouveaux textes normatifs.

II.4.2. L'essai au bleu de méthylène [EN 933-8]

Cet essai permet contrairement à l'ES de faire la distinction entre les différents types d'argile contenus dans un sable. Le bleu de méthylène étant absorbé préférentiellement par les argiles du type Montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques, les autres argiles (Illites et Kaolinites) sont peu sensibles au bleu.

L'essai au bleu de méthylène est pratiqué sur la fraction granulaire 0/2 mm des sables courants ou sur les fillers (0/0.125 mm) contenus dans un sable, un gravillon ou un tout venant.

Il a pour but de révéler la présence de fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration. Il est généralement effectué après un essai de propreté des sables ou des gravillons lorsque le résultat de celui-ci est inférieur aux spécifications exigées.

On appelle valeur de bleu VB d'un sable, la quantité en gramme de bleu de méthylène adsorbée par 1 kg de fraction 0/2 mm du sable.

On appelle valeur de bleu des fillers VBF la quantité en gramme de bleu de méthylène adsorbée par 1 kg de fraction 0/0.125 mm d'un granulat (fillers, sable, tout venant, gravillon).

II.4.3. La friabilité des sables [NFP 18-576]

L'essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique d'une fraction de 500 g sable (coupure 0.2/2 ou 0.2/4 mm) produite par fragmentation dans un cylindre en rotation (Micro-Deval à 100 tr/min pendant 15 min) à l'aide d'une charge (2500 g \pm 4) et en présence d'eau (2.5 L).

L'évolution granulométrique est caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0.1 mm produits au cours de l'essai.

II.5. CONCLUSION

Les essais énumérés sont importants pour les granulats routiers. En effet, le passage répété de véhicules conduit à affaiblir, à polir progressivement les granulats et ainsi à diminuer l'adhérence des pneumatiques sur la chaussée.

Ces caractéristiques permettent également d'estimer la qualité des granulats utilisés dans la confection des bétons.

**NORMALISATION ROUTIERE EN MATIERE
DE GRANULATS**

III.1 INTRODUCTION

Tout secteur d'activité de construction bâtiments ou de travaux publics est régit par des normes spécifiques aux matériaux utilisés dans celui ci.

Le secteur des travaux publics est un secteur très sensible ou les exigences des normes doivent être respectées pour assuré la durabilité des ouvrages construits.

Nous allons dans le présent chapitre nous intéressés aux normes routières concernant les granulats pour enrobé.

III.2. LES DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS

Les roches susceptibles de produire des granulats sont, par définition, des cas géologiques particuliers. Or, d'une région à l'autre, leur nature ou leurs conditions de gisement peuvent être radicalement différentes. On distingue traditionnellement trois grandes catégories de granulats en fonction de leur origine géologique.

III.2.1 Classement selon l'origine de la roche

III.2.1.1. Les granulats alluvionnaires

Ce type contient les granulats issus des roches qui tapissent les fonds des Vallées, Cette ressource présente un caractère meuble, et donc facile à extraire. C'est la ressource la plus couramment exploitée.

A ce stade, il est utile de souligner que dans certaines régions de pays industrialisés, ces matériaux ont été exploités de longue date et les réserves tendent aujourd'hui à s'épuiser.

III.2.1.2. Granulats issus de roches massives

a) Granulats issus de roches massives siliceuses ou silicatées

Appelé aussi roches éruptives, l'origine de ces roches peut être liée au refroidissement de magmas issus des couches internes du globe (granites, diorites, basaltes,...), ou de la transformation dans les profondeurs de la croûte terrestres de roches d'origines plus superficielles (gneiss, quartzites, ...). Dans la plupart des cas, il s'agit de roches dures profondément enracinées sous le sol et d'aspect massif. Ce type de roche n'affleure que dans des zones géologiques bien définies, qui sont soit les « massifs cristallins », traces d'anciennes montagnes arasées au cours des ères géologiques, soit les zones volcaniques.

De plus, la compacité de ces roches en fait un matériau difficile à travailler, dont l'extraction nécessite de l'explosif, et la réduction granulométrique d'importants moyens mécaniques. Si les conditions de gisement et d'exploitation de ces matériaux en font une ressource moins

universelle que la première, les performances des granulats qui en sont issus sont excellentes et en font un matériau de premier choix.

b) Granulats issue des roches massives calcaires

Hormis leur composition minéralogique, qui leur confère quelques propriétés différentes des « éruptives » et peuvent notamment les exclure de certains usages, ces roches se distinguent des précédentes par leurs conditions de gisement. Formées dans des mers, lacs ou lagunes, elles sont généralement incluses dans des séries sédimentaires épaisses, et localisées dans des bassins bien définis. Il s'agit donc aussi d'une ressource moins répandue que les granulats alluvionnaires.

III.2.2. Classement selon l'utilisation

III.2.2.1. Granulats recyclés

Issus de la démolition d'ouvrages antérieures ou de processus d'élaboration de l'industrie lourde, leurs gisements sont par définition localisés soit à proximité de zones urbanisées où ont lieu la majorité des démolitions, soit dans les gros pôles industriels. La volonté d'utiliser de tels matériaux en génie civil est plus souvent motivée par le souci d'éviter une mise en décharge que par la qualité réelle des granulats qui en sont issus, celle-ci s'avérant très variable en fonction de l'origine de la ressource.

De plus, la quantité disponible de ces matériaux est relativement marginale par rapport aux besoins globaux en granulats.

Cette ressource n'est pas encore exploitée en Algérie.

III.2.2.2. Granulats de laitier

Après séparation avec la fonte, plus lourde, le laitier de haut fourneau est dirigé par une rigole vers des fosses où il va refroidir à l'air et se cristalliser sous forme de roche. Après le début de la solidification, le laitier est arrosé afin d'en abaisser la température et de le fragmenter. On obtient ainsi du laitier cristallisé brut, qui peut alors être concassé et criblé (comme dans une carrière) pour produire des granulats.

La granulométrie du laitier cristallisé brut est de l'ordre de 0/300mm. Après concassage-criblage, on obtient des granulats présentant un très bon coefficient de forme, essentiellement " cubique ", les éléments plats ou longs étant généralement en quantité inférieure à 2%.

Les usages du laitier cristallisé sont généralement ceux des roches naturelles de mêmes caractéristiques physico-chimiques : ballasts, granulats pour bétons, pour enrobés bitumineux, pour graves traitées au liant hydraulique, ballast, etc. Ils sont couverts par les mêmes normes "granulats", françaises et européennes



Figure III.1. Granulats du laitier.

III.2.2.3. Les granulats artificiels

C'est des granulats d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autres.

Dans cette catégorie se rangent des granulats transformés, comme le schiste expansé, l'argile expansée, mica expansé (vermiculite).

III.2.3 Classement selon la dimension

Les granulats sont classés selon leurs domaines d'utilisation suivant des dimensions précisées par les normes.

Nous distinguons Les classes utilisées pour la fabrication des bétons hydraulique, les classes utilisés pour les enrobés bitumineux (travaux routier) et ballasts utilisés dans les infrastructures ferroviaires.

Les granulats sont répartis selon leurs dimension en calasses granulaires d/D de dimensions inférieure (d) et supérieure (D) des tamis.

On admet que des grains puissent être retenus sur le tamis D et que d'autres puissent passer au travers du tamis d .

Les dimensions d et D sont choisies dans la série suivante :

0 — 0,063 — 0,08 — 0,1 — 0,125 — 0,16 — 0,2 — 0,25 — 0,315 — 0,4 — 0,5 — 0,63 — 0,8 — 1 — 1,25 — 1,6 — 2 — 2,5 — 3,15 — 4 — 5 — 6,3 — 8 — 10 — 12,5 — 14 — 16 — 20 — 25 — 31,5 — 40 — 50 — 63 — 80 — 100 — 125 mm.

On distingue les familles de granulats suivantes :

- fillers 0/D où $D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm ;
- sablons 0/D où $D \leq 1$ mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm ;
- sables 0/D où $1 < D \leq 6,3$ mm ;
- graves 0/D où $D > 6,3$ mm ;
- gravillons d/D où $d \geq 1$ et $D \leq 125$ mm ;
- Ballasts d/D où $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm.

III.3 CARACTERISTIQUES DES GRANULATS

On distingue deux types de caractéristiques des granulats, les caractéristiques de fabrications qui sont résultante des conditions de fabrication, Et les caractéristiques intrinsèques généralement liées à la qualité de la roche exploitée.

III.3.1 les caractéristiques de fabrication

III.3.1.1. La granularité

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Elle conditionne la compacité de l'enrobé bitumineux ainsi que ses caractéristiques mécaniques.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par la vibration de la colonne de tamis.

Pour constituer le squelette granulaire de l'enrobé bitumineux, on mélange les différentes classes granulaires dans une certaine proportion. 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. Pour exemple, la courbe granulométrique des enrobés drainants est fortement discontinue, ce qui permet d'obtenir une porosité élevée après la mise en place.

III.3.1.2. La forme

La forme d'un élément granulométrique définie par le coefficient d'aplatissement qui dépend des trois caractéristiques dimensionnelles principales : l'épaisseur, la grosseur et la longueur.

Les granulats plats ne permettent pas de réaliser des bétons très compacts et, par ailleurs, en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ces éléments ont tendance à prendre une orientation préférentielle proche de l'horizontale selon leurs plus grandes dimensions, ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes.

III.3.1.3. L'angularité

L'angularité est une qualité beaucoup plus fondamentale que la forme. En effet, les éléments qui présentent des faces se coupant avec les angles vifs, augmentent l'angle de frottement interne du matériau et diminuent sa maniabilité ce qui a deux effets opposés : le compactage est plus difficile, mais si on réussit celui-ci, la stabilité est plus élevée.

III.3.1.4. La propreté

Il s'agit de l'absence dans un granulat d'éléments fins indésirable. Ce sont soit des fines plastiques naturelles (argile), soit des fines issues du concassage ou du broyage des roches,

- La présence d'argile autour des grains risque, une fois humide, de leur faire perdre toute stabilité,

La qualité de l'adhésivité du bitume sur le granulat dépend de la propreté de la surface de chaque granulat ; une faible propreté diminue l'adhésivité.

III.3.2. Propriétés intrinsèques

III.3.2.1. Résistance à la fragmentation (chocs)

Elle est mesurée par le coefficient « Los Angeles ». Cette mesure est destinée à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation sous l'action du trafic.

III.3.2.2. Résistance à l'attrition et à l'usure

L'essai utilisé est le Micro Deval à sec ou en présence d'eau. Cette mesure ayant pour objectif de chiffrer l'usure qui se produit d'une part entre les gravillons entre eux même dans une assise et d'autre part entre le pneumatique et le granulat à la surface des revêtements. Comme l'usure est très influencée par la présence d'eau, l'essai le plus représentatif est le Micro Deval en présence d'eau.

III.5. LA CODIFICATION DES GRANULATS

Les granulats sont dits :

- naturels lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique.
- artificiels lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais.
- recyclés lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés ;
- courants lorsque leur masse volumique réelle MVR est supérieure ou égale à 2 t/m^3
- légers lorsque leur masse volumique réelle MVR est inférieure à 2 t/m^3 .

Ils sont désignés par des classe granulaires d/D dans lesquelles d et D représente respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions des grains.

Ces dimensions correspondent à la grosseur des grains déterminée par l'analyse granulométrique.

III.5.1. Codification des granulats en fonction de leurs caractéristiques

Intrinsèques

Les caractéristiques intrinsèques sont liées à la nature du matériau exploité (propriétés mécaniques et chimiques) mesurées sur une classe granulaire définie dans la norme d'essai. Ces caractéristiques sont significatives pour tout granulats de même nature (quelle que soit sa classe granulaire) fabriqué dans une même unité de production.

III.5.1.1. Les gravillons et graves

Les gravillons et graves sont classés en catégories en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques définies par :

- Le coefficient de polissage accéléré noté actuellement PSV (de l'anglais "Polished Stone Value") en remplacement de l'ancienne abréviation CPA (Coefficient de Polissage Accéléré), il est déterminé selon la norme EN 1097-8(NF EN 1097-8).
 - Le coefficient Micro Deval en présence d'eau (MDE) mesuré sur la fraction 10/14 selon NBN EN 1097-1(NF EN 1097-1);

- Le coefficient Los Angeles (LA) mesuré sur la fraction 10/14 selon NBN EN 1097-2(NF EN 1097-2).

Les catégories de gravillons et graves résultants de ces caractéristiques sont décrites dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.1. Codification des caractéristiques intrinsèques des Gravillons.

Code	PSV minimal ²	MDE maximal	LA maximal	MDE + LA maximal	PSV – (MDE + LA) minimal
Aa	50	15	20	25	30
Ab	50	15	20	25	25
Ac	50	15	20	35	15
Ba	50	20	25	30	30
Bb	50	20	25	35	15
Bc	50	20	25	45	5
C	-	25	30	45	-
D	-	30	35	55	-
E	-	35	40	65	-
F	-	-	-	-	-

III.5.1.2. Sables

Le tableau II.2 donne la catégorie des sables de concassage en fonction du PSV de la roche mère déterminée selon la norme NBN EN 1097-8. Ils peuvent être désignés par un des symboles PA ou PB.

Tableau III.2. Codification de PSV de la roche mère des sables

Code	PSV
PA	≥ 50
PB	< 50

III.5.2. Codification des granulats en fonction de leurs Caractéristiques De Fabrication

III.5.2.1. Granularité

Conformément aux normes NBN EN 12620, NBN EN 13043, NBN EN 13139 et NBN EN 13242, le producteur définit la classe granulaire, d/D ou 0/D en fonction du passant à chacun des tamis pour lesquels ces normes définissent des impositions. Le producteur doit indiquer ces passants sur une fiche, Il peut également y renseigner des passants à d'autres tamis. Dans ce cas, le producteur s'engage à respecter ces valeurs déclarées.

III.5.2.2. Teneur en matières organiques

Les granulats doivent être exempts de matières organiques. La présence de matières organiques doit être déterminée conformément à la norme NBN EN 1744-1 (essai à l'hydroxyde de sodium).

III.5.2.3. Degré de concassage des granulats alluvionnaires

La codification des granulats alluvionnaires reprise au tableau 1.3 est fonction de leur proportion maximale en pierres concassées, semi concassées et roulées déterminée selon la norme NBN EN 933-5 et exprimée en %.

Tableau III.3. Codification du degré de concassage des granulats alluvionnaires

Code des granulats alluvionnaires	Catégorie EN	Pourcentage en masse de		
		grains entièrement concassés	grains entièrement concassés ou semi-concassés	grains entièrement roulés
Concassés	C _{100/0}	90 - 100	100	0
Semi-concassés	C _{95/1}	30 - 100	95 - 100	0 - 1
	C _{90/1}	30 - 100	90 - 100	0 - 1
	C _{90/3}	30 - 100	90 - 100	0 - 3
	C _{50/10}	-	50 - 100	0 - 10
	C _{50/30}	-	50 - 100	0 - 30
Semi-roulés	C ₁₅₀	-	-	0 - 50
	C ₁₇₀	-	-	0 - 70
Roulés	C _{Déclaré}	-	-	Valeur déclarée >70

III.5.2.4. Codification des gravillons

Les gravillons sont classés en fonction des paramètres suivants :

- Le coefficient d'aplatissement déterminé selon la norme EN 933-3;
- La teneur en fines déterminée selon la norme EN 933-1.

La codification des gravillons en fonction de ces caractéristiques est donnée aux tableaux III.4 et III.5.

Tableau III.4 : codification du coefficient d'aplatissement des gravillons

Code	Coefficient d'aplatissement maximal		
	$D \leq 6,3$	$6,3 < D \leq 11,2$	$D > 11,2$
I	25	20	15
II	30	25	20
III	35	30	30
IV	50	35	35
V	> 50	> 35	> 35

Tableau III.5 : codification de la teneur en fine des gravillons

Code	Teneur maximale en fines en %
$f_{0,5}$	0,5
f_1	1,0
$f_{1,5}$	1,5
f_2	2,0
f_4	4,0
$f_{\text{Déclaré}}$	Valeur déclarée > 4,0

III.5.2.5. Codification des sables

Selon le degré de concassage les sables se classent en trois groupes :

- Les sables ronds résultant de la désagrégation naturelle de roches généralement siliceuses; ils proviennent notamment de sablières, de gravières, de rivière, de mer;
- Les sables de concassage résultant du concassage de roches (calcaire, grès, porphyre, quartzite, ...) ou de gravier;
- Les sables mixtes résultant du mélange de sable rond et de sable de concassage [33].

III.6. LES FUSEAUX GRANULOMETRIQUES

Les carrières produisant les granulats nous proposent un large éventail de calibres granulaires, mais chaque calibrage granulaire est approprié à un domaine bien précis (travaux routier, construction bâtiments...etc.).

Ceci amène les carrières à utiliser des fuseaux, ces fuseaux sont des intervalles formés par des maximums et des minimums admissibles dans chaque classe granulaire.

La notion de fuseau, bien qu'elle soit appliquée dans ce paragraphe à la granulométrie, doit être étendue à l'ensemble des propriétés des granulats.

III.6.1. Fuseau enveloppe

Il indique l'étendue maximale de variation de la valeur.

III.6.2. Fuseau de spécification

Il indique l'étendue dans laquelle doit se trouver la valeur moyenne. Il est propre à une technique considérée (règles de l'art ou d'usage, norme XPP 18-540, expérience acquise, exigences particulières,...).

III.6.3. Fuseau de fabrication

Il est caractéristique d'une production donnée, et est défini, par exemple, sur chaquetamis testé par :

$$Xf \pm 1.25 \times Sf$$

Ou : Xf : valeur moyenne, Sf : écart type.

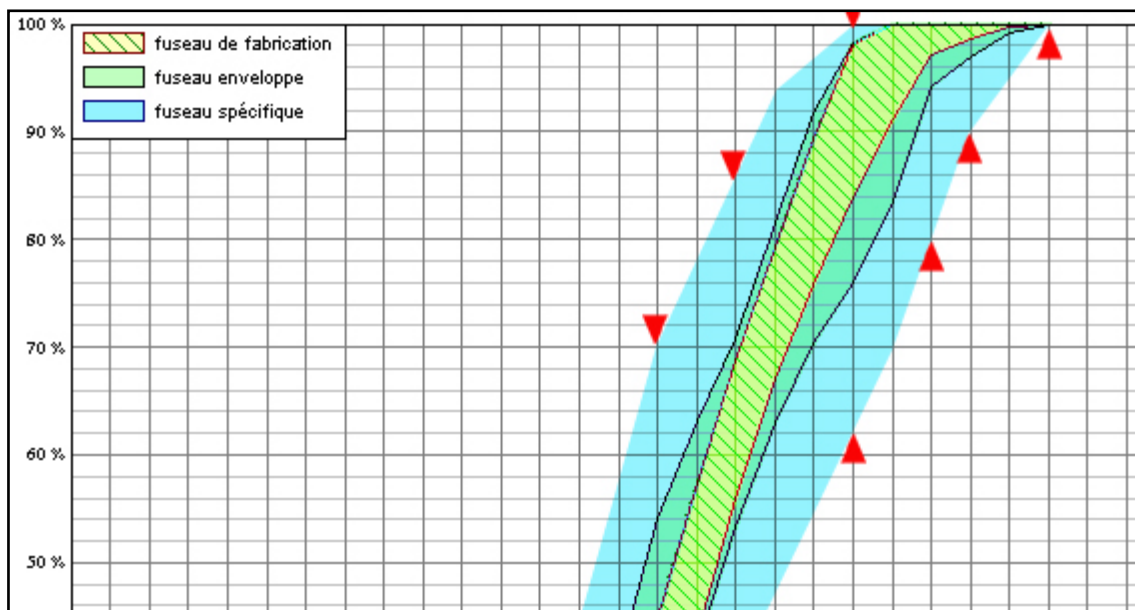


Figure III.2. Les différents fuseaux granulométriques.

III.7. SITUATION EN ALGERIE EN MATIERE DE RESPECT DES NORMES

Dans le cadre d'une étude portant sur les « nouvelles classes granulaires », initiée par la Direction de l'Exploitation et de l'Entretien Routiers (DEER) du Ministère des Travaux Publics (MTP) et pilotée par l'Organisme de Contrôle Technique des Travaux Publics (CTTP) en 2008, une enquête a été menée au niveau national afin de faire le point sur les granulats produits en Algérie. Seules quelques entreprises ont répondu au questionnaire du ministère et ont envoyés des échantillons pour analyse. Nous vous présentons ci après les résultats de cette enquête.

III.7.1. Provenance des granulats

Les granulats testés provenaient de différentes carrières situées dans la région du centre et de l'est du pays et réparties comme suit :

Région du centre

- ❖ Carrière d'El Hachimia (ENG) dans la wilaya de bouira : 0/3, 3/8, 8/15 et 15/25
- ❖ Carrière de Oued El fodda (ALGRAN) dans la wilaya de chlef : 0/3, 3/8, 8/15.

Région de l'est

- ❖ Carrière de beniAzzouz dans la wilaya de Skikda : 0/3, 3/8, 8/15 et 15/25 ;
- ❖ Carrière de Ain Smara (EPTP Constantine) dans la wilaya de Constantine : 0/3, 3/6, 6/10, 10/14, 14/20 ;

- ❖ Carrière de Sigus (EPTP Constantine) dans la wilaya de Oum El Bouaghi : 0/3, 3/6, 6/10, 10/14, 14/20

Les caractéristiques testées sont :

III.7.2. Les Caractéristiques des granulats

a) Les Caractéristiques de fabrication

Celles-ci sont au nombre de 3 et sont déterminés par les essais suivants :

- ❖ Analyse granulométrique NFP18-560
- ❖ Propreté superficielle (P) NFP18-591
- ❖ L'aplatissement (A) NFP18-561

b) Les Caractéristiques intrinsèques :

- ❖ Los Angeles (LA) NFP 18-573
- ❖ Micro Deval (MDE) NFP18-572

III.7.2. fuseaux granulométriques et granularité:

Il y'a lieu de rappeler avant de présenter les résultats que les granulats utilisés dans le domaine routier font l'objet de normes bien spécifiques et que les courbes granulométriques des différentes classes granulaires testées doivent s'insérer dans des fuseaux de référence définis par les normes en vigueur.

Dans le domaine des granulats routiers, la norme définissant les fuseaux granulométriques est la norme EN 13043, qui utilise la série de tamis suivante :

0 - 0.063 – 0.08 – 0.1 – 0.125 – 0.16 – 0.2 – 0.25 – 0.315 – 0.4 – 0.5 – 0.63 – 0.8 – 1-
1.25 – 1.6 – 2 – 2.5 – 3.15 – 4 – 5 – 6.3 – 8 – 10 – 12.5 – 14 – 16 – 20 – 25 – 31.5 – 40 – 50
– 63 – 80 – 100 – 125 mm

Les dimensions soulignées ci-dessus sont celles de la série de tamis de base préconisée par la norme.

Les classes granulaires doivent être spécifiées en utilisant les dimensions des tamis données dans le tableau III.6 suivant et comprenant la série de base, ou la série de base plus la série 1, ou la série de base plus la série 2. La combinaison de dimensions de tamis de la série 1 et de la série 2 n'est pas tolérée.

Tableau III.6. Dimension des tamis pour la spécification des classes granulaires

Série de base en mm	Série de base + série1 en mm	Série de base +série 2 en mm
0	0	0
1	1	1
2	2	2
2	4	4
-	5,6 (5)	-
8	-	6,3
-	8	8
-	-	10
-	11,2 (11)	-
-	-	12,5 (12)
16	-	14
-	16	16
-	-	20
32,5	22,4 (22)	-
-	31,5 (32)	31,5 (32)
-	-	40
-	45	-
63	63	63

La granularité des classes granulaires doit être déterminée selon la norme EN 13043, et doit répondre aux spécifications du tableau III.6 en fonction de la dimension d/D.

Tableau III.7. Caractéristiques générales de granularité

Granulat	Dimensions [mm]	Pourcentage de passant en masse					Catégorie G _C
		2 D	1.4 D ^a	D ^b	d	d/2 ^a	
Gravillon	D > 2	100	100	90-99	0-10	0-2	G _{C90/10}
		100	98-100	90-99	0-15	0-5	G _{C90/15}
		100	98-100	90-99	0-20	0-5	G _{C90/20}
		100	98-100	85-99	0-15	0-2	G _{C85/15}
		100	98-100	85-99	0-20	0-5	G _{C85/20}
		100	98-100	85-99	0-35	0-5	G _{C85/35}
Sable	D ≤ 2	100	-	85-99	-	-	G _{F85}
Grave	D ≤ 45 et d = 0	100	98-100	90-99	-	-	G _{A90}
		100	98-100	85-99	-	-	G _{A85}

^a Lorsque les tamis calculés 1.4 D et d/2 ne correspondent pas à des tamis exacts de la série de l'ISO 565 : 1990 R20, le tamis le plus proche doit être adopté.

^b Lorsque le pourcentage retenu D est < 1 % en masse, le fournisseur doit déclarer et documenter sa granularité type avec les tamis D, d, d/2 et les tamis de la série de base plus la série 1 ou la série 2, compris entre s et D.

Remarque :

Le cas échéant, il faut appliquer les spécifications supplémentaires suivantes sur le passant au tamis de dimension intermédiaire des gravillons de classe granulaire étendue d/D, où D ≥ 2d.

Toutes les granularités doivent respecter les limites générales indiquées dans le tableau

III. 3.

Tableau III.8. Limites générales de granularité des gravillons au tamis de dimension intermédiaire

D/d	Tolérances intermédiaires ^a [mm]	Limites générales et tolérances au tamis intermédiaire (Pourcentage du passant en masse du granulat)		Catégorie G
		Limites générales	Tolérance sur la granularité typique déclarée par le fournisseur	
< 4	D/1.4	25-80	± 15	G _{25/15}
		20-70	± 15	G _{20/15}
≥ 4	D/2	20-70	± 17.5	G _{20/17.5}
Non requis				G _{NR}

^a Lorsque la dimension des tamis intermédiaires calculée comme ci-dessus ne correspond pas à des dimensions de tamis exactes de la série R20 de l'ISO 565 : 1990, le tamis le plus proche doit être adopté.

III.7.3. Résultats de l'enquête :

III.7.3.1 La granularité

Pour ce qui est des granulats testés, les résultats suivants pour les différentes carrières ont été obtenus :

❖ **Carrière de Sigus (EPTP Constantine)**

La superposition avec le fuseau de référence laisse apparaître des courbes qui ne s'insèrent pas bien dans les fuseaux de référence des classes 3/8, 6/10 et 14/20.

Par contre, pour la classe 10/14, la courbe s'insère complètement dans le fuseau de référence.

❖ **III.7.3.2. Carrière de Ain Smara (EPTP Constantine)**

Les courbes granulométriques obtenues ne s'insèrent pas dans les fuseaux de référence des classes 6/10, 10/14 et 14/20.

La courbe obtenue pour la classe 3/6, s'insère assez bien dans le fuseau de référence.

❖ **Carrières d'El Hachimia et de Ben Azzouz (ENG)**

L'ensemble des analyses granulométriques réalisées donnent des courbes qui s'insèrent dans le fuseau de référence notamment pour les classes 3/8, 8/15. Pour la classe 15/25, la courbe obtenue est hors fuseau de référence.

❖ **Carrières de Oued El Fedda**

La courbe granulométrique obtenue s'insère assez bien dans le fuseau de référence de la classe 8/15. La courbe est complètement hors fuseau de référence pour la classe 14/20.

III.7.3.2. Forme et propreté :

Letableau III.8, expose les résultats des essais de propreté superficielle et de l'aplatissement sur les différents échantillons.

Tableau III.9. Coefficients de propreté et d'aplatissement

Carrière		Coefficient de propreté P	Coefficient d'aplatissement A
EL HACHIMIA (ENG)	3/8	1,38	26
	8/15	0,4	16
	15/25	0,24	13
OUED EL FEDDA (ALGRAN)	8/15	0,29	25
	14/20	0,26	20
AIN SMARA (EPTP CONST)	3/6	1	10
	6/10	0,5	15
	10/14	0,38	8
	14/20	0,32	4
SIGUS (EPTP CONST)	3/6	2,5	16
	6/10	1,43	14
	10/14	0,63	10
	14/20	0,5	7
BENAZZOZ (ENG, SKIKDA)	3/8	3,44	16
	8/15	0,67	12
	15/25	0,42	20

Les coefficients d'aplatissement mesurés sur les différentes classes (3/6,3/8, 6/10,8/15, 10/14, 14/20 et 15/25 des 5 carrières citées ci-dessus sont dans la majorité des cas inférieurs à 25, à l'exception de celui de la classe 3/8 de la carrière d'El Hachimia ENG qui varie de 4 à 26. La mesure du coefficient de propreté superficielle montre que les valeurs varient entre 0.24 et 3.44.

III.7.3.3. Essais mécaniques

Les normes en vigueur pour les essais Los Angeles (NFP18-573) et Micro Deval (NFP18-572) font elles aussi référence aux classes paires 4/6.3, 6.3/10 et 10/14.

Or il se trouve que dans tous les laboratoires algériens, les essais sont effectués sur des classes paires tamisées en laboratoire à partir des classes impaires et le résultat est transmis au client comme étant celui d'une classe impaire (3/8, 8/15 et 15/25).

Dans la norme européenne EN 13043, août 2003, les essais Los Angeles et Micro Deval se font seulement sur la classe 10/14.

Les essais Los Angeles et Micro Deval ont été réalisés sur la fraction 10/14 d'après la norme EN13043 (Août 2003) pour certaines carrières telles que : Ain Smara et Sigus (EPTP constantine) et Ben Azouz (ENG). L'objet de ces deux essais est :

Les résultats de ces essais sont récapitulés dans le tableau III.10:

Tableau III.10. Résultats du LA et du MDE.

Essais	Classe	LA	MDE
résultats			
Carrière El Hachimia	0/3	22.4	21.3
	3/8	22	25
	8/15	21	/
Carrière : OUED EL FEDDA	8/15	22	8.7
	14/20	22	/
Carrière : AIN SMARA (EPTP CONST)	3/6	/	/
	6/10	/	/
	10/14	23	20
	14/20	/	/
Carrière : SIGUS (EPTP CONST)	3/6	/	/
	6/10	/	/
	10/14	22	
	14/20	/	/
Carrière : BENZAOUZ (ENG, SKIKDA)	3/8	/	/
	8/15	22	
	15/25	/	/

III.7.4. Résultats

Pour ce qui est des granulats étudiés, les spécifications de la directive Algérienne pour enrobé

Tableau III.11. Spécifications

Trafic (PL > 5 tonnes)	≤ 25 PL /J	25-150 PL /J	150-300 PL /J	300-750 PL /J	≥ 750 PL /J
LA	≤35	≤30	≤25	≤20	≤15
MDE	≤30	≤25	≤20	≤15	≤10
A	≤30	≤25	≤20	≤15	≤15
P	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1
CPA	≥ 0.35	≥ 0.35	≥ 0.40	≥ 0.40	≥ 0.45
RC		≥ 4	≥ 4	≥ 6	
IC	100				

Au vu des résultats obtenus sur ces granulats, nous voyons donc que le critère de classe routières n'est pas respecté, mais qu'aussi que les caractéristiques obtenus surtout en ce qui concerne la dureté ne permettent leur utilisation que pour un faible trafic (25-150 PL/J).

III.8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le granulat est un produit de première nécessité dont l'approvisionnement doit être assuré durablement.

La qualité des granulats produits dans nos carrières est loin de satisfaire les spécifications des normes en vigueur, et ce ci est l'un des facteurs majeur impliquant la dégradation prématuré de nos routes et autoroutes.

Nous insistons sur la nécessité de l'intervention de la tutelle auprès des entreprises productrices de granulats pour fabriquer les classes normalisées seules utilisables dans le domaine routier, notamment en ce qui concerne la formulation des enrobés bitumineux qui dépendent des caractéristiques des granulats.

LES LIANTS HYDROCARBONES

IV.1. DEFINITION

Un liant hydrocarboné est un mélange d'hydrocarbures d'origine naturelle; Il est fréquemment accompagné de dérivés non métalliques qui peuvent être gazeux, liquides, semi-solide ou solides, et qui sont complètement solubles dans le bisulfure de carbone.

IV.2 COMPOSITION ET STRUCTURE DES BITUMES

Issus du traitement des pétroles bruts, les bitumes sont des mélanges complexes de composés hydrocarbonés constitués de carbone (79 à 88% massique) et d'hydrogène (7 à 13%). On note aussi la présence de faibles quantités d'oxygène (2 à 8%) et d'azote (jusqu'à 8%), ainsi que des traces de nombreux métaux (Fer, Nickel,...) [6,2].

La composition élémentaire d'un bitume dépend essentiellement de l'origine de son brut et d'une manière moindre, des techniques de raffinage [2].

La diversité des molécules présentes dans les bitumes rend impossible la détermination de leur composition exacte. Néanmoins il est possible de regrouper ces constituants en grandes familles chimiques [6].

Les premiers travaux sur la chimie du bitume sont dus à Boussingault, qui a séparé une fraction distillable qu'il a nommé « pétroles » (maintenant appelée plutôt Maltènes) et une fraction non distillables, les Asphaltènes. Plus récemment, le développement des techniques de chimie analytique a permis de mieux définir et caractériser ces fractions, [2].

Par précipitation avec du n-heptane, on peut séparer les bitumes en deux fractions à savoir [1,2] :

- les asphaltènes : fraction insoluble, produit solide apportant au bitume sa cohésion et sa dureté et constituant entre 5 et 20 % du bitume;
- Les maltènes, fraction soluble, produits huileux (molécules moins grosses) dans lesquels baignent les asphaltènes. Les maltènes peuvent être séparées par la chromatographie liquide en trois principaux sous familles, soit :

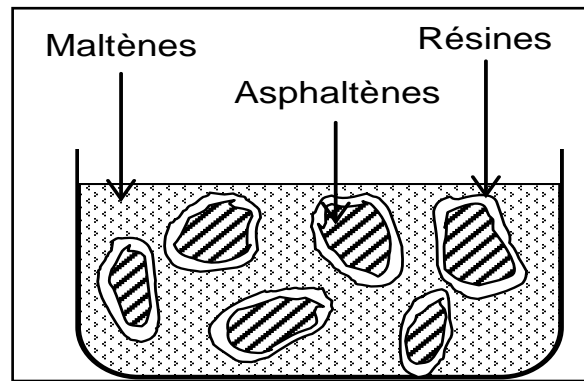


Figure VI.1. Composition des bitumes.

L'ensemble des asphaltènes et des maltènes forme un système colloïdal constitué par une suspension de micelles d'asphaltènes peptisées par les résines dans un milieu huileux.

En effet, les asphaltènes ont tendance à adsorber la fraction aromatique la plus lourde des maltènes (les résines), ce qui permet leur dispersion dans le mélange huileux (hydrocarbures aromatiques et saturés). On dit qu'il y a peptisation.

Si les maltènes contiennent suffisamment d'aromatiques, les micelles sont complètement mobiles au milieu de la phase dispersante : elles sont peptisées; La solution colloïdale est alors à l'état de structure sol (visqueuse) (Figure III.2).

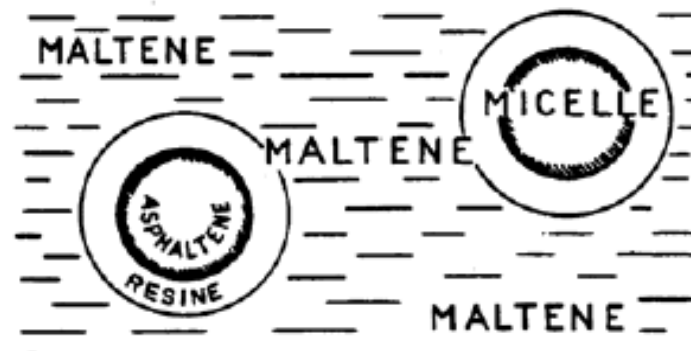


Figure IV.2. Etat colloïdal des bitumes

S'il n'y a pas suffisamment d'aromatiques, les micelles s'attirent mutuellement, deviennent moins mobiles et forment un réseau au milieu de la phase intermicellaire; Cette structure, qui confère au bitume des propriétés élastiques, est désignée sous le nom de structure gel.

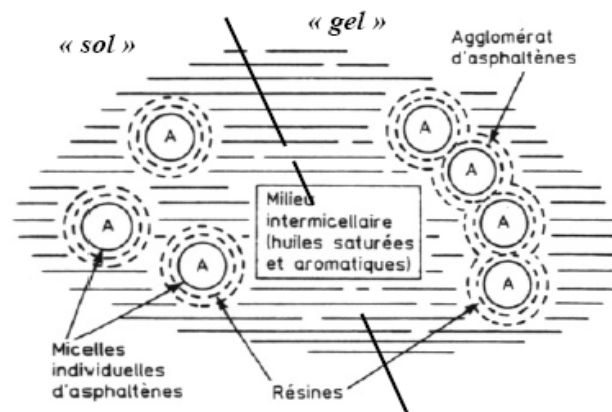


Figure IV.3. Schématisation de la structure colloïdale

Une structure intermédiaire entre les deux précédentes et qui correspond à la majorité des bitumes est appelé structure “ sol – gel ”,

IV.3. LES BITUMES MODIFIES

Le développement de bitumes modifiés par des polymères et de l'emploi d'additifs est intimement lié à la mise au point de nouvelles formules d'enrobés bitumineux pour couche de surface, offrant de meilleures performances en terme de qualité d'usage et de durabilité. L'emploi de bitume modifié s'est généralisé pour les chaussées fortement circulées et autoroutière.

Un bitume modifié est un bitume dans lequel on a incorporé un ou plusieurs polymères, pour en améliorer les performances.

Ces liants apportent à l'enrobé bitumineux de hautes performances à savoir:

- Une faible susceptibilité à la température et aux temps de charge.
- Une bonne résistance au fluage et à la fatigue.
- Une bonne souplesse au froid et comportement élastique.
- Certains polymères favorisent aussi la résistance au kérosène.

IV.3.1. Les agents modifiant utilisés

Il existe plusieurs types d'agents modifiants

Les polymères :

Les polymères constituent la famille d'agents modifiants chimiques la plus utilisée pour la modification des bitumes, on classe les polymères en deux grandes catégories

- les polymères thermodurcissables.
- les polymères thermoplastiques.

IV.3.1.1. Les polymères thermodurcissables

Ils durcissent de façon irréversible à une température qui dépend de leur nature chimique, l'enchaînement de leur molécules forme un réseau tridimensionnel qui s'oppose à toute mobilité thermique, ils sont relativement peu utilisée en association avec le bitume en technique routière n'étant pas l'objet de ce travail, nous ne nous attarderons donc pas à leur étude.

IV.3.1.2. Les polymères thermoplastiques

Contrairement aux polymères thermodurcissables, ils se fluidifient et deviennent malléables sous l'effet de la chaleur, de façon réversible, Ils sont formés, en 1^{ère} approximation de chaînes macromoléculaires linéaires. Eventuellement ramifiées, ils sont combinés au bitume à température élevée. Et que le mélange se présente sous une forme fluide plus au moins visqueuse.

Les polymères thermoplastiques sont subdivisés en deux familles : les élastomères et les plastomères qui se distinguent, aux températures d'usage, par de comportements différents du point de vue, en particulier, de leur rigidité, de leur déformabilité et de leur résilience. Pour les plastomères, la déformation élastique s'accompagne d'une déformation permanente qui peut être relativement important.

- 1) *Les élastomères* : Ce sont des composés naturels ou synthétiques présentant l'élasticité du caoutchouc à la température ambiante. Ils résistent bien à l'influence des produits tels que les huiles, les essences et sont insensibles à l'eau.

Ils résistent également bien à l'oxygène et au rayonnement solaire; donc au vieillissement.

- Les copolymères Styrène isoprène styrène (SIS)
- Les copolymères Styrène Butadiène (SB)
- Les copolymères Styrène Butadiène Styrène (SBS)

La figure IV.4 montre l'influence de l'ajout des SEBS sur les caractéristiques du bitume.

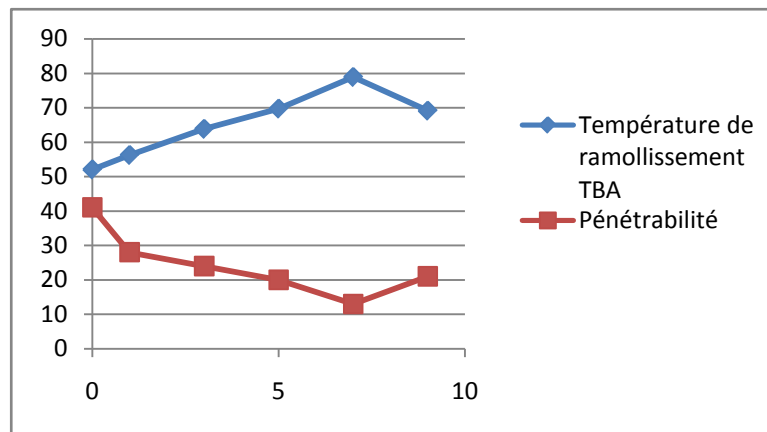


Figure IV.4. Influence de l'ajout du SEBS sur la pénétrabilité et le ramollissement du bitume.

2) Les plastomères :

On distingue dans ce groupe :

- les copolymères éthylène-acétate de vinyle (EVA).
- les copolymères éthylène-acrylate de méthyle (EMA).
- les copolymères éthylène-acrylate de butyle (EBA).

Les travaux de J.C. AMBA [Amba-2003] en montrant que l'ajout de 5 % d'EVA dans un bitume 70/100 diminue considérablement la pénétrabilité de celui-ci et augmente sa température de ramollissement.

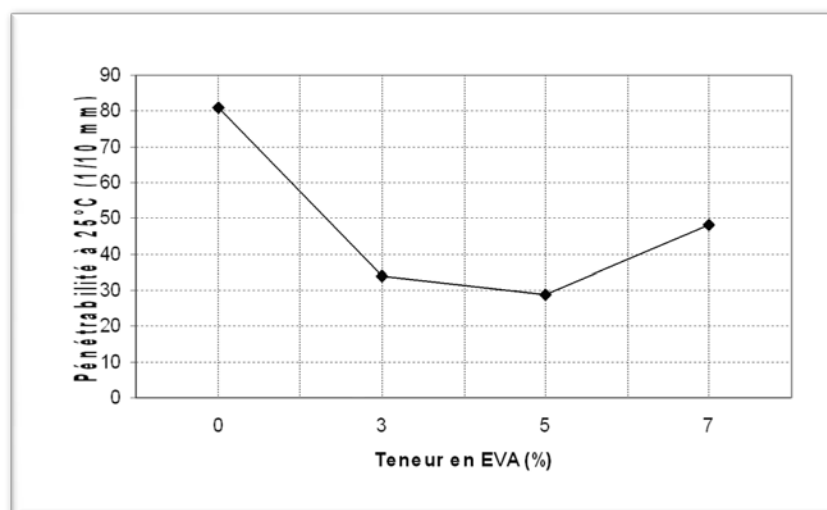


Figure IV.5. Influence de l'EVA sur la pénétrabilité des bitumes [Amba 2003].

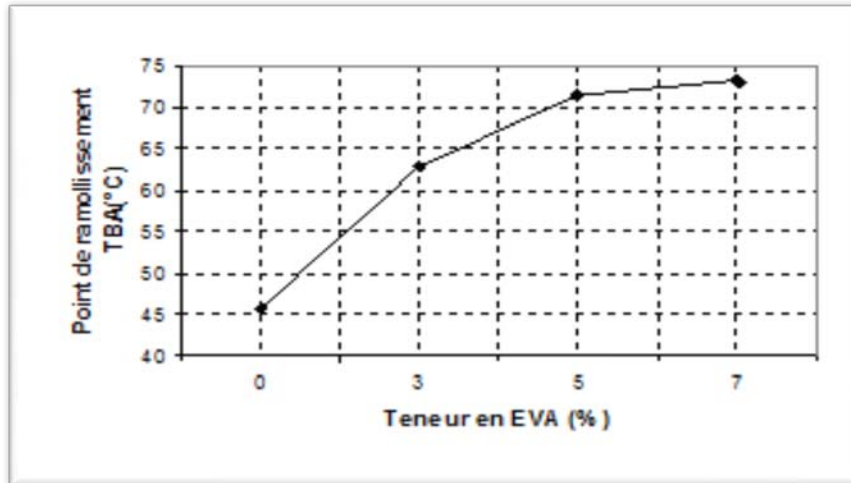


Figure IV.6. Influence de l'EVA sur la température de ramollissement des bitumes

K.BENSEBAA [Ben 2003] a utilisé l'EVA sur UN bitume 35/50 et son étude a révélé une amélioration des caractéristiques du bitume avec l'ajout de l'EVA.

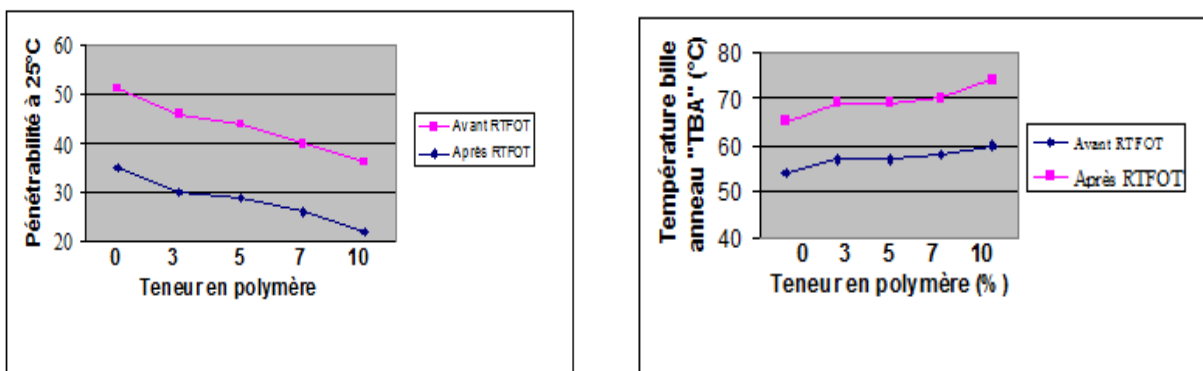


Figure IV.7. Influence de la teneur en EVA sur la pénétrabilité et le point de ramollissement du bitume avant et après RTFOT.

IV.3.2. Le latex

On distingue trois types de latex et qui sont :

IV.3.2.1. Caoutchouc naturel (NR) « Naturel Rubber »

Les latex naturels proviennent du latex produit par certains arbres originaires d'Amérique du Sud et d'Asie.

Les produits vulcanisés à partir du NR ont une bonne résistance mécanique et peuvent être agglomérés pour offrir une excellente élasticité. Le NR a une bonne résistance à l'abrasion et

des propriétés dynamiques intéressantes qui en font un matériau utilisé dans les pneus et dans les appareils d'amortissement des vibrations et des chocs.

Avec une température de transition vitreuse de -57°C et une température de résistance au vieillissement en service de 75°C , le NR offre une large gamme de températures de service [2].

L'étude menée en 2009 sur un bitume 50/70, a montré que La modification du bitume avec du NR diminue le taux de vieillissement de celui-ci, diminue sa susceptibilité thermique et augmente sa ductilité

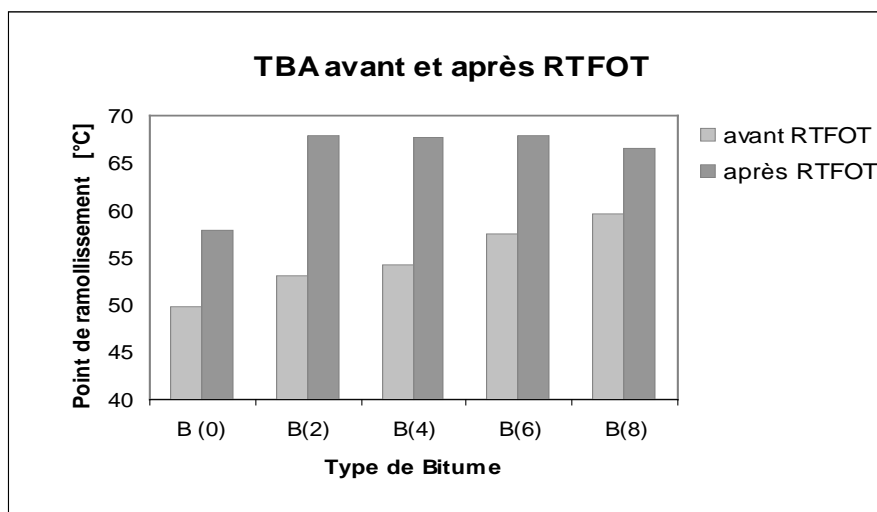


Figure IV.8 Evolution de la température bille et anneau « TBA » au vieillissement des liants bitumineux [37].

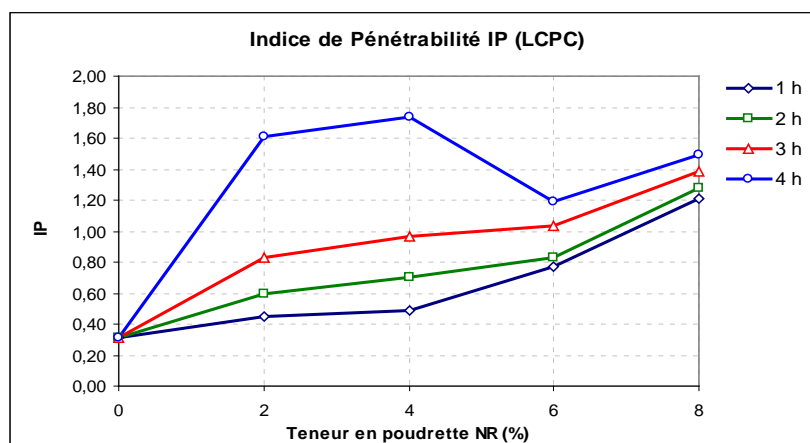


Figure IV.9. Influence de la teneur en NR sur l'indice de pénétrabilité « IP » [37].

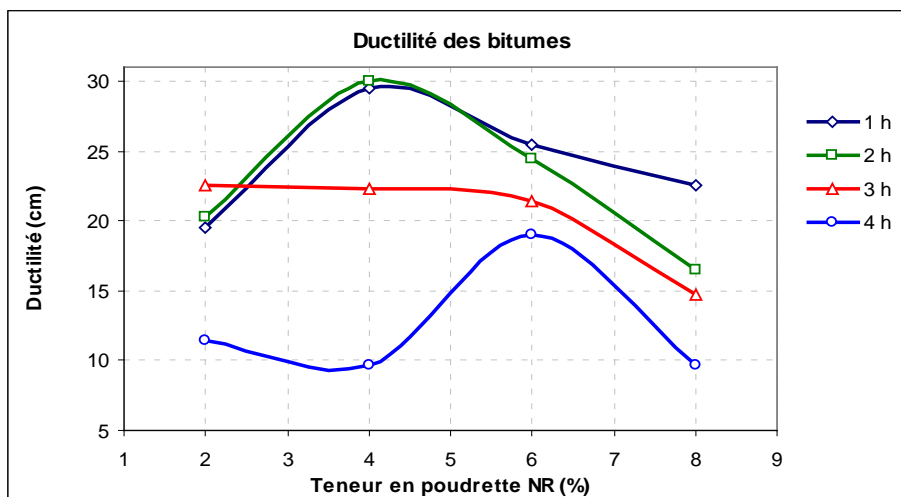


Figure IV.10. Influence de la teneur en NR sur la ductilité à 25 °C [37]

IV.3.2.1. Le caoutchouc styrène butadiène (SBR)

Le « styrene butadiene rubber », SBR est un caoutchouc synthétique (dérivé pétrolier), Le SBR représente plus de la moitié de la production de caoutchouc synthétique et la plus grande proportion dans la composition des pneus en complément du caoutchouc naturel.

En comparaison avec le caoutchouc naturel (NR), le styrene butadiene rubber (SBR) a une faible résistance mécanique qui nécessite le mélange de la gomme brute avec une charge de fillers tels que le noir de carbone pour améliorer la rigidité et la résistance mécanique.

Les autres propriétés chimiques sont similaires à celles du caoutchouc naturel (NR) avec néanmoins une meilleure résistance au vieillissement. Les coûts de production du SBR sont à peu près comparables à ceux du NR [2].

IV.3.2.3. Le polychloroprène (CR)

Plus populaire sous l'appellation "Neoprène", le CR peut être considéré comme un caoutchouc plus spécialisé que les précédents.

Sa résistance aux huiles est moyenne, voire assez bonne. Les propriétés dynamiques sont similaires à celles du caoutchouc naturel (NR), surtout dans le cas des composites vulcanisés. Sa résistance aux solutions acides et basiques est meilleure que celles du NR et du SBR, mais il est plus coûteux.

On compte parmi ses avantages, une bonne résistance aux intempéries, au vieillissement et une faible inflammabilité.

Tableau IV.1 Différents agents modifiants

Polymères thermoplastiques élastomères			
Copolymère styrène-butadiène-styrène SBS	Copolymère styrène-isoprène-styrène SIS	Styrène-butadiène SB	Copolymère statistique styrène-butadiène SBR
Polymères thermoplastiques plastomères			
Copolymère éthylène-acétate de vinyle EVA	Copolymère éthylène-acrylate de méthyle EMA	Copolymère éthylène-acrylate de butyle EBA	Polyisobutylène PIB
Latex			
Polychloroprène CR	Caoutchouc SBR	Caoutchouc naturel NR	

Les objectifs essentiels d'utilisation du latex sont :

- L'imperméabilité en couche de roulement ultramince sur un support peu déformé,
- L'amélioration de l'adhérence,

IV.4. LE BITUME CAOUTCHOUC

Un bitume caoutchouc est bitume modifié à base de caoutchouc en vue de l'amélioration de ses caractéristiques.

Depuis le relatif succès de l'utilisation du bitume caoutchouc dans un enrobé à chaud, et ce, suite à un programme intense du département des transports de l'Arizona (ADOT) (Epps et

al, 1980), plusieurs départements et laboratoires principalement aux USA se sont intéressés au développement cette technique [2].

IV.4.1. Procédé de fabrication d'un bitume caoutchouc

La fabrication d'un bitume caoutchouc se fait par deux méthodes courantes qui sont :

IV.4.1.1. Modification par voie humide "Wetprocess"

Ce procédé consiste à modifier le liant de base par emploi d'un polymère afin de modifier la structure chimique et les propriétés physiques et mécaniques.

Différentes procédures ont été développées pour produire les bitumes-polymères, La méthode la plus adoptée au laboratoire ou en usine est basée sur les principes suivants :

- La température de mélange est généralement comprise entre 150°C et 200°C.
- La durée de malaxage (agitation mécanique, vitesse de malaxage est de 300 – 400 tr/min) varie de 1 heures à 12 selon le type de polymère.

La durée optimale de malaxage est atteinte quand les propriétés désirées du bitume - polymère, telles que le point de ramollissement, la pénétration et la viscosité deviennent constantes.

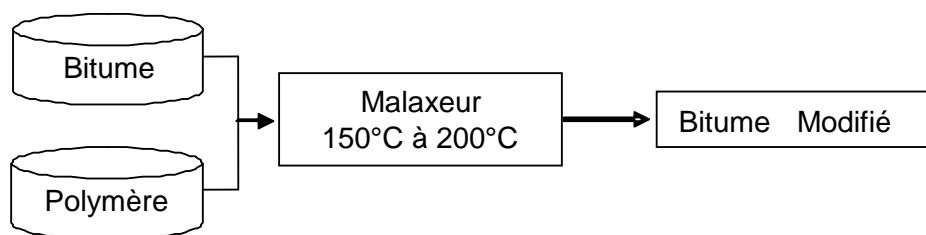


Figure IV.11. Mode de fabrication d'un bitume modifié.

IV.4.1.2. Modification par voie sèche "Dry process"

Cette technique consiste à introduire le polymère directement dans le malaxeur de la centrale d'enrobage avec le bitume et les granulats pour la fabrication de l'enrobé à chaud.

Selon le procédé, le mélange doit être utilisé immédiatement en raison de son instabilité ou il peut être au contraire stocké.

IV.4.2. Influence des paramètres de fabrication sur les caractéristiques physico-chimiques du bitume - caoutchouc [2]

Les performances du bitume caoutchouc sont améliorées par l'augmentation du taux de dissolution du caoutchouc dans le bitume. Selon (Billiter, Chun & al. 1997; Billiter, Davison & al. 1997) [2], la dissolution est meilleure pour des particules plus fines.

La nature du bitume a aussi un effet déterminant sur l'interaction bitume/caoutchouc. Le bitume combiné à une huile aromatique présente de meilleurs résultats. Cette interaction accrue est confirmée par le fait que les huiles aromatiques sont souvent utilisées dans la fabrication du caoutchouc, du fait de leur compatibilité avec ce dernier.

- ❖ Le temps de malaxage augmente la dissolution du caoutchouc jusqu'à un certain degré. En effet, après 2 à 6 heures de réaction, le taux de caoutchouc dissous représente 30 à 40% de la masse initiale et n'augmente plus avec le temps (Billiter, Billiter, Davison et al. 1997) [2] (figure VI.9). Chun et al. 1997;

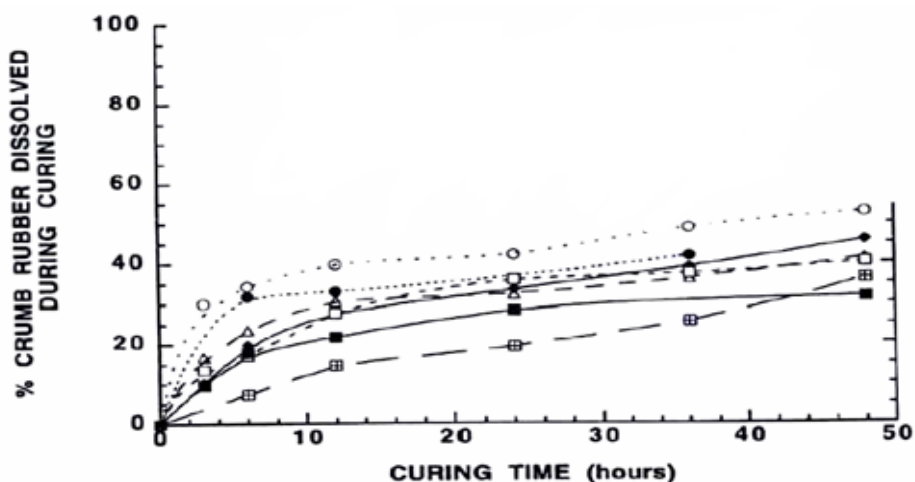


Figure IV.12. Dissolution du caoutchouc dans le bitume en fonction du temps de malaxage [henia].

- ❖ Une température de malaxage plus élevée réduit énormément le temps de réaction à taux de dissolution constant, Cette amélioration de l'interaction peut être expliquée par la diminution de la viscosité du bitume qui augmente le transfert de masse entre les deux composants.

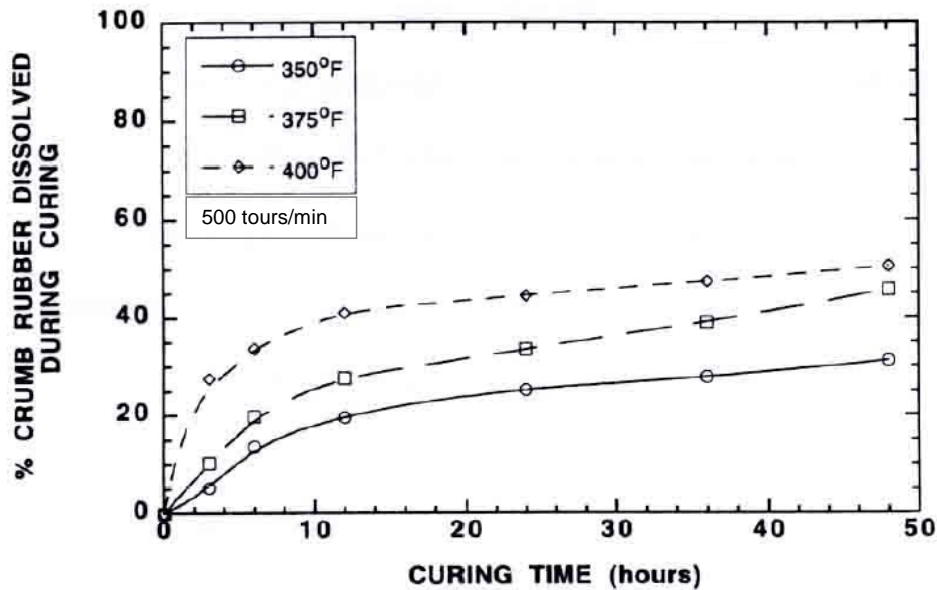


Figure VI.13 .Dissolution du caoutchouc dans le bitume en fonction de la température de malaxage [8].

IV.5. CONCLUSION

Le bitume, est un matériau d'importance capitale dans la fabrication des chaussées routières.

A cause des imperfections qui lui sont inhérents, on procède à sa modification par des méthodes physiques et chimiques, en utilisant des déchets industriels et des polymères ont été utilisés avec succès pour modifier les bitumes.

Les polymères figurent parmi les agents qui ont été intensivement employés par l'industrie du bitume. [2]

Les polymères les plus utilisés en technique routière actuellement sont :

- ❖ le copolymère butadiène - styrène (SBS) qui présente un accroissement du module de rigidité et une élévation des températures de ramollissement et d'écoulement du liant (famille des élastomères),
- ❖ le copolymère d'éthylène et d'acétate de vinyle (EVA) qui donne une bonne résistance à la fatigue et une stabilité thermique remarquable (famille des plastomères),
- ❖ La poudre de caoutchouc de pneus recyclés qui présente les mêmes améliorations que le SBS à moindre échelle.
- ❖ les polymères issus des déchets industriels.

La nécessité d'une modification découle du besoin d'améliorer les caractéristiques fonctionnelles des chaussées à savoir

- ❖ la cohésion : Elle peut être définie comme l'énergie nécessaire pour rompre un film de liant. Elle varie en fonction de la température en passant par un maximum.

- ❖ L'élasticité : C'est l'aptitude à supporter d'une façon réversible sans rompre la déformation générée par le trafic et ce malgré les variations de la température. Le but de la modification est de l'améliorer et de la maintenir dans la plage la plus large des températures d'utilisation.

- ❖ La résistance à la fatigue : Sous l'action du trafic, les matériaux sont sollicités de façon répétée et consomment progressivement leur capital de résistance . La modification vise à augmenter ce capital surtout à basse température.

- ❖ La susceptibilité thermique : Elle caractérise la variation de la consistance en fonction de la température .la modification a généralement pour but de réduire cette susceptibilité en élargissant la plage séparant la fragilité à froid du ramollissement à chaud.

**LA NORMALISATION EN MATIERE
D'ENROBES BITUMINEUX**

V.1. INTRODUCTION

L'enrobé bitumineux est un mélange à granularité continue se composant de gravillons, de sable, de filler, de liant bitumineux et éventuels d'additifs. Les classes granulaires qui constituent un enrobé sont définies selon le domaine d'utilisation, de celui-ci.

Enrobé pour couche de liaison qu'on appelle grave bitume et enrobé pour couche roulement de appelé béton bitumineux.

V.2. DEFINITIONS

V.2.1. Les grave bitume

La grave bitume (GB) est un mélange de granulat à granularité continue de diamètre (0 à 32mm) ; se composant de granulats, de sable, de filler, de liant bitumineux

Elle est appropriée pour couche de base de routes, autoroutes et aéroports. Elle est fabriquée, mise en œuvre et compactée à chaud et assure la portance de la chaussée et la répartition des charges du trafic transmis par les couches de surface.

V.2.2. Les bétons bitumineux

Le béton bitumineux, BB, est un enrobé à granularité continue 0/4, 0/8, 0/12,0/14 ou 0/16 se composant de gravillons, de sable, de filler, de liants bitumineux et d'additifs éventuels, en vue d'obtenir une texture la plus dense et la plus résistante possible

V.3. CONSTITUTION ET CONSTITUANTS DES ENROBES BITUMINEUX

Un enrobé bitumineux est défini comme un mélange de liant bitumineux (5 à 7 %), d'agrégats et de fines ($d < 80 \mu\text{m}$).

Pour que ce mélange granulat-bitume nous assure les performances souhaitées, il faut que ces constituants aient des propriétés bien spécifiques.

Dans le mélange bitumineux, le liant assure la cohésion entre les grains minéraux en les mouillant et les enrobant d'un film continu.

Le squelette granulaire est l'ossature rigide du mélange, La distribution de taille de différents agrégats donne la composition granulométrique du squelette granulaire qui peut être continue ou discontinue selon la destination du mélange et les propriétés visées.

Les fillers (les fines) absorbent une part du liant introduit et forme le mastic qui est plus rigide et moins susceptible thermiquement et cinétiquement que le liant pur.

L'objectif du mélange des différentes classes granulaires est de constituer un squelette granulaire ayant un pourcentage de vides ni trop faible ni trop élevé ; Un faible pourcentage de vide empêche l'introduction d'une quantité du liant suffisante pour enrober l'ensemble des grains sans saturer le mélange, et un pourcentage de vides élevé favorise le développement des déformations permanentes par post-compaction. [Grimaux, 1977, Cross et Brown, 1992].

Les matériaux bitumineux sont des matériaux polyphoniques fortement hétérogènes. Leurs caractéristiques et propriétés mécaniques sont déterminées par les propriétés mécaniques et physiques des composants, et la composition volumétrique du mélange.

V.3.1. Les granulats

Le rôle des granulats est d'abord mécanique. Ils sont choisis pour leur résistance aux usages, leur taille, leur origine et leur répartition afin de supporter au mieux les usages attendus.

Les granulats se répartissent suivant leur taille moyenne en plusieurs familles : fines, sables et gravillons. Les diamètres minimaux et maximaux de ces familles sont normalisés.

V.3.1.1. Les fines

Les fines (passant < à 80 μm) d'un mélange hydrocarboné sont généralement un mélange de fines d'apport en faible proportion et de fines du sable majoritaires.

Les fines d'apport peuvent être issues de roches massives : le filler calcaire est utilisé majoritairement. On rencontre également d'autres matériaux tels que le ciment, la chaux vive, le filler activé (mélange de fines calcaires et de chaux éteinte), la chaux éteinte, les cendres volantes, les fillers de cimenterie et les ardoises.

V.3.1.2 Les sables

Les sables pour enrobés sont les éléments inférieurs à 6,3mm. Le sable doit répondre à des qualités bien spécifiques pour garantir des caractéristiques mécaniques acceptables du mélange bitumineux. Des sables roulés sont aussi utilisés pour améliorer la maniabilité des mélanges.

V.3.1.3. Les gravillons

Les gravillons (d/D) constituent « l'ossature » du mélange hydrocarboné. A ce titre, leur nature, leur angularité, leur forme conditionnent pour partie la stabilité des mélanges et les caractéristiques de surface des couches de roulement. De plus, la nature minéralogique influe directement sur la formulation du mélange : certains matériaux (basaltes, granites, gneiss) sont plus difficiles à compacter, d'autres présentent un caractère absorbant (laitiers, calcaires dolomitiques) dont il faut

tenir compte pour le dosage en liant. La nature minéralogique et la propreté influent également sur l'adhésivité bitume - granulat.

V.3.2. Le bitume

Les bitumes routiers sont des bitumes généralement des dérivés de pétrole, obtenus en raffinerie par un procédé de distillation.

Les bitumes utilisés dans les enrobés confèrent des propriétés viscoélastiques aux revêtements des chaussées.

Un bitume ayant des caractéristiques appropriées assure des performances élevées sur le plan de la résistance à l'orniérage, à la fissuration thermique, à la fissuration de fatigue et à l'arrachement ; ces caractéristiques contribuent à la réalisation de revêtements sécuritaires, durables et économiques.

V.4. FORMULATION DES ENROBE BITUMINEUX

Le principe de la formulation d'un enrobé bitumineux est le suivant :

- Le choix et l'appréciation de la qualité, de la nature de ses constituants qui sont : les granulats et le liant (bitume ou bitume modifié).

Ce choix est fait suivant plusieurs paramètres, tel que les conditions climatiques et la nature de la couche de chaussée.

- Le choix du type d'enrobé bitumineux qui est en relation avec la nature de la couche de chaussée.
- Le dosage des granulats conformément aux spécifications granulométriques.
- Le choix de la teneur en liant.

REMARQUE

Les spécifications granulométriques sont généralement des fuseaux granulométriques qui servent à fixer les proportions de granulats.

Le respect de ces fuseaux, conduit à une compacité maximale tout en conservant une proportion suffisante de vide dans l'enrobé pour permettre l'incorporation du liant.

V.4.1. Sélection du squelette granulaire

La norme européenne EN 13043 spécifie les exigences et les tolérances granulométriques au tamis intermédiaires, des granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation.

V.4.2. Détermination de la teneur en liant

Dans un mélange bitumineux, la teneur en liant et les caractéristiques du liant sont des paramètres cruciaux qui déterminent les performances d'un enrobé bitumineux. C'est pourquoi des exigences sur le liant sont fixées dans le cahier des charges.

Tant pour la teneur en liant que pour ses caractéristiques, des tolérances sont à respecter. La teneur en liant est vérifiée lors de la production de l'enrobé et sur des carottes prises à la réception du chantier tandis que les caractéristiques du liant sont contrôlées lors de sa production en raffinerie et parfois lors de la réception.

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).

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 .

$$100 \Sigma = 0,17G + 0,33g + 2,3 S + 12s + 135f$$

Avec:

G : pourcentage des éléments de diamètre supérieurs à 6.3 mm,

S : pourcentage des éléments de diamètre compris entre 6.3 et 0.315 mm,

s : pourcentage des éléments de diamètre compris entre 0.315 et 0.08 mm,

f : pourcentage des éléments de diamètre inférieurs à 0.08 mm,

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

$$P = \alpha k \sqrt[5]{\Sigma}$$

Avec :

p : teneur en liant (%).

α : facteur dépendant du type de granulats (2,65/masse volumique des granulats).

Chapitre V La normalisation en matière d'enrobés bitumineux

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

k : module de richesse.

Les valeurs de K adoptées par les normes sont les suivantes:

Tableau V.1. Coefficient de richesse des enrobés bitumineux.

Module de richesse	K1	K2	K3	K4
Béton bitumineux (BB)	3,45	3,60	3,75	3,90
Grave bitume (GB)	2,15	2,30	2,45	2,60

V.5. LES PROPRIÉTÉS D'USAGE DES BETONS BITUMINEUX

Pour jouer entièrement son rôle, l'enrobé doit respecter les principales propriétés d'usage comme :

- ❖ l'imperméabilité qui permet de protéger les matériaux du corps de chaussée contre la pénétration de l'eau dans les couches inférieures.
- ❖ la rugosité qui assure l'adhérence du pneumatique à la chaussée.
- ❖ la résistance à l'orniérage qui permet la conservation de l'uni et contribue également à la sécurité.
- ❖ la rigidité qui assure la répartition des sollicitations sur le support.
- ❖ la résistance à la fatigue qui contribue à la longévité des couches soumises à la répétition des sollicitations.
- ❖ la résistance au vieillissement qui participe également à la longévité des couches par le maintien des caractéristiques mécaniques de l'enrobé étroitement liées à celles du liant.

Certaines de ces propriétés s'interfèrent, comme :

-l'imperméabilité et la rugosité qui sont liées à la compacité. Lorsque la compacité croît, l'imperméabilité augmente et la rugosité généralement décroît.

- la rigidité, la résistance à la fatigue et la résistance au vieillissement sont également liées à la compacité, à la teneur en fines et en liant, ainsi qu'à la classe du liant.

Lorsque la compacité croît, la rigidité et les résistances à la fatigue et au vieillissement augmentent. Mais la rugosité décroît !

Lorsque la teneur en liant augmente, les résistances à la fatigue et au vieillissement augmentent mais la rigidité diminue.

Lorsque la teneur en fines croît, la rigidité augmente mais les résistances à la fatigue et au vieillissement diminuent.

- La résistance à l'orniérage est liée aux caractéristiques du liant, aux caractéristiques des granulats, aux teneurs en liant, en fines et à la compacité. La résistance à l'orniérage augmente lorsque le liant est plus dur et si son dosage diminue. Ce qui ne favorise pas les résistances à la fatigue et au vieillissement.

Ces exemples d'interaction montrent bien les difficultés pour choisir la formule adéquate pendant la fabrication et la mise en œuvre des bétons bitumineux.

La protection mécanique de la couche de surface est due à la cohésion de l'enrobé et à son épaisseur qui amortissent les sollicitations engendrées par les roues des véhicules : plus le trafic est élevé, plus l'épaisseur augmente.

V.6.INFLUENCE DE LA GRANULOMETRIE SUR LA QUALITE D'UN BETON BITUMINEUX

La granulométrie est une caractéristique d'importance primordiale dans la formulation d'un enrobé bitumineux.

La formulation des enrobés bitumineux repose sur des fuseaux granulométriques donnés pour chaque type d'enrobé, l'utilisation de ces fuseaux est réglementée par des normes.

On distingue par exemple les fuseaux spécifiques pour les bétons bitumineux :

- ❖ le fuseau granulométrique 0/10

Le tableau suivant nous donne les limites supérieures et inférieures qui définissent ce fuseau.

Chapitre V La normalisation en matière d'enrobes bitumineux

Tableau V.2. Le fuseau granulométrique 0/10.

Tamis (mm)	10	8	6	4	2	0.5	0.2	0.08
Limite sup (%)	100	89	76	65	50	22	16	10
Limite inf (%)	95	80	66	50	35	14	10	8

❖ le fuseau granulométrique 0/14

Le tableau V.3 nous donne les limites supérieures et inférieures correspondantes à ce fuseau.

Tableau V.3. Le fuseau granulométrique 0/14.

Tamis (mm)	16	12	10	8	4	2	1	0.5	0.08
Limite sup (%)	100	92	84	75	54	40	31	24	10
Limite inf (%)	92	81	72	60	40	28	20	15	7

Pour assurer les qualités attendues de l'enrobé nous devons veiller à ce que notre courbe granulométrique du mélange choisi réponde aux exigences des normes.

Le mélange utilisé doit donc convenir à l'un des fuseaux donnés ci-dessus, or en Algérie ; bien qu'on utilise les spécifications correspondantes aux fuseaux granulométriques normalisés, on continue à utiliser les classes granulaires qui ne sont pas adéquates.

V.7. CONCLUSION

Le béton bitumineux est un mélange hétérogène composé de granulats et de bitume, les performances de celui-ci dépendent donc de plusieurs paramètres liés aux granulats, tels que : leurs caractéristiques intrinsèques, leurs caractéristiques de fabrication et leur granulométrie. De la nature du liant utilisé et des conditions de fabrication de l'enrobé.

Sa résistance mécanique est alors fonction de tous ces paramètres réunis.

Les granulats représentent près de 95% de la composition de l'enrobé ce qui impose un choix judicieux.

PRESENTATION ET ANALYSE DES MATERIAUX

Dans ce chapitre nous allons procéder à l'identification des différents matériaux utilisés dans notre étude à savoir les granulats, le sable, le bitume et l'agent modifiant qui est la poudrette de caoutchouc.

VI.1. LES GRANULATS

VI.1.1. Origine des granulats et du sable

Les granulats retenus dans le cadre de la présente étude et qui nous ont été fournis par l'entreprise EGCR sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des bétons bitumineux destinés aux couches de roulement.

Les trois fractions utilisées sont données dans le tableau [VI.1], ainsi que leurs origines,

Tableau VI.1. Provenance des granulats utilisés

Matériau	carrières
Fraction 0/3	Keddara (wilaya de Bouira)
Fractions 3/8 et 8/15	EL Hachimia (wilaya de Boumerdes)

VI.1.2. Analyse chimique sommaire

Les résultats de l'analyse chimique sont récapitulés dans le tableau VI.2.

Tableau VI.2. Analyse chimique sommaire des différents types de granulat

Échantillon	Sable 0/3(%)	Graviers 3/8(%)	Graviers 8/15 (%)
Insolubles (SiO ₂ +Silicates)	8.00	6,3	5,2
Oxyde de fer et d'Al Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃	6.44	1,75	2,6
Gypse (CaSO ₄ , 2H ₂ O)	Néant	Traces	Traces
Chlorures (NaCl)	0,58	0,47	0,41
Carbonates (CaCO ₃)	76,62	92,04	91,65
Anhydride ↗ Carbonique CO ₂	33,45	40,50	40,32
Perte au feu PF	36.81	41,68	41,98
Eau de constitution	3.36	1,18	1,66

Les granulats analysés sont classés suivant la norme [XP P 94-011], dans le tableau VI.3.

Tableau VI.3. Classification des granulats.

Teneur en carbonate (%)	Classification
< 10	Non calcaire
70 à 90	fortement calcaire

L'analyse chimique sommaire révèle que le sable de la carrière de Keddara est constitué d'un pourcentage élevé de carbonates (76,62% de CaCO₃) ce qui montre que c'est un sable fortement carbonaté, donc c'est un sable calcaire.

Les graviers issus de la carrière El Hachimia (3/8 et 8/15) présentent un pourcentage de carbonate élevé (presque 92% de CaCO₃) et un pourcentage très faible en Insolubles

(SiO₂+Silicate) avec un pourcentage proche de 6%. Donc nos granulats sont de nature calcaire aussi.

VI.1.3. Analyse granulométrique

L'essai consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant une classe granulaire dont les dimensions sont comprises entre 0,08 et 125 mm, à l'aide d'une grille de tamis de tailles normalisées.

On appelle :

- REFUS sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le dernier.
- TAMISAT (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

L'échantillon, de masse humide (M_h) supérieure à 400ϕ (avec ϕ le diamètre du plus gros grain exprimé en mm et la masse obtenue en grammes), est lavé puis séché à l'étuve à 105°C.

Le tamisage peut se faire au moyen d'une tamiseuse ou bien manuellement, une fois l'opération terminée on pèse les refus cumulés pour chaque tamis à 1 g près et on calcule le pourcentage de tamisât cumulé sur les différents tamis.

Nous avons effectué une analyse granulométrique sur les différentes classes granulaires disponibles, à savoir 0/3, 3/8, 8/15.

Les résultats sont donnés dans le tableau [VI.4].

Dans ce qui va suivre on appellera les classes utilisées en Algérie classes classiques.

Tableau VI.4. Résultats de l'analyse granulométrique des classes classiques

Tamis en (mm)	fractions granulaires		
	8\15	3\8	0\3
20	100	100	100,00
16	94,17	100	100,00
12,5	77,82	100	100,00
10	24,86	100,00	100,00
8	5,94	92,02	100,00
6,3	1,18	54,82	100,00
5	0,59	21,03	100,00
4	0,59	5,08	95,82
3,15	0,59	3,23	91,98
2	0,59	2,51	77,03
1	0,59	1,79	56,38
0,315	0,59	1,79	42,11
0,25	0,59	1,79	32,70
0,16	0,59	1,79	27,62
0,08	0,11	1,37	18,95

A partir des résultats de l'analyse granulométrique par tamisage donnés dans le tableau si dessus on trace les courbes granulométriques.

La figure VI.1 représente les courbes granulométriques tracées

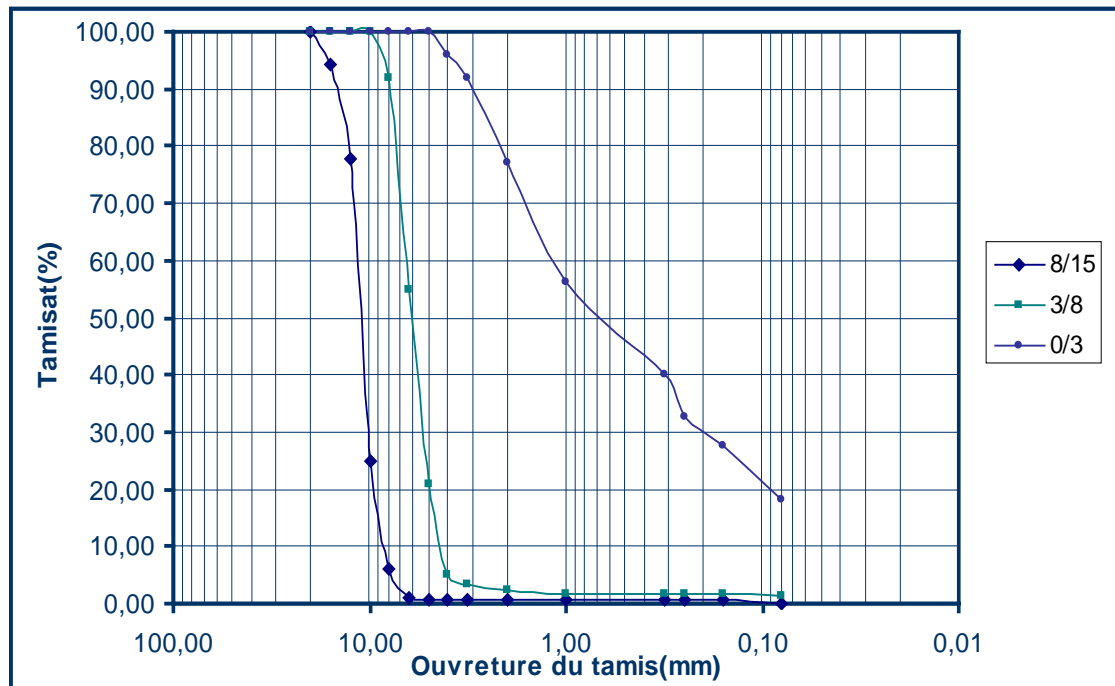


Figure VI.1. Résultats de l'analyse granulométrique des classes classiques.

Les classes routières sont fabriquées à partir des classes disponibles sur le marché algérien à savoir (0/3), (3/8), et (8/15).

Une fois la fabrication des classes est terminée nous procéderons à l'Analyse granulométrique par tamisage.

Les résultats de l'analyse granulométrique des différentes classes fabriquées sont illustrés dans le tableau VI.5

Tableau VI.5. Résultats de l'analyse granulométrique des classes routières

Tamis en (mm)	Classe granulaire				
	10\14	6.3\10	4\6.3	2\4	0\2
20	100	100	100	100	100
16	99,43	100,00	100,00	100,00	100,00
14	90,96	100,00	100,00	100,00	100,00
12,5	64,92	99,69	100,00	100,00	100,00
10	6,69	98,86	100,00	100,00	100,00
8	1,00	70,39	97,78	100,00	100,00
6,3	0,71	14,50	90,16	100,00	100,00
5	0,71	1,19	34,21	95,13	100,00
4	0,71	1,19	8,95	78,42	100,00
3,15	0,71	1,19	4,83	56,75	100,00
2	0,71	1,19	1,26	10,30	97,91
1	0,71	1,19	1,26	10,30	69,54
0,63	0,71	1,19	1,26	10,30	54,38
0,315	0,71	1,19	1,26	10,30	42,09
0,16	0,71	1,19	1,26	10,30	34,25
0,08	0,39	0,80	0,75	1,25	20,92

A partir du tableau précédent les courbes granulométriques de ces fractions granulaires sont représentées dans les figures (VI.2)

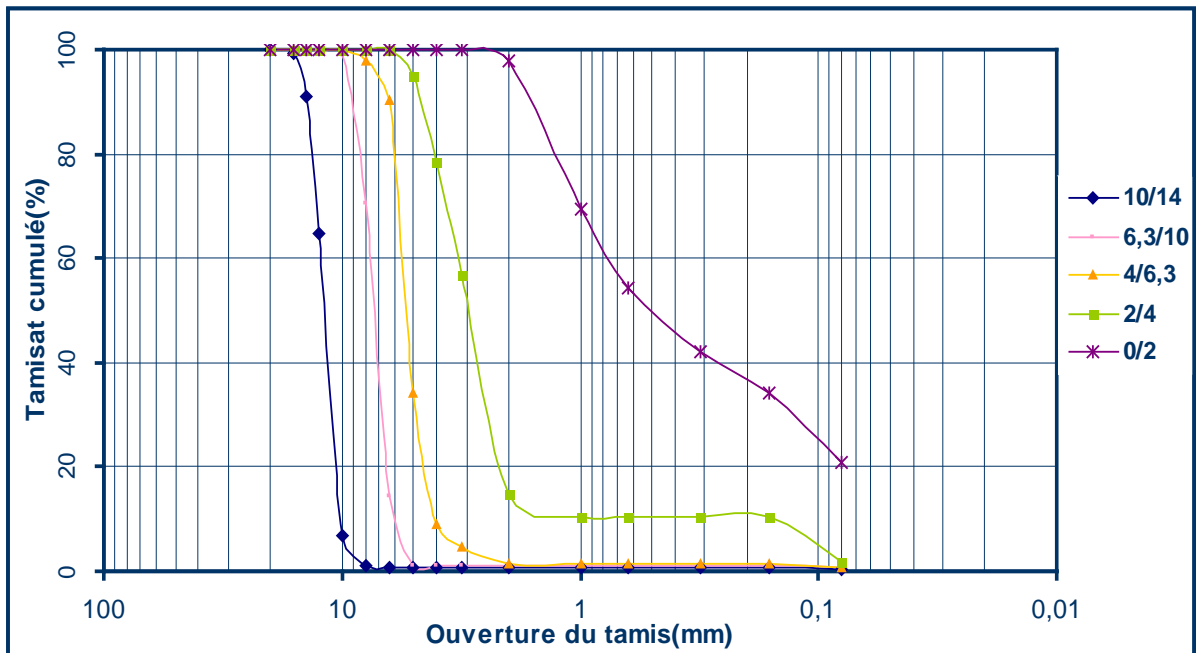


Figure VI.2. Résultats de l'analyse granulométrique des classes routières

Nous remarquons que toutes les classes granulaires présentent une granulométrie continue.

VI.1.4. Caractéristiques des granulats

VI.1.4.1. Caractéristiques de fabrication des granulats

- ❖ La propreté superficielle des granulats : La propreté se traduit par l'absence d'éléments fins dans le granulat, provenant de la pollution de gisement, du concassage des roches, de la mise en stock ou lors du transport des granulats. Ces fines peuvent nous poser des problèmes d'adhésivité.

L'essai de propreté consiste à mesurer le pourcentage d'éléments fins après lavage d'un échantillon donné.

L'échantillon est lavé au tamis 80 μ puis étuvé à 105°C jusqu'au séchage.

Les résultats des essais effectués sur différentes classe granulaire sont présentés dans le tableau VI.6.

Tableau VI.6 : Propreté des granulats.

Classe granulaire	Masse initiale(g)	Masse parés lavage(g)	% de fine
4/6.3	500	12,71	2,54
3/8	500	14,36	2.87
6.3/10	1000	26,90	2.49
10/14	1000	22,80	2,28
8/15	1000	26,93	2.69

Les résultats du tableau VI.6 montrent que toutes les classes granulaires ont des teneurs en fines acceptables.

❖ Le poids spécifique des granulats :

L'essai consiste à déterminer la masse qui constitue un échantillon de granulat par unité de volume.

L'échantillon de matériau sec de masse M_1 , est introduit dans un ballon de volume connu, on complète le volume du ballon avec de l'eau et on pèse le tout la masse est noté M_2 . On détermine en suite La masse M_3 du ballon rempli uniquement avec de l'eau, la masse volumique des granulats ρ_s sera donc égale a $M_1 / (M_3 + M_1 - M_2)$.

Les résultats des essais effectués sur différents échantillons sont donnés par le tableau ci après :

Tableau VI.7 : poids spécifiques des granulats.

Classe granulaire	0/2	0/3	2/4	4/6.3	3/8	6.3/10	10/14	8/15
Poids spécifique	2.71	2,70	2,68	2.68	2.69	2,67	2.67	2.67

❖ Coefficient d'aplatissement noté A :

Les résultats d'essai sur les différentes classes granulaires sont donnés dans le tableau VI.8.

Tableau VI.8 : coefficient d'aplatissement

Classe granulaire	4/6.3	3/8	6.3/10	8/15	10/14
Coefficient d'aplatissement	13,70	15.21	9,40	11.92	12.26

Les résultats du tableau VI.8 montrent que toutes les classes ont des coefficients d'aplatissement acceptable.

VI.1.4.2. Caractéristiques intrinsèques des granulats :

Les caractéristiques intrinsèques testées sont :

- ❖ La résistance a la fragmentation donnée par le coefficient « LOS ANGELES » noté LA.
- ❖ La résistance à l'usure par frottement mesuré par l'essai « MICRO DEVAL » noté MDE.

Ces deux essais se font uniquement sur les classes 4/6.3, 6.3/10 et 10/14.

Les résultats obtenues pour les deux essais sont donnés respectivement par les tableaux VI.9 et VI.10.

Tableau VI.9 : Résultats des essais LOS ANGELES.

Classes granulaires	4/6.3	6.3/10	10/14
Coefficient LOS ANGELES	20	23.40	23

Les résultats des essais MICRO-DEVAL obtenus sont donnés dans le tableau 5.9 :

Tableau VI.10 : Résultats des essais MICRO DEVAL

Classes granulaires	4/6.3	6.3/10	10/14
Coefficient MICRO DEVAL	16.90	18.80	17.60

Le tableau [VI.11] récapitule l'ensemble des résultats des essais effectués sur nos granulats.

Tableau VI.11 : Caractéristiques des granulats

Essai	Référence	0/2	0/3	4/6.3	3/8	6.3/10	8/15	10/14	spécification	
Poids spécifique [t/m ³]	-	2.71	2,70	2,68	2.68	2,67	2.67	2.67	-	
Propreté superficielle [%]	NF P 18-591	-	-	2,54	2.87	2,49	2.69	2.28	< 3	Propre
Coefficient d'aplatissement		-	-	13,70	15.21	9,40	11.92	12.26	< 30	Bon
LA [%]	NF P 18-573	-	-	20		23,40		23	20 ≤ LA ≤ 30	Moyen à faible
MDE [%]	NF P 18-572	-	-	16,90		18.8		17.60	≤ 20	Bon à moyen
Equivalent de sable	NF P 18-597	69	58	-		-			≥ 60%	Sable propre
Essai au bleu de méthylène		-	0,78	-		-			< 1	Sable propre

D'après le tableau VI.11 les matériaux choisis présentent de bonnes caractéristiques intrinsèques et de fabrication, Donc notre choix de matériaux est Bon.

VI.2. BITUME

Le bitume est une variable essentielle dans la constitution de l'enrobe bitumineux. Dans notre cas le bitume utilisé est un bitume de classe 35/50 qui nous a été fourni par l'entreprise EGCR.

Nous avons effectué différentes analyses pour caractériser ce bitume en suivant les normes suivantes :

- La pénétrabilité à l'aiguille NF T66-004,
- Le point de ramollissement bille et anneau « TBA » NF T66-008,
- L'indice de pénétrabilité à cinq températures méthode LCPC,
- La ductilité. NF T66-004,
- Le FTIR (Fourier Transformed InfraRed spectroscopy).

VI.2.1. Caractéristiques du bitume

VI.2.1.1. Essai de pénétrabilité à l'aiguille

La pénétrabilité du bitume représente la mesure de l'enfoncement (exprimé en dixièmes de millimètres) dans un échantillon de bitume, au bout d'un temps de 5 secondes, d'une aiguille dont le poids avec son support est de 100g. C'est donc une mesure de la consistance du bitume. La pénétrabilité la plus couramment utilisée est celle mesurée à 25°C, dans ces conditions, la valeur de pénétration est d'autant plus grande que le bitume est mou,

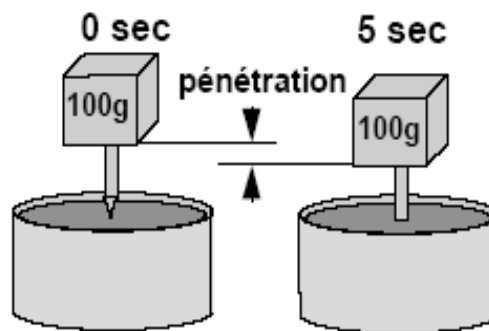


Figure VI.3. Essai de pénétrabilité pour le bitume.

Les résultats de l'essai sont donnés dans le tableau VI.12

Tableau VI.12. Pénétrabilité du bitume

	1 ^{er} essai	2 ^{eme} essai	3 ^{eme} essai	Moyenne
Coupelle N°1	41	42	42	41,66
Coupelle N°2	42	43	42	42,33

Le bitume utilisé est de classe 35/50.

VI.2.1.2. Détermination de la température Bille Anneau

L'essai consiste à déterminer la température (notée TBA) pour laquelle une bille d'acier normalisée traverse un échantillon de bitume maintenu dans un anneau métallique. Il s'agit de la température à laquelle le bitume étudié atteint un certain degré de ramollissement.

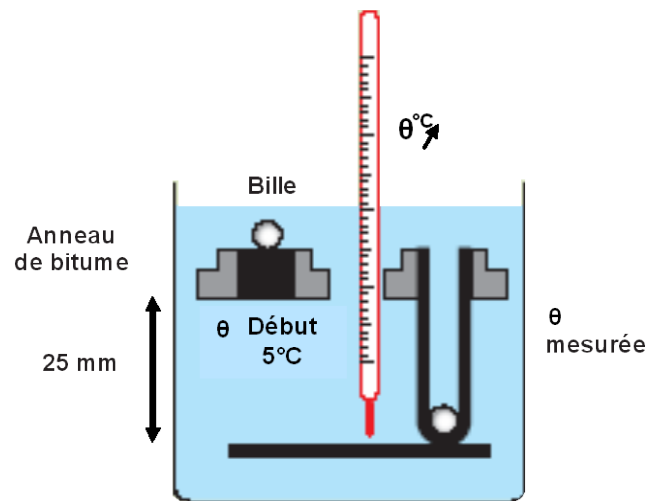


Figure VI.4. Détermination du point de ramollissement

Les résultats de l'essai sont donnés dans le tableau VI.13

Tableau VI.13. Point de ramollissement du bitume

	Température de la 1 ^{er} bille	Température de la 2 ^{eme} bille	Moyenne
Echantillon N°1	51,5	52	51,75
Echantillon N°2	52	52,5	52,25

La température de ramollissement de notre bitume est de 52°C , qui correspond à celle d'un bitume 35/50.

VI.2.1.3. Susceptibilité thermique

La susceptibilité thermique des bitumes est définie par l'évolution de la consistance du bitume en fonction de la température.

En 1936, Pfeiffer et Van Doormaal ont montré l'existence d'une relation linéaire entre le logarithme décimal de la pénétration et la température :

$$\log(Pen) = AT + C$$

Où A est la susceptibilité thermique et C une constante.

La valeur de A varie entre 0,015 et 0,06, ce qui montre l'existence de différences considérables en terme de susceptibilité thermique.

La valeur de A est calculée à partir des mesures de pénétration à deux températures T_1 et T_2 à l'aide de la relation suivante:

$$A = \frac{\log[Pen(T_1)] - \log[Pen(T_2)]}{T_1 - T_2}$$

La susceptibilité thermique des bitumes routiers est représentée par un indice appelé indice de pénétrabilité (I_p) exprimé par la relation suivante :

$$I_p = \frac{20 - 500A}{1 + 50A}$$

L'indice de pénétrabilité peut être évalué par deux méthodes à savoir :

A. La méthode Pfeiffer qui consiste à calculer la valeur de A à partir des mesures de pénétrabilité à 25°C et de la température bille et anneau « TBA » en admettant qu'à cette température la pénétration est de 800 1/10mm.

$$A = \frac{\log(800) - \log(pen.à.25°C)}{TBA - 25}$$

B. La méthode LCPC consiste à calculer l'indice de pénétrabilité à partir de la détermination de la mesure de la pénétration à cinq températures, ensuite on calcule A qui représente la pente de la droite $\log(Pen) = f(T)$.

La valeur de l'indice de pénétrabilité varie de -3 pour les bitumes très susceptibles à la température, jusqu'à environ +7 pour les bitumes les moins susceptibles. plus il est élevé en valeur algébrique, moins le bitume est susceptible.

Nous avons effectués les mesures et les résultats obtenus sont comme suit

Tableau VI.14. la suseptibilité termique du bitume.

Température	pénétrabilité 1	pénétrabilité 2	pénétrabilité 3	Moyenne
20	22	22	23	22,33
25	41	43	42	42
30	54	55	53	54
35	109	109	111	109,67
40	161	163	164	162,66

D'après le tableau si dessus on remarque l'augmentation progressive de la pénétrabilité jusqu'à 30°C, au-delà de cette température cette dernière augmente rapidement.

Pour apprécier la susceptibilité de notre bitume, on trace la droite $\text{Log (Pén)} = f (T)$.

Représenté par la figure VI.5.

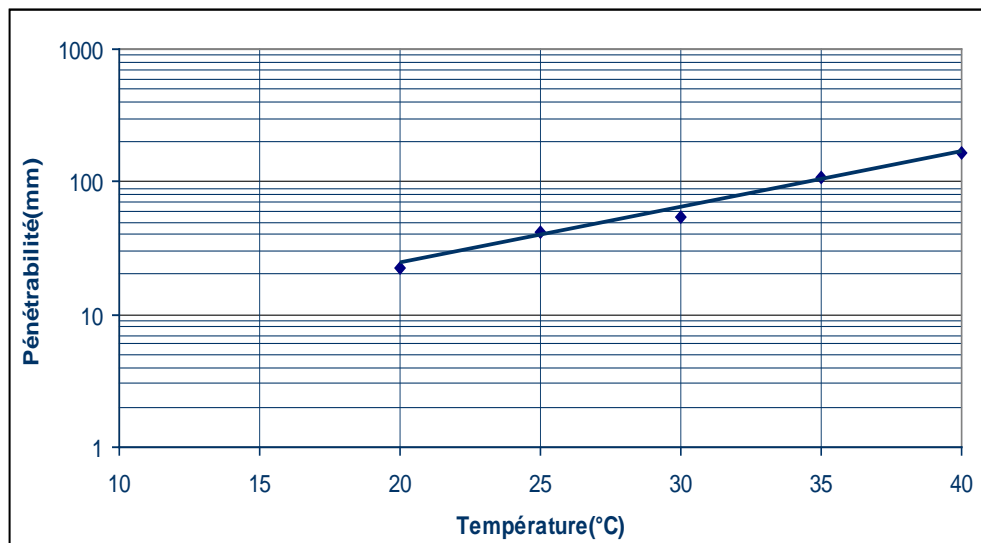


Figure VI.5. La susceptibilité thermique du bitume

A partir du tracé on calcule A (la pente de la droite $\text{Log} [\text{Pen}] = f(T)$), et l'indice de pénétrabilité I_p tel que :

$$I_p = \frac{20 - 500A}{1 + 50A}$$

Tableau VI.15. mesure de la susceptibilité du bitume

	Résultats	Spécification
A	0,0443	0,015 - 0,060
I_p	- 1,13	-3 á + 7

Avec une valeur de « A » qui est égale à 0,0443, et un indice de pénétrabilité de -1,13 notre bitume est un bitume routier.

VI.2.1.4. La ductilité

Cet essai consiste à mesurer l'allongement, à l'instant précis de sa rupture d'une éprouvette de forme déterminée, étirée à une vitesse de 50mm/min, et à une température de 25°C.

La mesure de la ductilité du liant permet de s'assurer de la non fragilité de ce dernier.

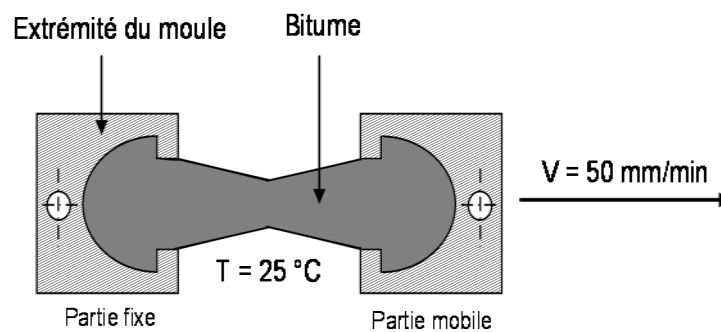


Figure VI.6. Principe de l'essai de Ductilité

La mesure de la ductilité a donnée le résultat suivant

Tableau VI.16. Ductilité du bitume

Résultat (cm)	Spécification (cm)
119	≥ 100

D'après le tableau notre bitume est ductile.

VI.2.1.5. Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test"

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. L'oxydation chimique est violente car l'apport énergétique est intense (température et oxygène de l'air).

Le RTFOT permet de simuler l'évolution d'un bitume pendant la fabrication et la mise en place d'un enrobé bitumineux.

L'essai consiste à soumettre le bitume en film mince à une température de 163 °C, en l'exposant à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé.

On mesure ensuite les propriétés habituelles sur le liant vieilli : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau.

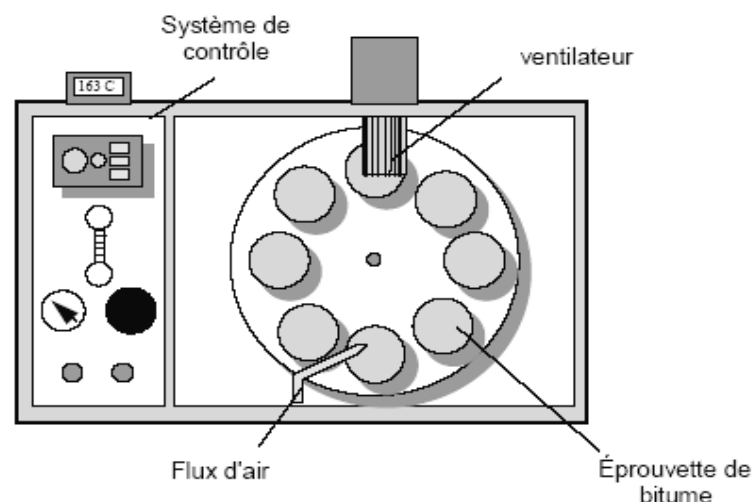


Figure VI.7. Principe de l'essai RTFOT.

Tableau VI.17. Caractéristiques du bitume après RTFOT.

Pénétrabilité a 25°C	Température bille et anneau
24	57,5

Nous remarquons que la pénétrabilité du bitume diminue, et la température de ramollissement augmente;

Le récapitulatif des caractéristiques physiques et mécaniques du bitume pur et donné dans le tableau VI.19,

Tableau VI.18. Caractéristiques du bitume.

Type d'essai	Résultat	Spécification	
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	42	35 - 50	
Température bille et anneau « TBA » (°C)	52	50 - 58	
Densité relative (g/cm ³)	1,03	1,0 - 1,1	
Ductilité à 25 °C (cm)	119	> 100	
Indice de pénétrabilité « IP » (méthode LCPC)	0,31	-	
Après RTFOT	Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	24	-
	TBA (°C)	57,5	> 48
	Pénétrabilité restante [%]	57,14	> 50
	Δ TBA [°C]	5,50	< 9

Les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du bitume pur étudié concordent avec les spécifications.

VI.2.1.6. Caractérisation du bitume par FTIR

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ou FTIR : Fourier Transformed InfraRed spectroscopy) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fractions chimiques présentes dans le matériau.

Cette technique est utilisée pour détecter et analyser les bandes d'oxydation chimique des bitumes.

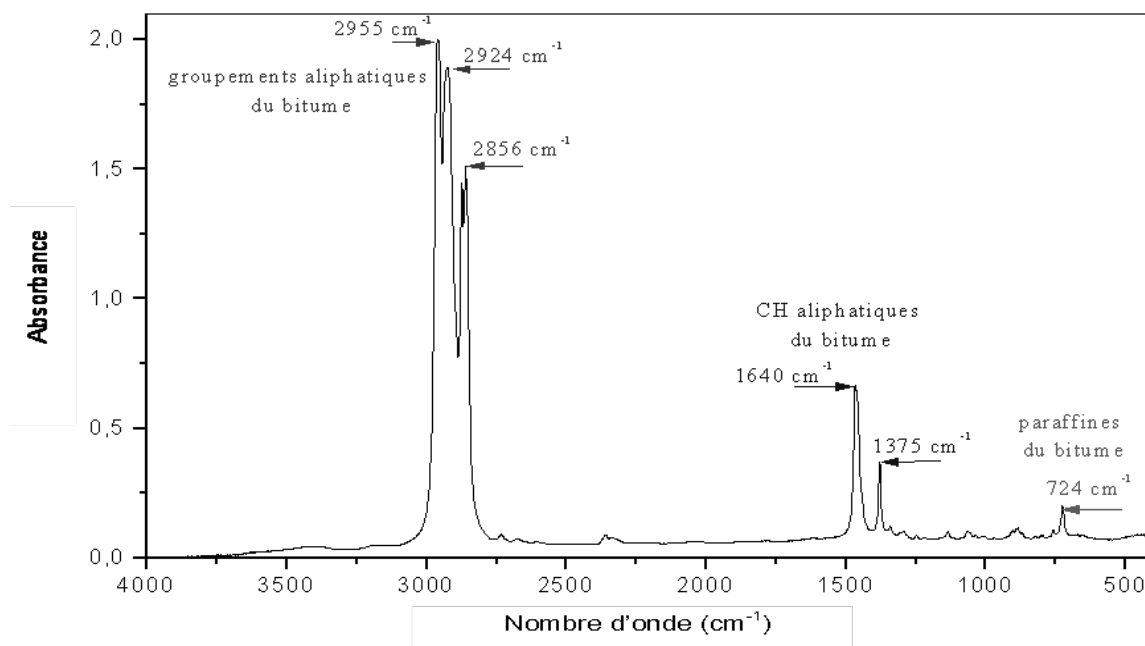


Figure VI.8. Résultats du Spectre FTIR du bitume étudié

L'analyse du spectre montre la présence de trois types de groupement à savoir :

- Groupement aliphatique se déforme de 2955 à 2856 cm^{-1} .
- CH aliphatique se déforme de 1640 à 1375 cm^{-1} .
- Groupement paraffines se déforment à 724 cm^{-1} .

VI.3. LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC

La poudre de caoutchouc utilisée pour la fabrication du liant bitume caoutchouc a été fournie par la société Algérienne SAEL « Société d'Application d'Elastomères ». Cette poudre est issue de la fabrication des joints des buses hydrauliques.



Photo VI.1 L'aspect de la poudrette NR

Le caoutchouc qui compose notre poudrette est un caoutchouc naturel [NR] (Naturel Rubber).

Les analyses que nous avons effectuées sur la poudrette de caoutchouc sont :

- L'analyse granulométrique,
- La densité,
- L'analyse FTIR.

VI.3.1. Caractéristiques de la poudrette

VI.3.1.1. L'analyse granulométrique de la poudrette

Nous avons effectué une analyse granulométrique par tamisage, les résultats sont exposés dans le tableau VI.19

Tableau VI.19. L'analyse granulométrique de la poudre de caoutchouc [NR]

Tamis (μm)	passants cumulés (%)
2000	100
1000	99
630	86,8
500	74
315	44,8
125	4,8
80	0

On s'appuie sur les résultats du tableau VI.19, on trace la courbe granulométrique de notre poudre sur la figure VI.10

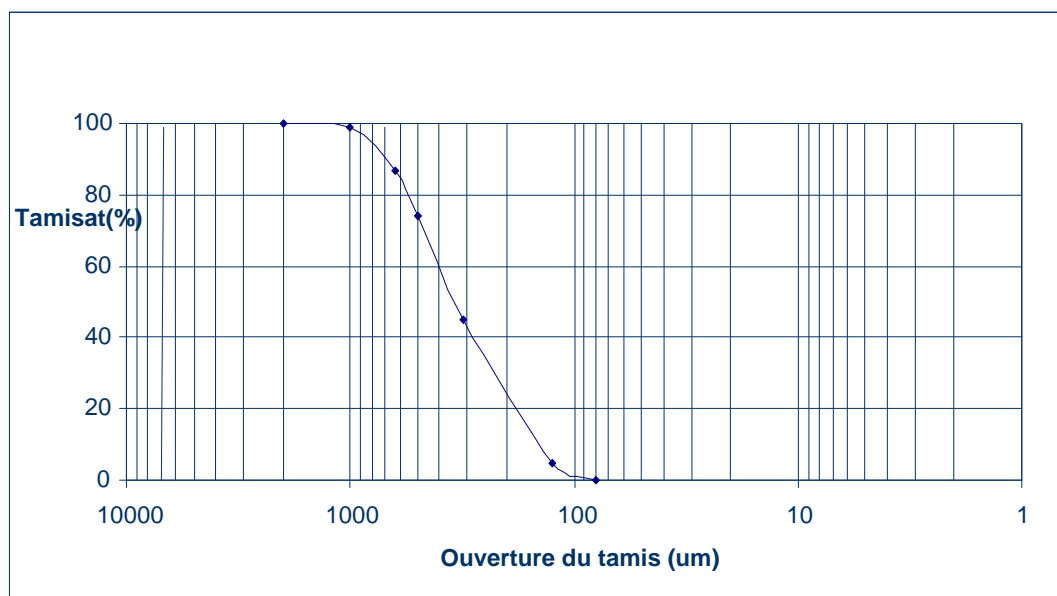


Figure VI.10. Courbe granulométrique de la poudre

La figure VI.10 montre que la poudre de caoutchouc NR présente une granulométrie continue de diamètre maximum de 1mm.

VI.3.1.2. Mesure de la densité de la poudrette

La densité de la poudrette est mesurée par rapport à l'éthanol dont la densité est de 0,79 gr/ml.

Les résultats sont montrés dans le tableau [VI.20].

Tableau VI.20. Densité de la poudrette de caoutchouc [NR].

Poudrette de caoutchouc [NR]	Masse volumique absolue
0 – 1 (mm)	1,21 gr/ml

VI.3.1.3. Caractérisation de la poudrette par FTIR

L'analyse spectroscopique d'absorption a été réalisée sur la poudrette de caoutchouc avec le même matériel et le même mode opératoire utilisé pour le bitume pur.

Il est a noté que :

- L'aspect visuel de notre déchet est celui d'une poudre fine de couleur noire,
- L'odeur est celle d'une matière caoutchouteuse,

Le spectre obtenu pour la poudrette de caoutchouc est représenté dans la figure (VI.11).

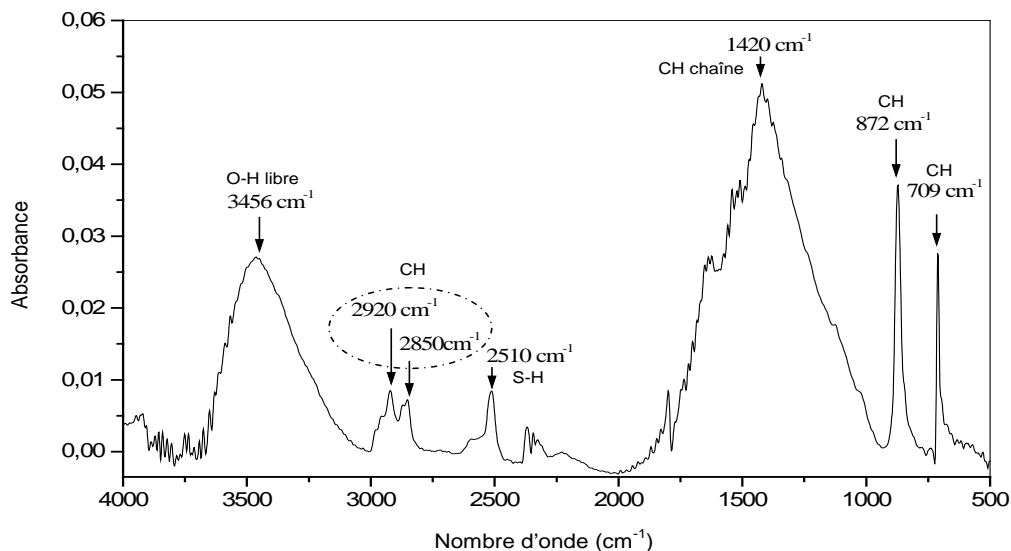


Figure VI.11. Résultat du Spectre FTIR de la poudrette de caoutchouc [NR]

L'analyse du spectre montre :

- la présence de deux bandes larges à savoir :
 - La bande de 3456 cm^{-1} due à la présence des groupements OH non liés, à priori engendrée par l'absorption de l'humidité. Un séchage de l'échantillon s'avère nécessaire pour s'assurer de cette éventualité.
 - Une forte présence des groupements C-H sur Les bandes de 1420 cm^{-1} , $2950\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$, 872 cm^{-1} et 709 cm^{-1} ces groupements sont ceux d'une chaîne macromoléculaire (polymère),
- La bande 2510 cm^{-1} élongation de la liaison S-H, donc la matière a été vulcanisée avec du soufre,

La matière étudiée est un polymère de type NR (Naturel Rubber) vulcanisé avec du soufre,

VI.4 CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à l'identification et l'analyse des différents matériaux utilisés pour réaliser notre travail à savoir les granulats, le bitume et la poudrette de caoutchouc.

Les résultats des essais effectués montrent que les granulats choisis présentent des caractéristiques conformes aux normes et qu'ils sont utilisables en technique routière.

L'analyse de notre bitume nous révèle que le bitume choisi est un bitume routier de classe 35/50, moyennement dur et peu susceptible à la température.

La poudrette de caoutchouc choisie est un déchet de fabrication des buses hydrauliques, de granulométrie inférieure à 1mm et de densité égale à 1.21.

ETUDE DU BITUME MODIFIE

Le bitume pur ne permettant plus aux l'enrobés d'assurer des performances satisfaisantes sous le trafic très lourd et les températures durablement élevées ; la recherche a donc fait appel a la modification de celui-ci pour amélioré ces performances.

Le présent chapitre sera consacré à l'étude de la modification du bitume par la poudrette de caoutchouc etde l'influence de cette modification sur les caractéristiques du bitume.

Pour ce faire, nous avons réalisé les essais suivants :

- La pénétrabilité à l'aiguille NF T66-004,
- Le point de ramollissement bille et anneau « TBA » NF T66-008,
- L'indice de pénétrabilité à cinq températures méthode LCPC,
- La ductilité. NF T66-004,

VII.1. NOMENCLATURE DES MATERIAUX

Pour la suite et Afin de simplifier l'identification des matériaux utilisés obtenus après la fabrication du bitume caoutchouc, nous allons adopter la nomenclature suivante :

Tableau VII.1 Nomenclature des matériaux en fonction de la teneur en NR.

	Bitume « B »						
% NR	0	2	4	6	8	10	12
Référence	B (0)	B (2)	B (4)	B (6)	B (8)	B (10)	B (12)

VII.2. FABRICATION DU BITUME CAOUTCHOUC

VII.2.1. Principe et matériels utilisé

La fabrication du bitume caoutchouc est une opération nécessitant un contrôle strict de tous les facteurs influant sur le comportement du produit final. De plus, il est important de contrôler la constance des facteurs figés afin de limiter au mieux leur effet sur la variabilité du produit final.

Nous adoptons les paramètres de fabrication suivants :

- Température du mélange : 170 +5 °C, (selon la littérature) [8].

- Vitesse de malaxage : 600 tr/min, (selon la littérature).
- Hélice de 5 cm de diamètre fixée à environ 5 mm du fond du récipient,
- Récipient en fer blanc de 11cm de diamètre contenant environ 600g de bitume,
- Durée du malaxage : 2h.
- Le bitume est modifié avec du NR aux teneurs de 2, 4, 6, 8,10et 12%.

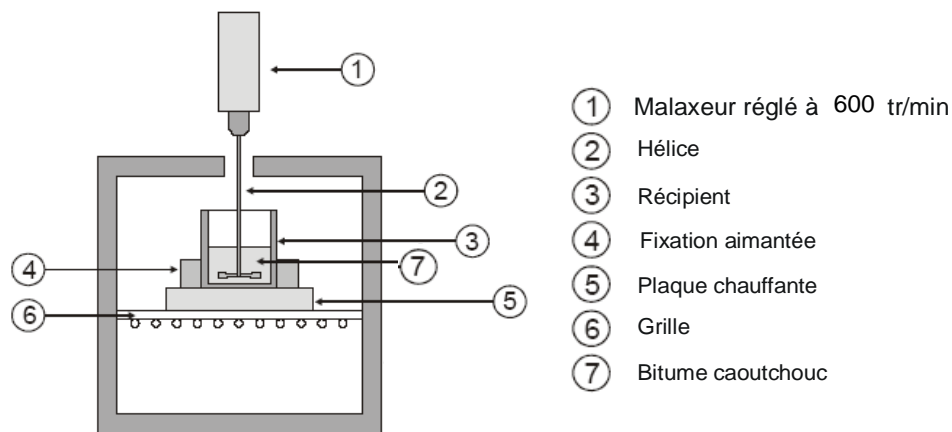


Figure VII.1. Schéma du dispositif utilisé pour la fabrication du bitume modifié

VII.2.2. Mode opératoire

Pour la fabrication du bitume modifié, nous avons adopté le protocole suivant :

- Préchauffer le bitume à 170°C à l'étuve pendant une durée maximale de 60 min.
- Préparer la masse de la poudrette de caoutchouc nécessaire et la chauffer pendant 2 à 3 minutes à la température de malaxage,
- Incorporer progressivement la poudrette de caoutchouc dans le récipient de bitume en homogénéisant le mélange avec l'hélice chauffée,
- Installer le dispositif de la figure (2.8) et régler la plaque chauffante de telle sorte à maintenir la température du mélange bitume caoutchouc à $170 \pm 5^\circ\text{C}$,
- Mettre en marche le malaxeur à une vitesse de malaxage de 600 tr/min,
- Arrêter le malaxeur après le temps de malaxage fixé à 2h.
- Le récipient est vidé immédiatement, on procède à la mesure des caractéristiques physiques et mécaniques des bitumes modifiés.

VII.3. INFLUENCE DE LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC SUR LES CARACTERISTIQUES DU BITUME

VII.3.1. Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité

Les résultats d'évolution de la pénétrabilité en fonction de la teneur en poudrette sont représentés sur la figure [VII.3],

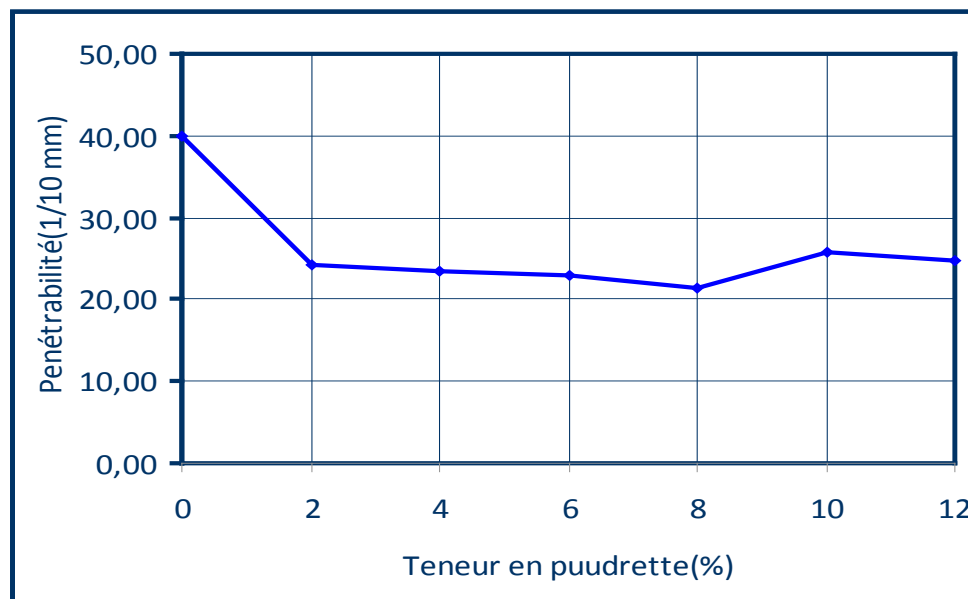


Figure VII.2. Influence de la teneur en poudrette sur la pénétrabilité du bitume

D'après la courbe on remarque une diminution importante de la pénétrabilité à 2% de poudrette, puis la diminution devient moins sensible.

La pénétrabilité minimale est enregistrée pour une teneur de 8% de poudrette.

On constate donc La pénétrabilité diminue avec l'ajout de la teneur en poudrette.

VII.3.2. Taux variation de la pénétrabilité du bitume modifié par rapport au bitume pur

Les résultats de la variation de la pénétrabilité des bitumes modifiés par rapport à celle du bitume de base et avec l'augmentation de la teneur en poudrette de caoutchouc sont représentés dans la figure [VII.3]

Le rapport de variation de la pénétrabilité, pour une teneur en NR [NR%] est calculé à la base de la formule suivante :

$$\text{Rapport de variation Pen } [\%] = \frac{\text{Pén (BP)} - \text{Pén(BM)}}{\text{Pén (BP)}} \times 100$$

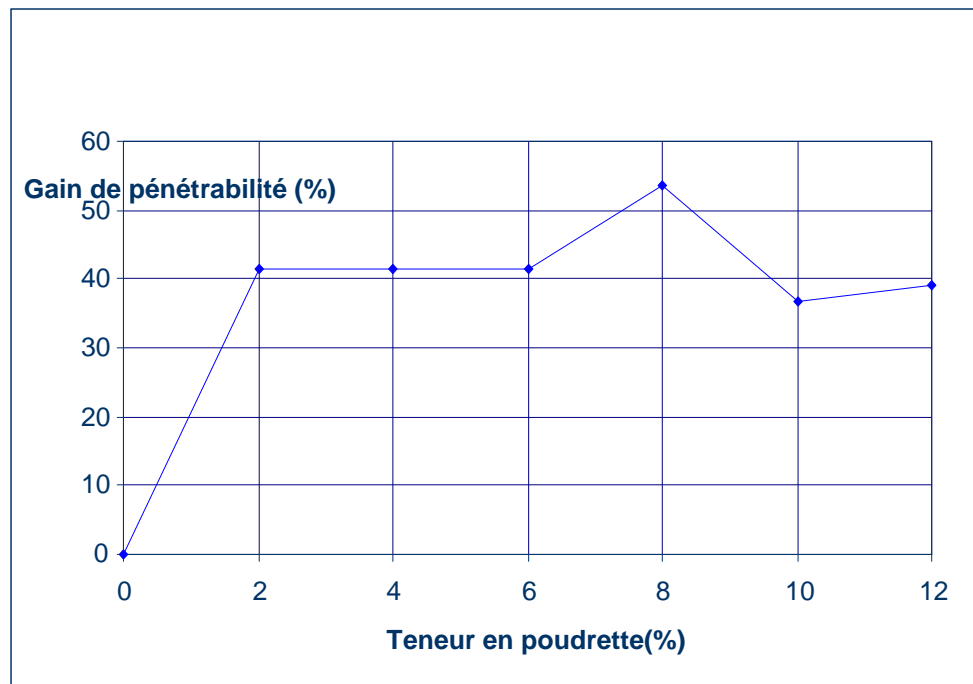


Figure VII.3. Taux de variation de la pénétrabilité du bitume

La courbe de la figure [VII.3] nous montre que :

- Le rapport de variation de la pénétrabilité augmente rapidement pour une teneur de 2% de poudre puis la courbe est pratiquement constante et la valeur maximale est notée pour 8 % de poudre.

VII.3.3. Influence de la teneur en poudre sur la température bille et anneau

Les résultats d'évolution de la température bille et anneau « TBA » en fonction de la teneur en poudre sont représentés sur la figure [VII.4].

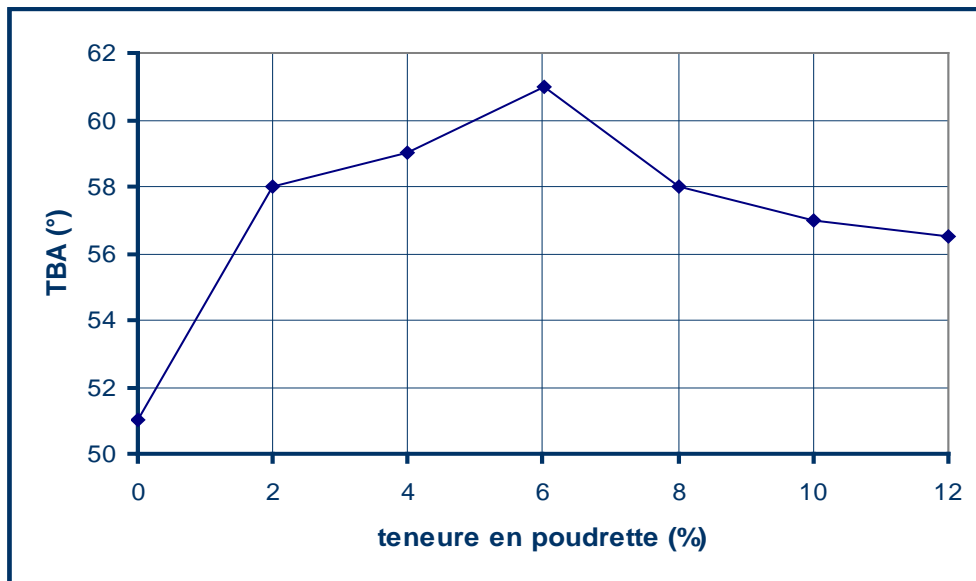


Figure VII.4. Influence de la teneur en poudre sur le point de ramollissement du bitume

La courbe de la figure [VII.4] montre une augmentation rapide de la température de ramollissement du bitume jusqu'à une teneur de 6% de poudre, une légère diminution pour les autres teneurs.

VII.3.4. Taux variation de la température de ramollissement du bitume modifié par rapport au bitume pur

Les résultats de la variation de la pénétrabilité des bitumes modifiés par rapport à celle du bitume de base et avec l'augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc sont représentés dans la figure [6.6].

Le rapport de variation de la température de ramollissement, pour une teneur en NR [NR%] est calculé à la base de la formule suivante :

$$\text{Rapport de variation TBA } [\%] = \frac{\text{TBA (BM)} - \text{Pén(BP)}}{\text{Pén (BM)}} \times 100$$

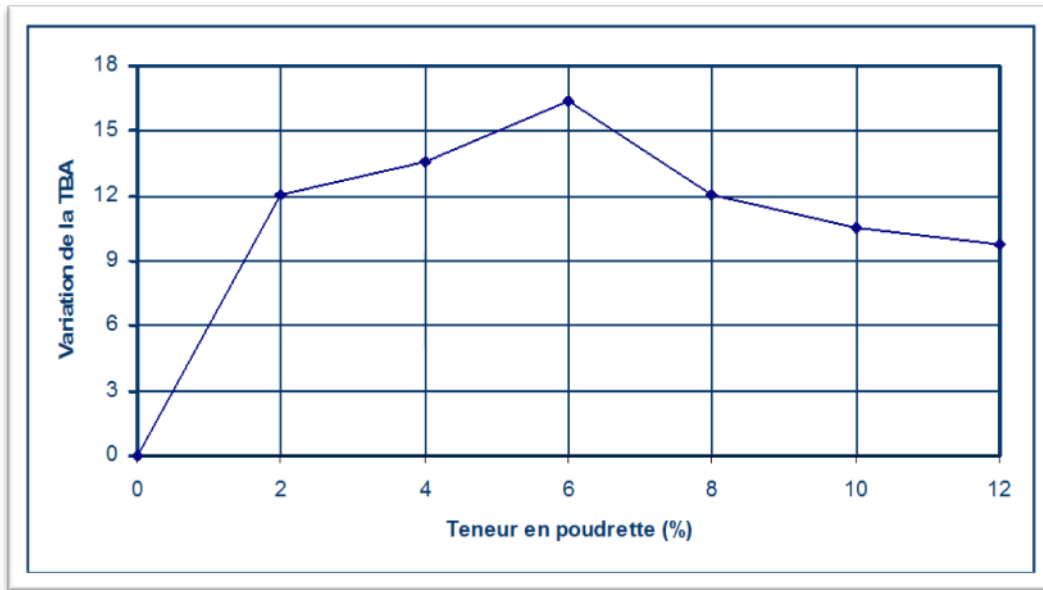


Figure VII.5. Variation du point de ramollissement du bitume en fonction de la teneur en poudre

La courbe de la figure VII.5 présente la même allure que celle de VII.4.

La variation maximal de la TBA est noté pour une teneur de poudre de 6%.

Pour apprécier l'influence de la poudre sur les caractéristiques du bitume la figure VII.5 nous présente la variation de la pénétrabilité et de la TBA dans un seul graphique.

VII.4. CONCLUSION

L'utilisation du déchet du caoutchouc naturel (NR) comme modifiant des liants bitumineux a apporté une amélioration sur les performances de la consistance du bitume pur,

Cette amélioration est traduit par :

- Diminution de la pénétrabilité,
- Augmentation du point de ramollissement,

Le reclassement des bitumes modifiés résultants par rapport aux normes, en fonction du temps de malaxage et de la teneur en NR sont regroupés dans le tableau [2.10] ;

Tableau VII.2. Classement des bitumes modifié en fonction de la teneur en NR.

Bitume	B(0)	B(2)	B(4)	B(6)	B(8)	B(10)	B(12)
Classe	40/50	20/30	20/30	20/30	20/30	20/30	20/30

D'après le tableau [VII.2.], on remarque qu'après la modification on reste, pour tous les bitumes modifiés, dans le domaine des bitumes routiers.

**INFLUENCE DU CALIBRE DES GRANULATS
SUR LE BETON BITUMINEUX**

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

L'enrobé bitumineux est un mélange de granulats minéraux et de liant hydrocarboné dosé dans des proportions convenables. C'est aussi un corps hétérogène auquel le bitume confère un caractère visqueux.

Remarque : dans ce chapitre on va adopter les appellations suivantes :

Enrobé à base de granulats classiques : BBC.

Enrobé à base de granulats usuels : BBU.

VIII.1. FORMULATION DE L'ENROBE BITUMINEUX A BASE DE GRANULATS CLASSIQUES.

Le but de l'étude de la formulation des enrobés bitumineux est la détermination de la teneur optimale en liant pour assurer un certain seuil de stabilité, de compacité, de résistance à l'eau et au fluage.

Une étude de formulation consiste à :

- Choisir un mélange granulaire qui s'insère parfaitement dans le fuseau de spécification des bétons bitumineux fuseau de référence (pour notre cas on utilise le fuseau LCPC BB 0/14).
- Optimiser la teneur en bitume pour satisfaire les spécifications concernant les caractéristique de l'enrobé fabriqué (compacité, résistance mécanique et fluage) en vigueur en Algérie,

VIII.1.1. Détermination de la courbe du mélange

Après avoir analysé les granulats qui constituent notre enrobé bitumineux, on va procéder a la détermination de la composition optimale du mélange granulaire.

Les pourcentages des différentes classe sont déterminés par tâtonnement de manière a avoir une courbe qui s'insère dans le fuseau de spécification.

Nous avons opté pour le mélange granulaire dont la courbe granulométrique est représentée dans la figure [VIII.1],

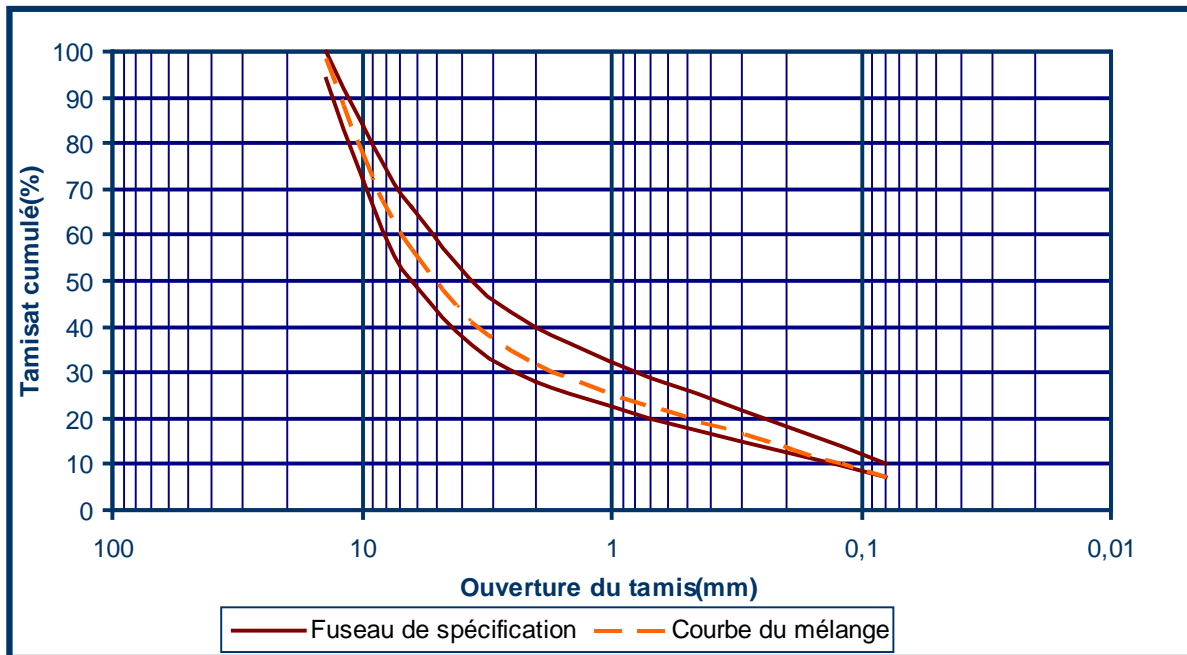


Figure VIII.1. Courbe granulométrique du mélange granulaire du BBC

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

VIII.1.2. Détermination de la Teneur en liant optimale

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

$$\text{Teneur en liant} = \alpha k \sqrt[5]{\Sigma}$$

Avec :

α : coefficient correcteur de la densité tenant compte de la masse volumique réel des granulats « MVG ». Si celle-ci diffère de 2.65 t/m³, on utilise la formule suivante :

$$\alpha = \frac{2.65}{MVG}$$

Σ : surface spécifique des granulats (m²/kg),

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

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

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

$$100 \Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f$$

Avec :

G : pourcentage des éléments de diamètre supérieurs à 6.3 mm,

S : pourcentage des éléments de diamètre compris entre 6.3 et 0.315 mm,

s : pourcentage des éléments de diamètre compris entre 0.315 et 0.08 mm,

f : pourcentage des éléments de diamètre inférieurs à 0.08 mm,

Les teneurs de bitume calculé pour les différentes valeurs de K sont données dans le tableau ci après:

Tableau VIII.1. Teneur en liant en fonction de K

K	3,45	3,60	3,75	3,90
% de bitume	5,61	5,86	6,10	6,35

Le mélange optimal doit avoir :

- ❖ Suffisamment de bitume pour donner un pavage durable.
- ❖ Une stabilité suffisante pour satisfaire les exigences du trafic routier sans déformation.
- ❖ Suffisamment de vides après compactage pour permettre un compactage additionnel léger dû aux charges du trafic.
- ❖ Une maniabilité suffisante pour permettre une mise en place efficace du mélange.

Pour étudier notre enrobé nous allons effectuer des essais Marshall.

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

VIII.1.3. Analyse de l'enrobé à base de granulats classique

L'essai Marshall est un essai mécanique destructif qui répond à la norme NF P 98-251-2.

Il consiste à fabriquer des éprouvettes cylindrique de dimension normalisé (moule Marshall) et de masse $M=1200 \pm 2 \text{ g}$,

Les éprouvettes sont compactés dans les moules à l'aide d'une dame à raison de 50 coups pour chaque face.

Après refroidissement les éprouvettes sont démoulées et immergées dans un bain thermostatique à une température de 60°C pendant 30min, elles seront en suite placées entre les deux mâchoires semi - cylindriques d'une presse qui se rapprochent l'une de l'autre à une vitesse constante.

La charge appliquée et la déformation sont enregistrées jusqu'à la rupture.

L'essai Marshall conduit à la détermination directe de deux paramètres : le fluage (mm) et la stabilité Marshall (kN).

- ❖ La stabilité Marshall est la valeur de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette.
- ❖ Le fluage est la valeur de l'affaissement de l'éprouvette, selon son diamètre vertical au moment de la rupture.

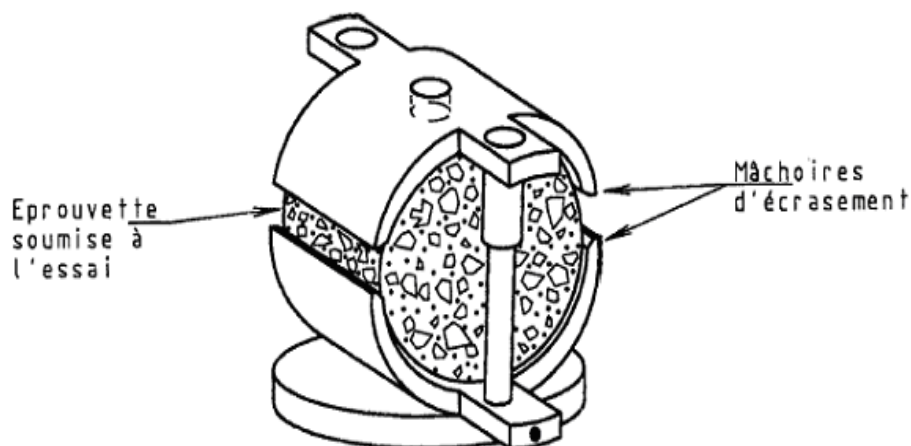


Figure VIII.2.Principe de l'essai Marshall.

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

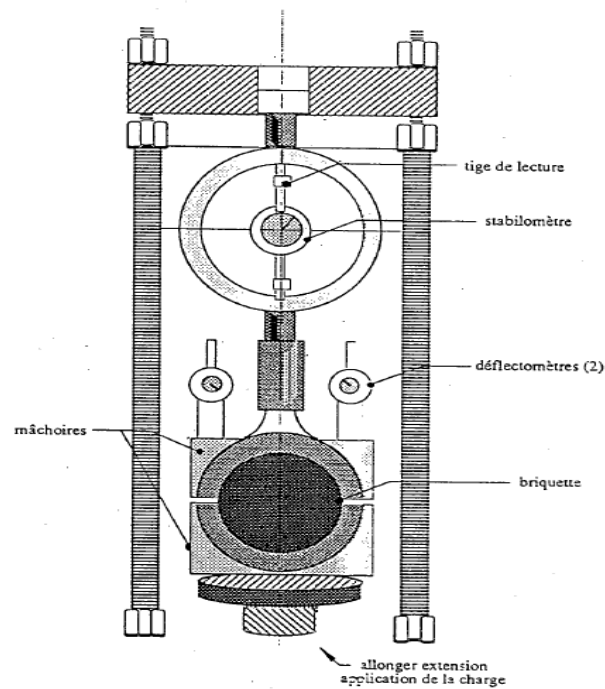


Figure VIII.3. Presse Marshall.

Nous avons fabriqué quatre éprouvettes pour chaque teneur en bitume; l'une pour la mesure de la compacité, et les trois autres seront écrasées.

On détermine aussi les paramètres suivants :

- ❖ La compacité Marshall: c'est le rapport entre la masse volumique apparente et la masse volumique réelle de l'éprouvette.
- ❖ Le quotient Marshall : le rapport entre la stabilité et le fluage.

Les résultats des essais Marshall sur l'enrobé classique sont résumés dans le tableau

[VIII.2] :

Tableau VIII.2. Résultats Marshall de l'enrobé BBC

Teneur en liant	5,61	5,86	6,10	6,35
Stabilité Marshall	9,05	9,61	9,34	8,87
Fluage Marshall	2,60	2,70	2,90	3,10
Compacité	94,87	96,23	96,86	97,31

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

Vides résiduels	5,13	3,77	3,14	2,69
Quotient Marshall	3,48	3,56	3,22	2,86

Ces résultats sont représentés sur les graphiques suivants.

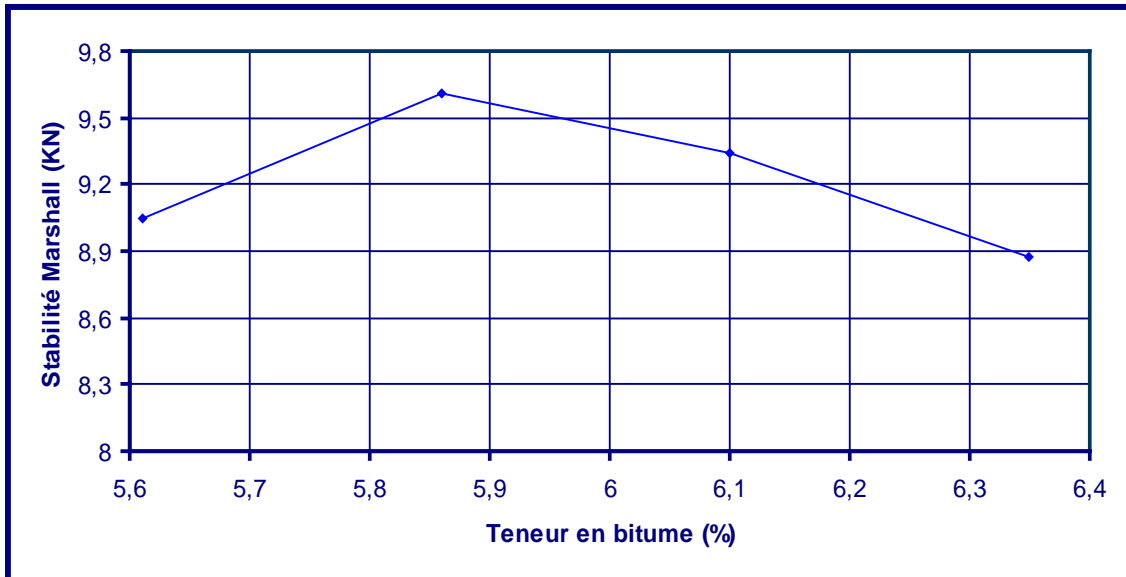


Figure VIII.4 Stabilité Marshall du BBC en fonction de la teneur en bitume

La figure représenté si dessus montre que la stabilité de notre enrobé est maximal pour une teneur en liant de 5.86%.

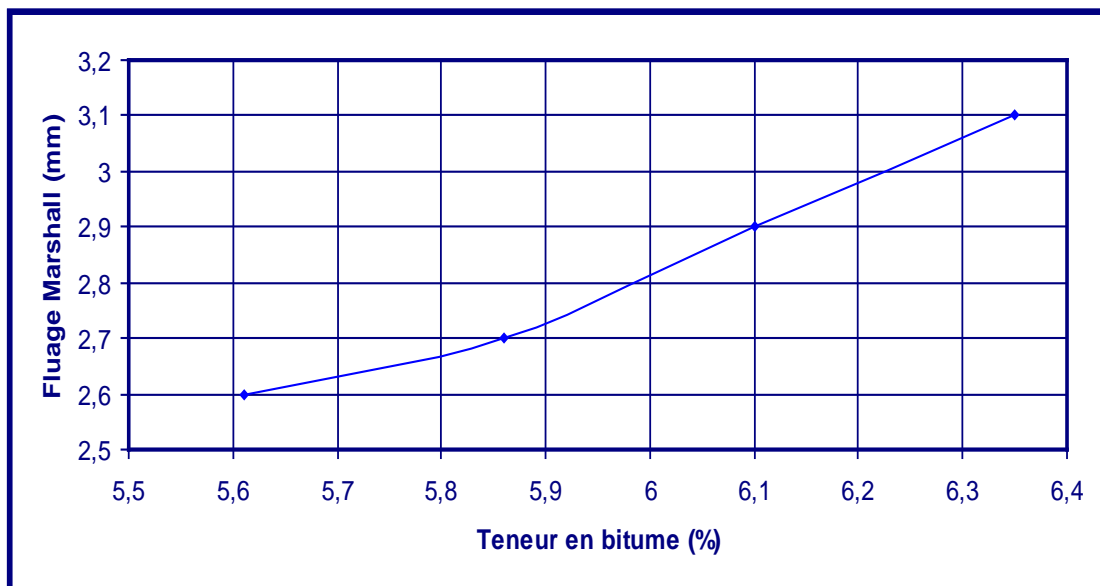


Figure VIII.5. Fluage Marshall du BBC en fonction de la teneur en bitume

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

Le fluage Marshall représenté dans la figure augmente avec l'augmentation de la teneur en liant, avec une valeur minimale noté pour la teneur 5.61%.

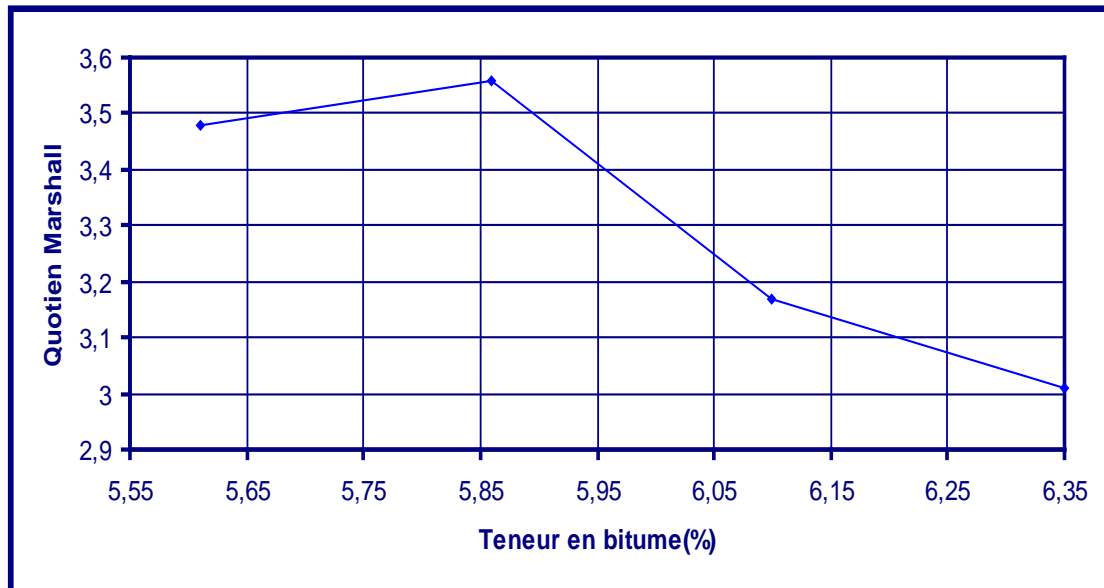


Figure VIII.6. Le quotient Marshall du BBC en fonction de la teneur en bitume

On remarque à partir de cette figure que la valeur maximale du quotient Marshall est obtenue pour une teneur de bitume de 5,86%.

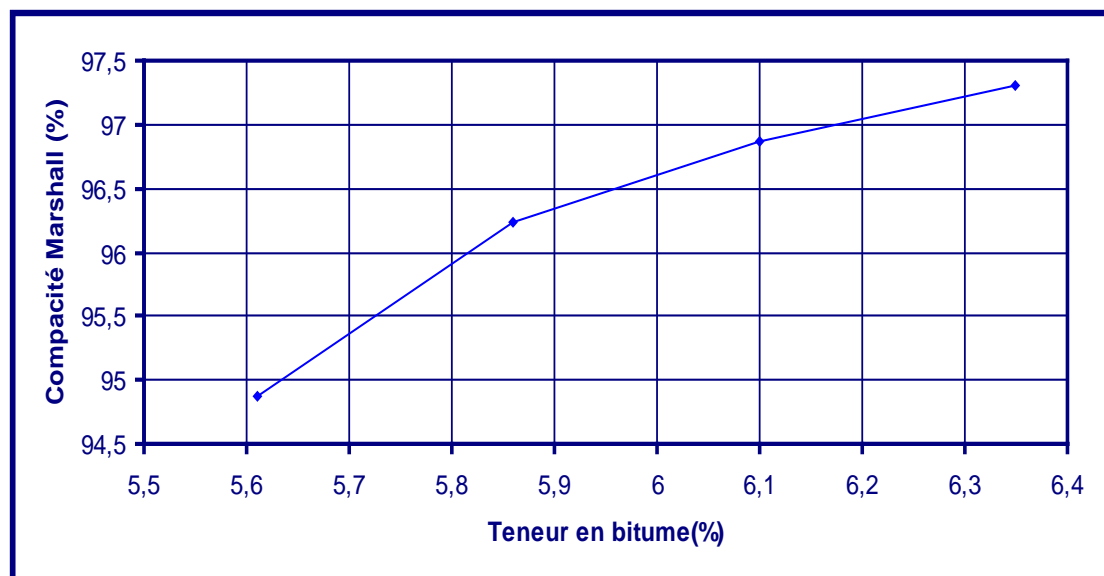


Figure VIII.7. La compacité Marshall du BBC en fonction de la teneur en bitume

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

La compacité de notre enrobé augmente en fonction de l'augmentation de la teneur en bitume, ces valeurs sont inclus entre 94% et 97% ce qui est dans la moyenne des spécifications des enrobe bitumineux.

Le mélange optimal doit avoir :

- ❖ Suffisamment de bitume pour donner un bon enrobage des granulats.
- ❖ Une stabilité suffisante pour satisfaire les exigences du trafic routier sans déformation.
- ❖ Suffisamment de vides après compactage pour permettre un compactage additionnel léger dû aux charges du trafic.
- ❖ Une maniabilité suffisante pour permettre une mise en place efficace du mélange.

A partir de ces résultats nous avons pu en tirer les remarques suivantes:

- ❖ La stabilité augmente avec la teneur en bitume, au-delà d'une teneur de 5,86%, elle rechute.
- ❖ L'augmentation du pourcentage de bitume entraîne une élévation des valeurs du fluage, l'enrobé devient donc plus déformable.
- ❖ La compacité varie proportionnellement avec la teneur en bitume, mais il est à noter que qu'une teneur élevée en bitume teneur en liant un ressuage dans notre enrobé.
- ❖ Pour choisir le mélange idéal le quotient Marshall nous apporte une indication supplémentaire; (un compromis entre la stabilité et le fluage).

La teneur en liant optimale à retenir est de 5,86%.

Nous avons donc opté pour le mélange donné dans le tableau V.III

Tableau VIII.3. Composition de la formule utilisée pour l'enrobé classique.

Fraction granulaire	0/3	3/8	8/15
Pourcentage	40	30	30
Teneur en liant (%)	5,86		

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

VIII.1.4. Résultats

Après avoir choisi le mélange optimal nous allons passer à l'étude de notre enrobé bitumineux.

Les résultats de nos essais Marshall sur l'enrobé classique sont présentés dans le tableau [VIII.4] :

Tableau VIII.4. Résultats de l'essai Marshall du mélange étudié.

	Résultats
Stabilité Marshall (KN)	9,61
Fluage Marshall (mm)	27
Compacité (%)	97,57
% vides résiduels	2,43
Quotient Marshall	3,56

VIII.2. FORMULATION ET ETUDE DE L'ENROBE BITUMINEUX A BASE DE GRANULATS USUEL

La formulation se fait de la même manière que pour l'enrobé a base de granulats usuels.

Nous avons fabriqué les classes granulaires conformes routières à partir classes disponibles sur le marché Algérien.

VIII.2.1 Comparaison des classes granulaires

Pour comparer les classes nous calculons Δ , l'écart granulaire $\Delta = D-d$.

Δ exprime la différence de diamètre existante entre les grains d'une même classe granulaire.

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

Tableau VIII.5. Ecart granulaire

Classes granulaires usuelles	Ecart granulaire Δ	Classes granulaires routières	Ecart granulaire Δ
-----	-----	2/4	02mm
3/8	05mm	4/6,3	02,3mm
-----	-----	6,3/10	3,7mm
8/15	7mm	10/14	04mm
15/25	10mm	14/20	06mm

Le tableau [VIII.5] montre que les classes routières présentent des écarts de diamètre réduits par rapport aux classes classiques, ce qui donne au squelette granulaire un meilleur arrangement.

VIII.2.2. Détermination de courbe granulométrique du mélange

Les nouvelles classes granulaires utilisées dans cette partie étant tirées à partir des classes classiques, auront donc les mêmes caractéristiques de fabrication que ces dernières.

Nous allons vérifier si elles répondent aux exigences générales de granularité pour la formulation de mélanges hydrocarbonés suivant EN 13043.

VIII.2.2.1. Exigences de granularité pour la formulation de mélanges hydrocarbonés.

La norme européenne EN 13043 de septembre 2003 spécifie les exigences des granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation.

Tableau VIII.6. Granularité des classes routières fabriquées au laboratoire

Classe granulaire	0/2	2/4	4/6,3	6,3/10	10/14

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

Passants au tamis 2D (%)	100	100	100	100	100
Passants au tamis 1,4D (%)	-	100	97,78	100	100
Passants au tamis D (%)	96,91	88,42	90,16	98,86	90,96
Passants au tamis d (%)	-	14,92	8,95	14,50	6,69
Passants au tamis d/2 (%)	-	5	1,26	1,19	0,71

D'après le tableau VIII.6. nos classes répondent aux exigences de la norme.

Pour la détermination de la courbe du mélange on procède de la même manière que pour l'enrobé à base de granulats classique.

La courbe du mélange granulaire obtenue est représentée dans la figure VIII.8.

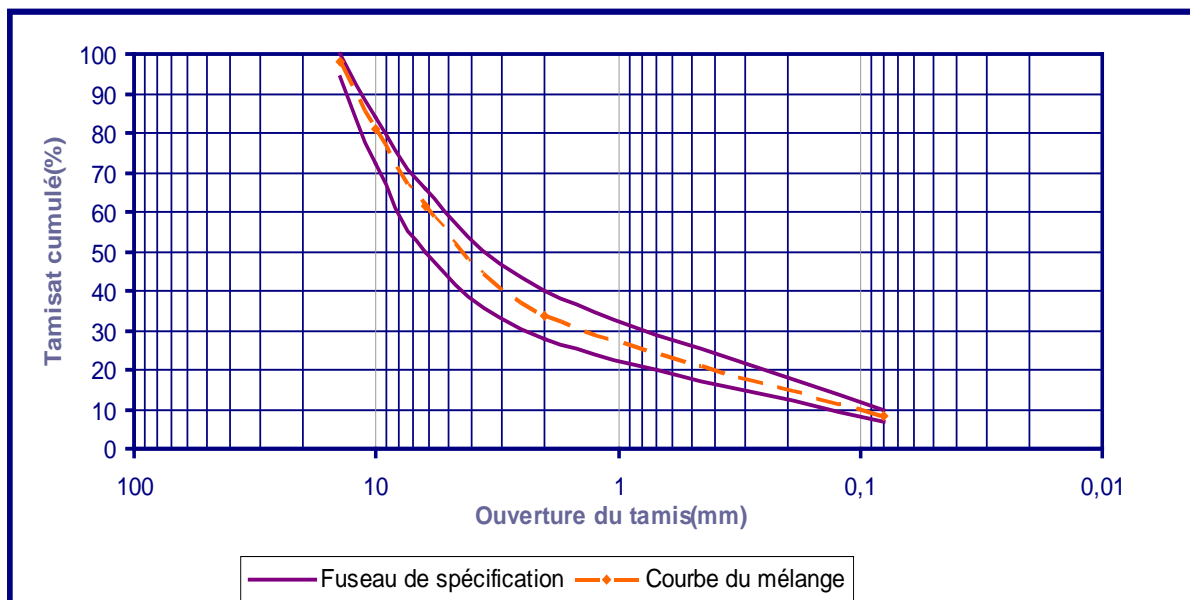


Figure VIII.8. Courbe granulométrique du mélange granulaire à base de granulats routiers

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

VIII.2.3. Détermination de la Teneur en liant optimale

La teneur en liant est calculée avec la formule détaillée dans le chapitre précédent, Les teneurs en liant pour chaque coefficient de richesse sont données dans le tableau VIII.

Tableau VIII.7. Teneur en liant en fonction de K

K	3,45	3,60	3,75	3,90
% de bitume	5,56	5,80	6,05	6,29

Comme pour l'enrobé à base de granulats classique, nous avons fabriqué quatre éprouvettes pour chaque teneur en bitume; l'une pour la mesure de la compacité, et les trois autres seront écrasées, pour déterminer les différents paramètres.

Les résultats des essais Marshall sur l'enrobé fabriqué avec les granulats routiers sont résumés dans le tableau [VIII.8] :

Tableau VIII.8. Résultats Marshall BBU

Teneur en liant	5,56	5,80	6,05	6,29
Stabilité Marshall	9,48	10,11	9,56	9,12
Fluage Marshall	2,24	2,36	2,62	2,90
Compacité	95,17	96,44	97,28	97,71
Vides résiduels	4,33	3,56	2,72	2,29
Quotient Marshall	4,14	4,28	3,65	3,27

Ces résultats sont représentés par les graphiques donnés ci après.

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

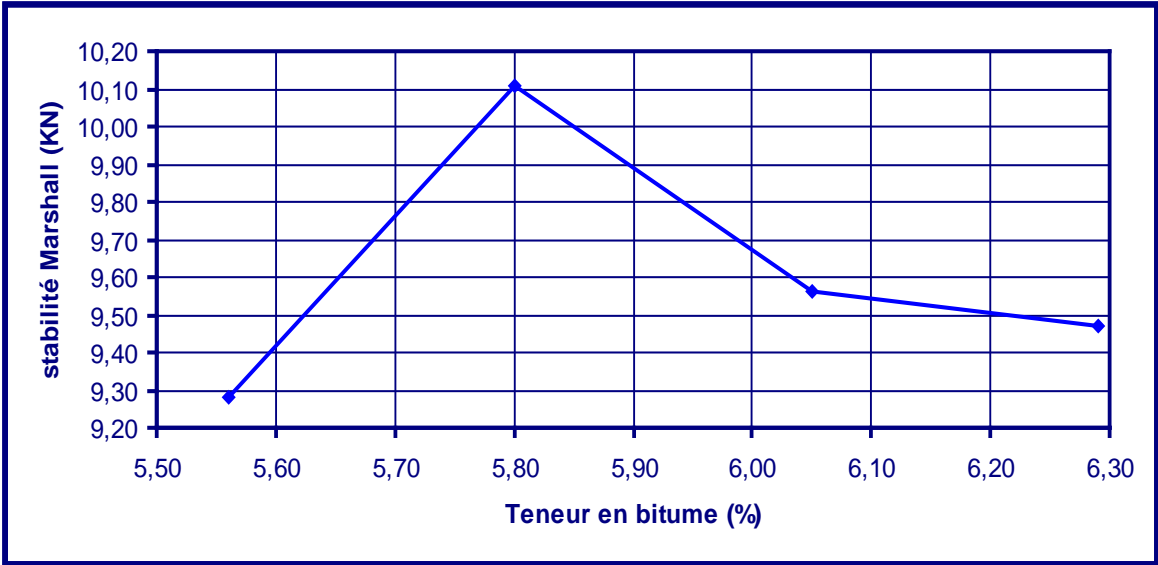


Figure VIII.9. Stabilité Marshall du BBU en fonction de la teneur en bitume

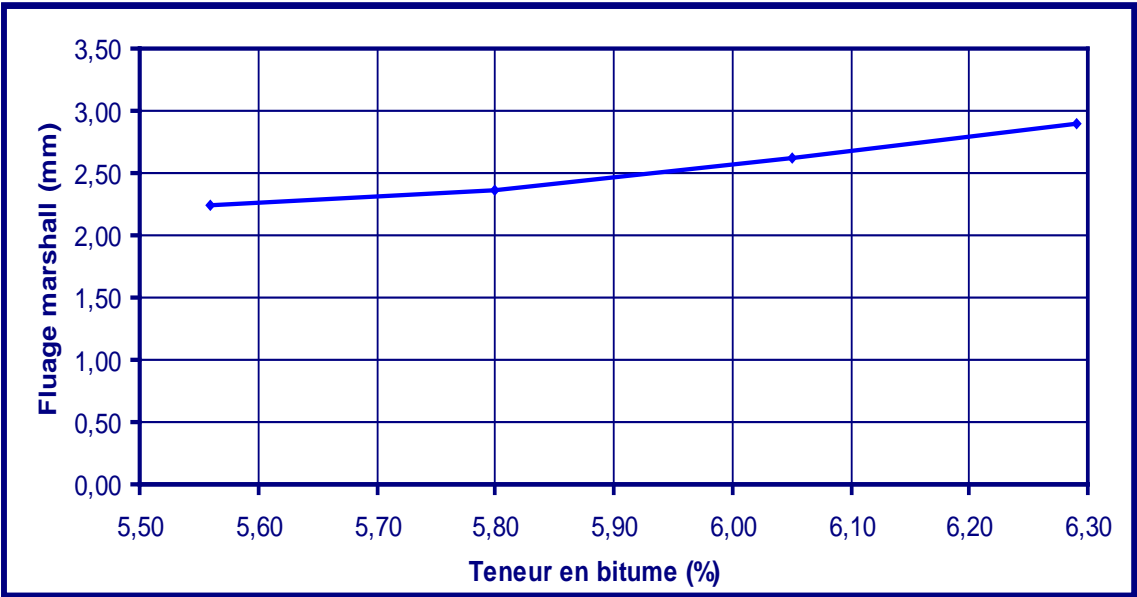


Figure VIII.10. Le fluage Marshall du BBU en fonction de la teneur en bitume

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

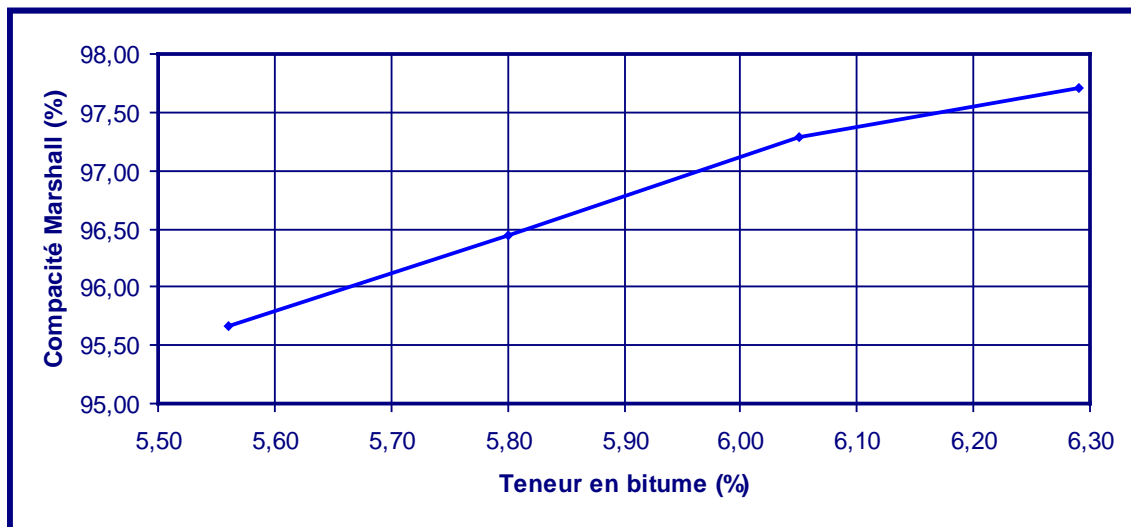


Figure VIII.11. La compacité Marshall du BBU en fonction de la teneur en bitume

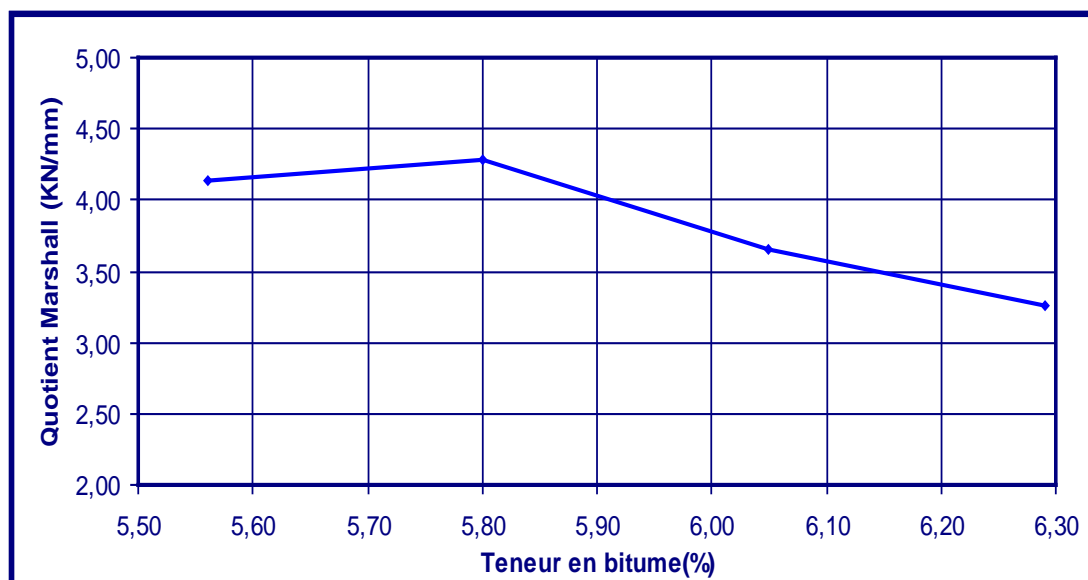


Figure VIII.12 Le quotient Marshall du BBU en fonction de la teneur en bitume

Les résultats obtenus nous montrent que :

- ❖ La stabilité augmente avec la teneur en bitume, au delà d'une teneur de 5,80%, elle commence à chuter.
- ❖ Les valeurs élevées du pourcentage de bitume entraîne une augmentation du fluage, se qui induit a un enrobé plus déformable.
- ❖ La compacité varie proportionnellement avec la teneur en bitume.

La teneur en liant optimale à retenir est de 5,80%.

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

Nous avons donc opté pour le mélange donné dans le tableau VIII.9

Tableau VIII.9. Formule adoptée pour l'enrobé usuel

Fraction granulaire	0/2	2/4	4/6.3	6.3/10	10/14
pourcentage	32	10	18	20	20
Teneur en liant (%)	5,80				

VIII.2.4. Etude de l'enrobé bitumineux à base de classes routières

Les résultats de formulation de l'essai Marshall de l'enrobé fabriqué à base de granulats routiers sont donnés dans le tableau [VIII.10] :

Tableau VIII.10. Résultats de l'essai Marshall du mélange à base de granulats routiers.

	Résultats
Stabilité Marshall (KN)	10,11
Fluage Marshall (mm)	2,4
Compacité (%)	97,76
% vides résiduels	2,43
Quotient Marshall	4,21

VIII.3. Etude comparative des deux enrobés bitumineux

Dans ce paragraphe nous allons effectuer une comparaison entre l'enrobé fabriqué avec les classes classiques (fabriquées par les carrières Algériennes) et celui fabriqué avec les classes usuelles que nous avons fabriquées nous-mêmes.

VIII.3.1. Squelette granulaire

Dans la figure VIII.13 nous avons représenté les courbes granulométriques des deux mélanges granulaires utilisés dans la fabrication des enrobés étudiés.

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

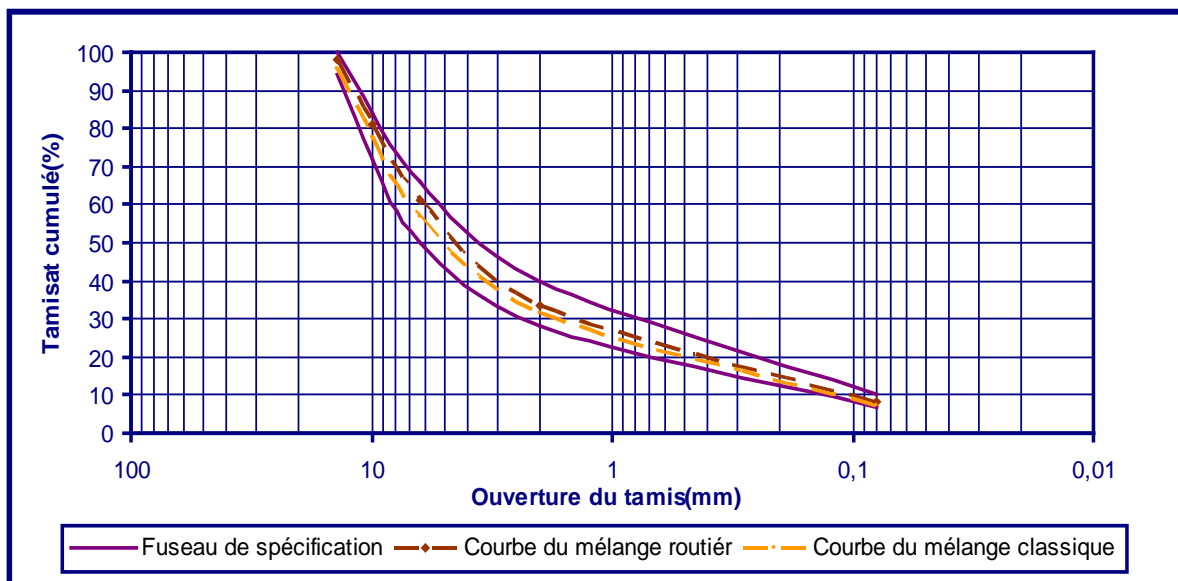


Figure VIII.13. Courbes granulométriques des mélanges granulaires

VIII.3.2. Comparaison des résultats Marshall

Tableau VIII.11. Résultats de l'essai Marshall du mélange à base de granulats routiers.

	Enrobé à base des classes usuelles	Enrobé à base de classes routières
Stabilité Marshall (KN)	9,61	10,11
Fluage Marshall (mm)	2,70	2,40
Quotient Marshall	3,56	4,21

A partir du tableau on trace les graphiques suivants:

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

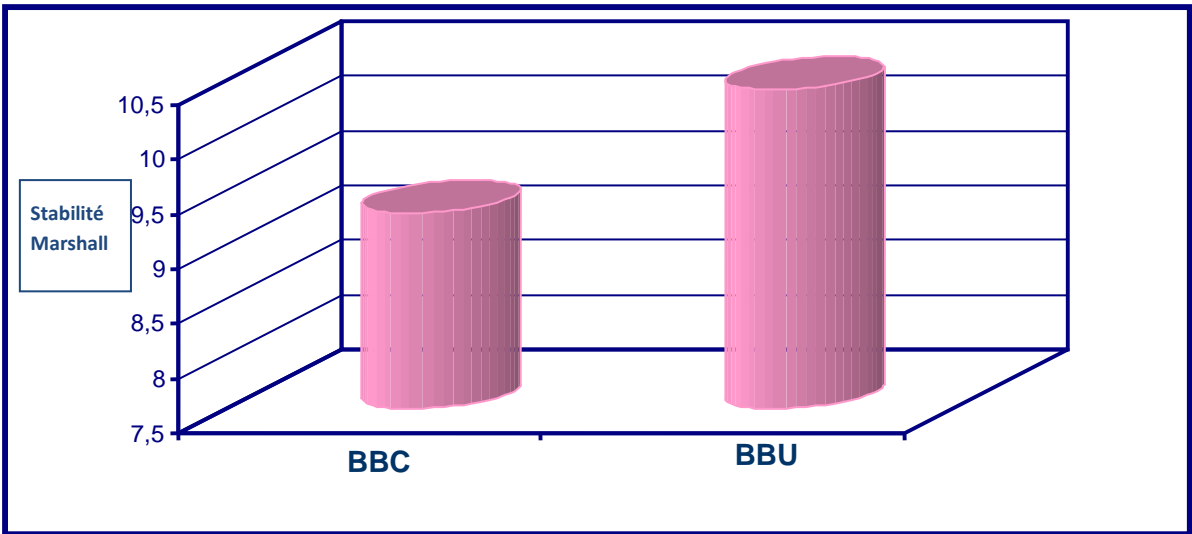


Figure VIII.14. Comparaison entre les stabilités Marshall des deux enrobés

Comme nous le montre la figure l'enrobé fabriqué a base de granulats routier donne une stabilité Marshall meilleure que celle de l'enrobé fabriqué a base de granulats classiques.

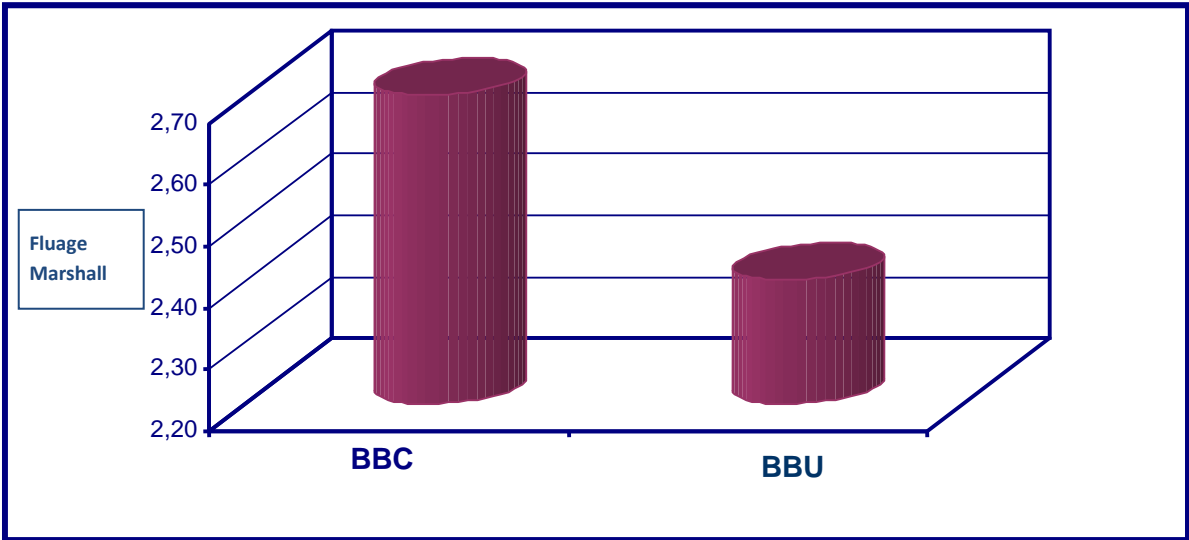


Figure VIII.15. Comparaison entre les fluages Marshall des deux enrobés.

D'après la figure VIII.15 fluage de l'enrobé fabriqué a base de granulats routier et inférieur a celui de l'enrobé fabriqué a base de granulats classiques.

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

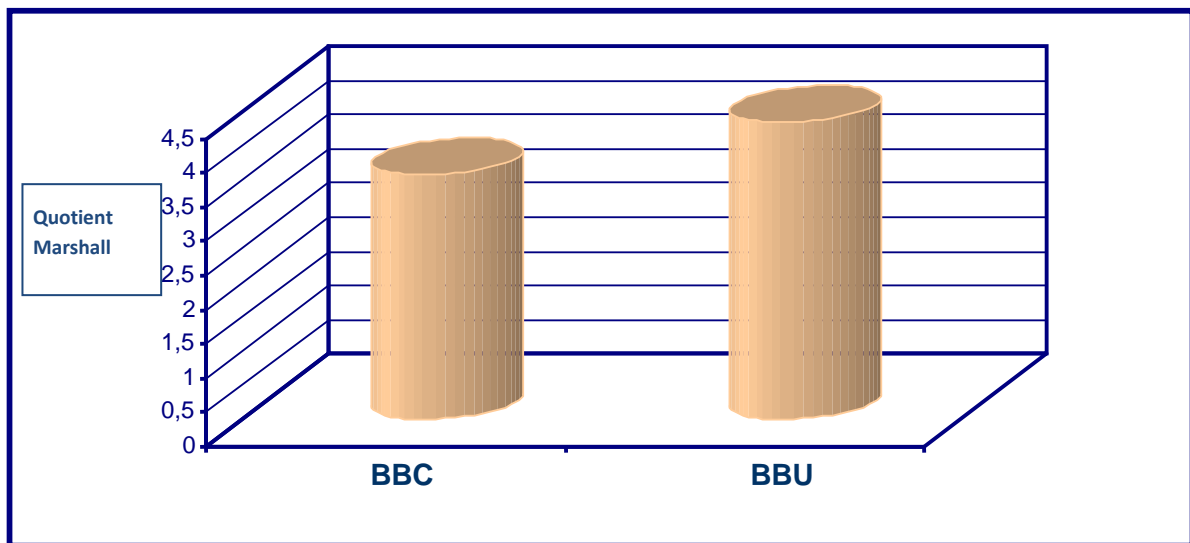


Figure VIII.16. Comparaison entre les quotients Marshall des deux enrobés

A partir des figures précédentes nous constatons que les stabilités obtenues avec l'enrobé fabriqué à base de granulats routiers sont supérieures à celles obtenues avec l'enrobé fabriqué avec les granulats classiques, en ce qui concerne le fluage nous constatons une diminution de celui-ci en utilisant les classes granulaires routières.

Nous avons aussi noté une augmentation de la compacité pour l'enrobé à base de granulats routiers.

VIII.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons essayé de montrer l'importance du calibre des granulats sur les caractéristiques des enrobés bitumineux, pour cela nous avons procédé à la formulation de deux enrobés, le premier fabriqué avec les classes granulaires disponibles dans le marché Algérien et le deuxième est fabriqué avec les classes granulaires utilisées en technique routière.

Nous avons pu voir que l'utilisation des classes granulaires routières a permis d'améliorer les caractéristiques mécaniques de notre enrobé, et cette amélioration est traduite par :

- ❖ Une augmentation de la stabilité Marshall.
- ❖ Une diminution du fluage Marshall de l'enrobé.
- ❖ Une augmentation de la compacité.

Chapitre VIII Influence du calibre des granulats sur les bétons bitumineux

Nous avons noté aussi que la teneur en bitume optimale adoptée pour l'enrobé fabriqué à base de granulats usuels est supérieure à celle adoptée pour l'enrobé fabriqué à base de granulats routier, et cela nous permet de dire que ce dernier est plus économique.

ETUDES DES BETONS BITUMINEUX
MODIFIES

Dans cette partie nous allons étudier l'évolution des caractéristiques Marshall en fonction de la teneur en poudre de caoutchouc naturel NR.

L'essai Marshall nous fournit des indications sur les caractéristiques mécaniques des bétons bitumineux à savoir la stabilité, le fluage, la compacité et le quotient.

Les liants utilisés dans cette partie sont des bitumes modifiés avec du NR dans les teneurs suivantes 2%, 4%, 6%, 8%, 10% et 12%.

L'enrobé sera fabriqué avec la même formulation du chapitre précédent

IX.1. NOMENCLATURE DES MATERIAUX

Pour simplifier l'identification des différents matériaux obtenus après la fabrication de l'enrobé bitumineux modifié, on adopte la nomenclature suivante :

Tableau IX.1. Nomenclature des matériaux en fonction de la teneur en NR.

	Béton Bitumineux « BB »						
% NR	0	2	4	6	8	10	12
Enrobé à base de granulats classiques	BBC (0)	BBC (2)	BBC (4)	BBC (6)	BBC (8)	BBC (10)	BBC (12)
Enrobé à base de granulats usuels	BBU (0)	BBU (2)	BBU (4)	BBU (6)	BBU (8)	BBU (10)	BBU (12)

Remarque: dans ce qui suit, on appelle

BBCM : Béton bitumineux classique modifié.

BBUM : Béton bitumineux usuel modifié.

IX.2. INFLUENCE DE LA TENEUR EN POUDRETTE SUR LES CARACTERISTIQUES MARSHALL DE L'ENROBE MODIFIES

Les résultats des essais Marshall effectués sur les différents enrobés sont regroupés dans les tableaux [IX.2] et [IX.3].

Ces résultats sont schématisés dans les figures suivantes

Tableau IX.2. Caractéristiques mécaniques du BBCM en fonction de la teneur en NR

Béton Bitumineux	BBC (0)	BBC (2)	BBC (4)	BBC (6)	BBC (8)	BBC (10)	BBC (12)
Stabilité Marshall	9,61	9,97	10,19	9,77	10,55	11,37	12,36
Fluage Marshall	2,70	3,15	2,50	3,20	2,15	3,35	4,08
Quotient Marshall	3,56	3,17	4,08	3,05	4,91	3,39	3,03
Compacité	97,57	96,35	95,54	95,64	97,97	95,4	96,8

Tableau IX 3. Caractéristiques mécaniques du BBUM en fonction de la teneur en NR

Béton Bitumineux	BBU (0)	BBU (2)	BBU (4)	BBU (6)	BBU (8)	BBU (10)	BBU (12)
Stabilité Mrashall	10,11	10,48	10,71	10,23	11,18	12,23	12,67
Fluage Marshall	2,40	3,15	2,60	3,05	2,22	3,25	3,80
Quotient Marshall	4,213	3,33	4,12	3,35	5,036	3,763	3,33
Compacité	97,6	96	96,7	96,4	98.4	95,4	95,9

Ces résultats sont tracés sur les graphiques si dessous :

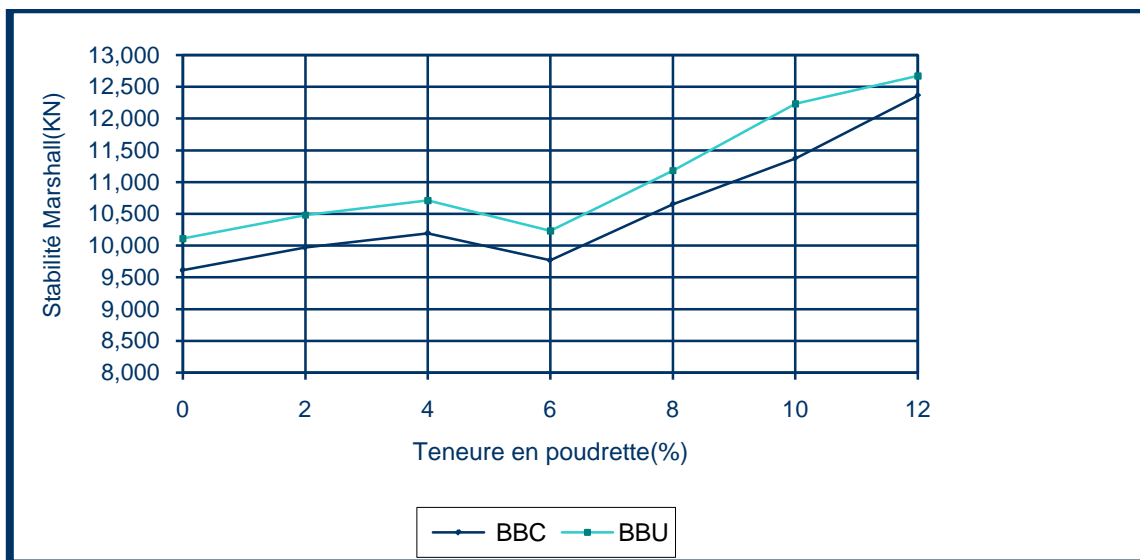


Figure IX.1. La stabilité Marshall des enrobés modifiés en fonction de la teneur en poudre

La courbe de la stabilité Marshall augmente pour les teneurs de 2% et 4% de NR, puis elle diminue 6%, ensuite elle augmente de nouveau jusqu'à 12% de NR,

Avec 12% de NR on obtient la stabilité maximale.

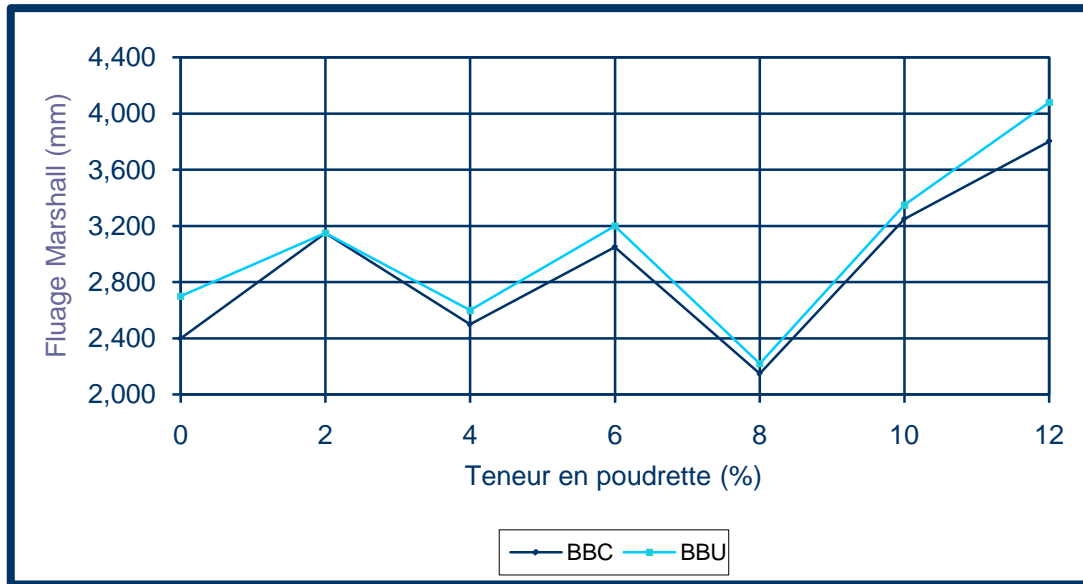


Figure IX.2. Le fluage Marshall des enrobés modifiés EN fonction de la teneur en poudrette

La courbe du fluage Marshall à une allure variable avec trois pics a 2%,6%et 12% de poudrette.

Les valeurs minimales du fluage sont enregistrées pour 4% et 8%de poudrette le fluage.

Donc les enrobés BB (4) et BB (8) sont les moins déformables.

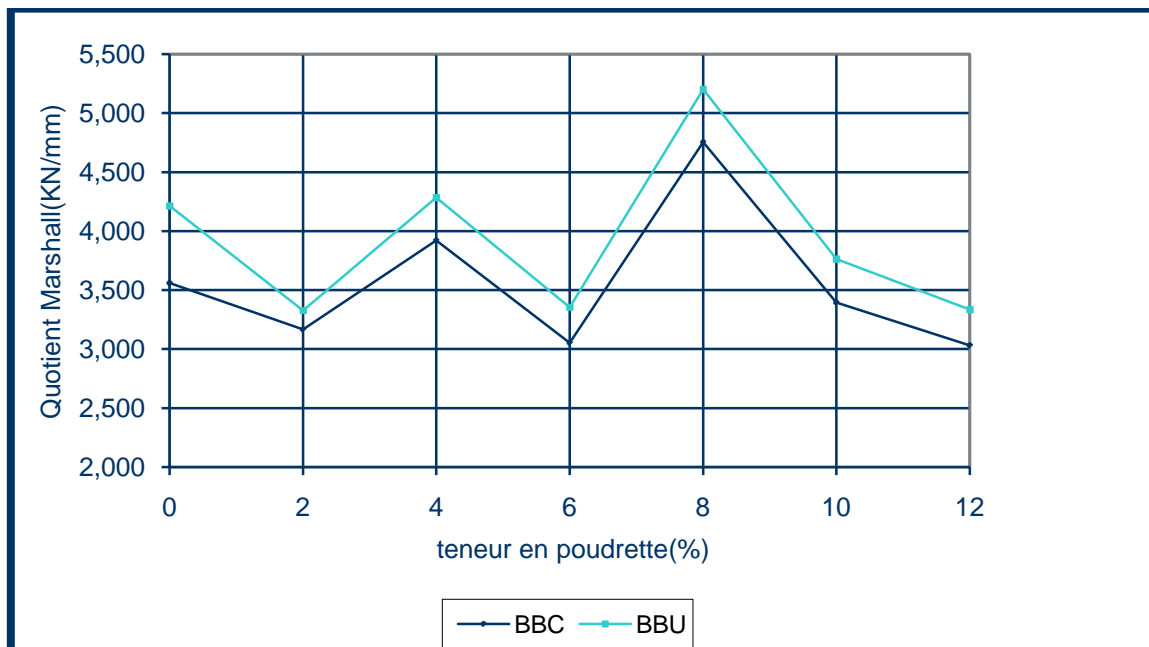


Figure IX.3. Le fluage Marshall des enrobés modifiés EN fonction de la teneur en poudrette

La courbe du Quotient Marshall augmente jusqu'à la teneur 4%, puis on remarque une diminution du quotient à 6%, ensuite elle augmente à 8% de NR pour donner un pic et elle diminue à nouveau pour 10% et 12% de poudrette.

Les courbes nous montrent que les enrobés bitumineux usuels sont des valeurs de stabilités supérieures à celles des enrobés classiques, des valeurs de fluage plus faibles, un quotient Marshall plus élevé et une compacité plus importante.

IX.3. COMPARAISON DU BBU (0) AVEC LE BBCM MODIFIE A DIFFERENTES TENEURS EN POUDRETTE

Les résultats des essais Marshall effectués sur les différents enrobés sont regroupés dans le tableau [IX.4]:

Tableau IX.4. Caractéristiques mécaniques du BBUM en fonction de la teneur en NR

Béton Bitumineux	BBU (0)	BBC (2)	BBC (4)	BBC (6)	BBC (8)	BBC (10)	BBC (12)
Quotient Marshall	4,21	3,17	3,88	3,05	4,91	3,39	3,03
Compacité	97,6	96,35	95,54	95,64	97,97	95,4	96,8

Pour montrer l'influence de l'utilisation des classes granulaires serrées les graphiques suivants nous donnent une comparaison entre les performances Marshall de l'enrobé BBU (0); fabriqué à base de bitume pur et de classes granulaires usuels et les enrobés BBC(2), BBC(4), BBC(6), BBC(8), BBC(10) et BBC(12) fabriqué à base de bitume modifié et de classes granulaires classiques.

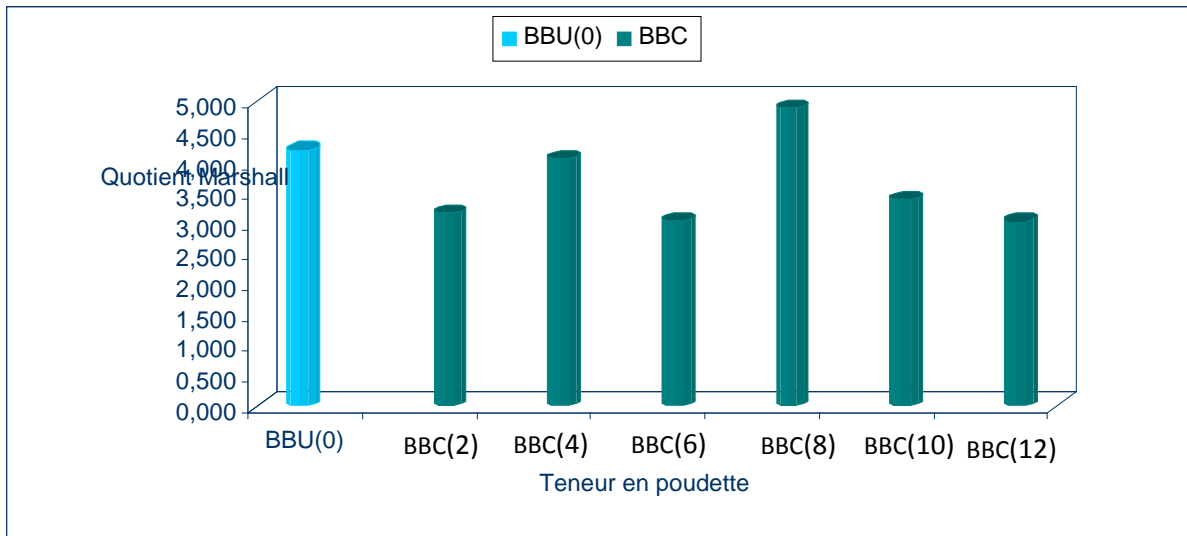


Figure IX.4. Influence du calibre des classes granulaire sur le Quotient Marshall des enrobés bitumineux

D'après la figure 2.36 on peut voir que le quotient Marshall obtenu avec le BBU (0) n'est atteint qu'en arrivant à 8% de poudrette.

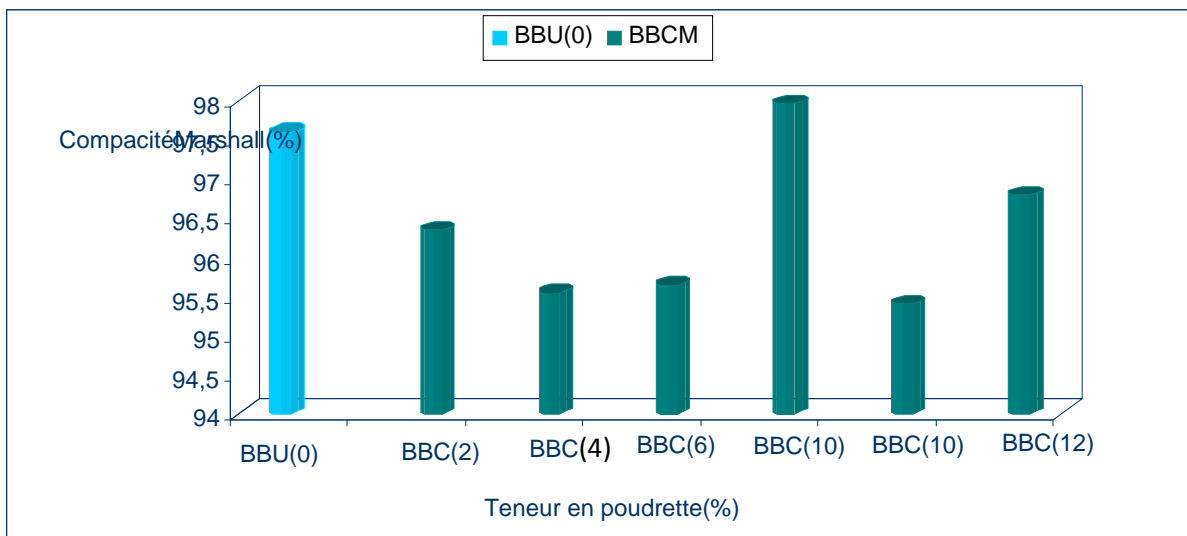


Figure IX.5. Influence du calibre des classes granulaire sur la Compacité Marshall des enrobés bitumineux

La figure ci-dessus montre que la compacité du BBU (0) est pratiquement égale à celle du (BBC) et que toutes les autres compacités sont inférieures à celle-ci.

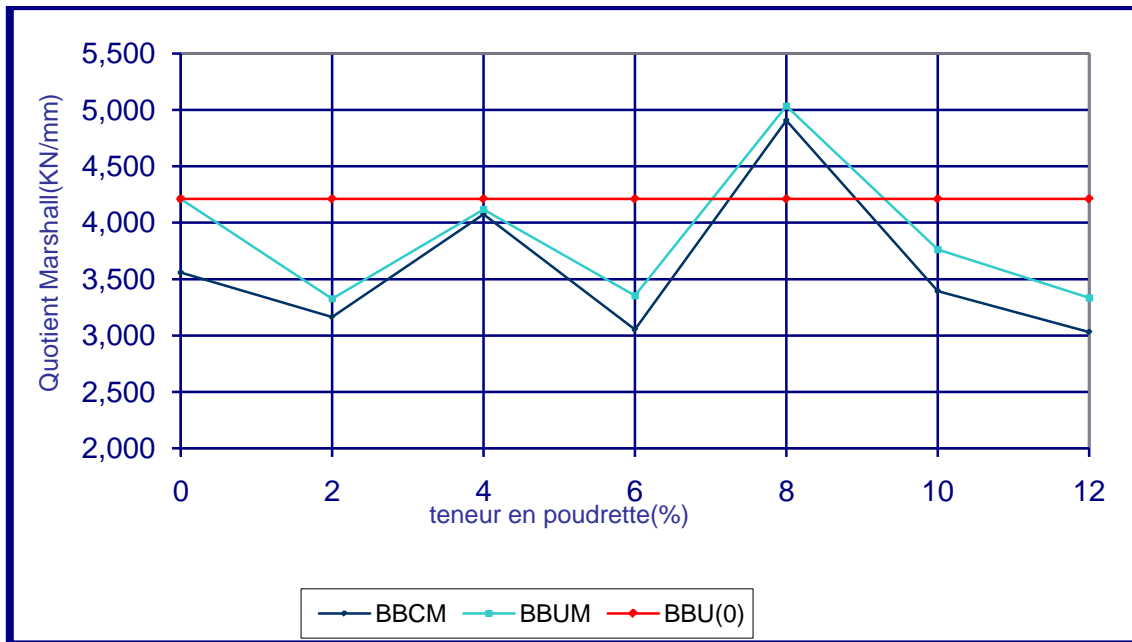


Figure IX.6. Influence du calibre des classes granulaire sur la Compacité Marshall des enrobés bitumineux

IX.4. CONCLUSION :

Notre étude a révélé que Les caractéristiques Marshall obtenues étude montrent que avec un bon calibrage des granulats sont meilleures que celles obtenues après modification du bitume avec ajout de la poudre de caoutchouc naturel (NR) mécaniques du béton bitumineux cette amélioration est caractérisée par :

- ❖ Une augmentation de la stabilité Marshall
- ❖ Une diminution du fluage
- ❖ Une augmentation de la compacité

Nous avons aussi montré que l'amélioration apportée par l'ajout de 8% de poudre (la teneur qui a donné les meilleures performances) est sensiblement proche de celle obtenu on utilisant les classes granulaires spécifiques aux normes routières.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Pour réaliser notre étude expérimentale nous nous sommes basé sur deux grands axes qui sont:

- 1) Etude de l'effet de la modification du bitume avec la poudrette de caoutchouc naturel (NR) (déchet industriel) sur les enrobés bitumineux
- 2) Etude de l'influence du calibre des granulats sur les caractéristiques des enrobés modifiés au (NR)

Pour cela nous avons procédé comme suit

- 1) l'identification des différents matériaux utilisés à savoir les granulats et le bitume.
- 2) Modification du bitume et étude des caractéristiques des liants modifiés.
- 3) Fabrication des classes granulaires normalisées.
- 4) Fabrication et étude des enrobés bitumineux modifiés.

Les résultats obtenus montre que l'utilisation du caoutchouc naturel (NR) comme modifiant améliore les performances du bitume et des l'enrobés bitumineux résultants. En améliorant les caractéristiques physico-chimiques du bitume; cette amélioration est traduite par :

- La diminution de la pénétrabilité
- L'augmentation de la température de ramollissement
- La diminution de la susceptibilité

A travers les résultats obtenues sur les enrobés fabriqués à base de classe granulaires utilisées par les normes routières nous avons pu constater :

- Une augmentation de la stabilité Marshall,
- Une diminution du fluage Marshall,
- Une augmentation du quotient Marshall,

Ce qui nous amène à dire que le calibrage des granulats peut soit amélioré ou bien réduire les performances mécaniques d'un enrobé bitumineux.

Nous avons aussi noté pour les bétons bitumineux fabriqués à base du bitume modifié :

- Une augmentation de la stabilité Marshall.
- Une diminution du fluage Marshall.

Conclusion générale

- Une augmentation du quotient Marshall, ce qui peut nous indiquer une meilleure résistance aux déformations permanentes.

Les résultats obtenus à travers cette étude montrent que l'augmentation de la stabilité obtenue avec un bon calibrage des granulats est plus importante que celle obtenue après modification du bitume.

Notre étude devrait être suivie par une vulgarisation au niveau des acteurs des secteurs des travaux publics et des mines afin de les sensibiliser sur l'importance du respect des normes granulaires.

Références bibliographiques

- [1] **BENLALA. A.HAFID** « Recommandations sur les nouvelles classes granulaires » Novembre 2001
- [2] **Didier Lesueur (septembre 2002)**, «La Rhéologie des Bitumes : Principes et Modification », Eurovia Management – polo de Emulsiones, Rhéologie, Vol.2, 1-30.
- [3] **CODIFICATION DES GRANULATS CONFORME AUX NORMES NBN EN 12620, NBN EN 13043 NBN EN 13139 et NBN EN 13242**
- [4] **François OLARD (2003)**, « **COMPORTEMENT THERMOMÉCANIQUE DES ENROBÉS BITUMINEUX À BASSES TEMPÉRATURES Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé** », Thèse de Doctorat, ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE LYON.
- [5] **HaddadiSmail, (2007)** « **INFLUENCE DE LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC SUR LE COMPORTEMENT AU FLUAGE DES NROBÉS BITUMINEUX** » Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la Technologie Houari Boumediène, Faculté de Génie Civil.
- [6] **K. Ait Mokhtar, S. Saoula, N. Laradi (mai 2005)** « **AMELIORATION DES PERFORMANCES DES ENROBES BITUMINEUX PAR LA MODIFICATION A BASE DE POLYMERE** » Congrès International sur la réhabilitation des constructions et Développement Durable, mai 2005 Alger.
- [7] **K. Ait Mokhtar, (1994)** « **INFLUENCE DE L’AFFINITE LIANT HYDROCARBONE GRANULAT SUR LES CARACTERISTIQUES MECANQUES DES MELANGES HYDROCARBONES** » Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene institut de génie civil.
- [8] **Mehdi OULD-HENIA (2005)**, « **MODELISATION ET PREDICTION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES MELANGES BITUME CAOUTCHOUC** », Thèse de Doctorat, ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE
- [9] **Norme. NF P 18-560** Analyse granulométrique par tamisage
- [10] **Norme. NF P 18-572**, essai d'usure Micro Deval
- [11] **Norme. NF P 18-554**, mesures des masses volumiques
- [12] **Norme. NF P 18-558**, détermination de la masse volumique absolue des fines
- [13] **Norme. NF P 18-561**, mesure du coefficient d'aplatissement
- [14] **Norme. XP P 18-591**, détermination de la propreté superficielle.
- [15] **Norme. XP P 18-575**, mesure du coefficient de polissage accéléré des gravillons.
- [16] **Norme. XP P 18-597**, Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10 % de fines. Décembre 1990
- [17] **Norme. XP P 18-574**, essai de fragmentation dynamique.
- [18] **Norme. XP P 18-571**, détermination de l'homogénéité des granulats ($d \geq 4\text{mm}$).

- [19]Norme. **XP P 18-557**, élément pour l'identification des granulats.
- [20]Norme. **XP P 18-595**, valeur de bleu de méthylène.
- [22]Norme. **XP P 18-576**, mesure du coefficient de friabilité des sables.
- [23]Norme. **NF EN 1426**, détermination de la pénétrabilité à l'aiguille.
- [24]Norme. **NF EN 1427**, détermination de la température de ramollissement - méthode bille et anneau. Janvier 2000
- [25]Norme **NF EN 12697-6**, Détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses.
- [26]Norme. **NF P : 98-251-1**, essai Duriez normal et dilaté. Septembre 2002
- [27]Norme. **NF EN 1097-4**, essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, détermination de la porosité du filler sec compacte. Février 2000
- [28]Norme. **NF EN 1097-7**, essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie7 détermination de la masse volumique réelle du filler- méthode au pycnomètre.
- [29]Norme. **NF P 18-573**, Essai Los Angeles
- [30]Norme. **XP P 18-577**, essai Deval.
- [31]Norme. **NF P 18-598**, Équivalent de sable.
- [32] **OLGA SOLOMATNIKOVA (AVRIL 1998), « COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE ET PROPRIETES COHÉSIVES ET ADHÉSIVES DES LIANTS BITUMINEUX », UNIVERSITÉ LAVAL, FACULTÉ DES SCIENCES ET GÉNIE, CANADA.**
- [33] **Résumé des exigences granulométriques et qualitatives des granulats 2007.**
- [34] **Shell Bitumes (1991), « Bitumes Techniques et Utilisations ».**
- [35]**TECHNOLOGIE DES GRANULATS.**
- [36]**Mm YAICI « ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA PROPRETE DU SABLE SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES ET RHEOLOGIQUES D'UN ENROBE BITUMINEUX».**Mémoire de Magister, Université des sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Faculté de Génie Civil.
- [37] **D.Magramen «AMELIORATION DES PERFORMANCES DES ENROBES BITUMINEUX PAR LA MODIFICATION A BASE DE POLYMERES : POUDRETTE DE CAOUTCHOUC».** Mémoire de Magister, l'Ecole Nationale des Travaux Publics d'Alger –ENTP-2009.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : ELABORATION DES GRANULATS EN CARRIERE	
I.1. INTRODUCTION	4
I.2. LES MATERIAUX DU GENIE CIVIL.....	4
I.2.1. LES MATERIAUX ERUPTIFS OU MAGMATIQUES.....	4
I.2.2. LES MATERIAUX METAMORPHIQUES.....	5
I.2.3. LES MATERIAUX SEDIMENTAIRES MEUBLES	5
I.3. CARRIERES.....	6
I.3.1. LES CARRIERES DE ROCHES MASSIVES	6
I.3.2. LES CARRIERES DE ROCHES MEUBLES	6
I.3.3. LES CARRIERES DE PIERRES DE TAILLE.....	7
I.4. EXPLOITATION DES CARRIERES.....	7
I.4.1. L'EXTRACTION	8
I.4.1.1. Gisements alluvionnaires	8
I.4.1.2. Gisements massifs	9
I.4.1.3. Gisements marins.....	12
I.5. PRODUCTION DE GRANULATS	13
I.5.1. LE MARINAGE.....	14
I.5.2. LE CONCASSAGE ET LE BROYAGE	14
I.5.3. LE CRIBLAGE.....	16
I.5.4. LE LAVAGE.....	17
I.5.5. LE STOCKAGE	19
I.5.6. LE CONTROLE DE QUALITE	21
I.6. CONCLUSION.....	22
Chapitre II : ESSAIS SUR LES GRANULATS	
II.1. INTRODUCTION	24
II.2. ESSAIS CARACTERISANT LES PROPRIETES DE LA FABRICATION	24
II.2.1. L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE.....	24
II.2.2. L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SIDIMENTOMETRIE.....	25
II.2.3. COEFFICIENT D'APLATISSEMENT [EN 933-3]	25
II.2.4. LA PROPRIETE SUPERFICIELLE DES GRANULATS.....	26
II.3. ESSAIS CARACTERISANT LES PROPRIETES INTRINSEQUES.....	27
II.3.1. LA RESISTANCE AUX CHOCS : ESSAI LOS ANGELES NFP 18-573	27
II.3.2. LA RESISTANCE A L'USURE ESSAI MICRO DEVAL NFP 18-572	28
II.3.3. LA FRAGMENTATION DYNAMIQUE NFP 18-574	29
II.4. ESSAIS CARACTERISANT LE SABLE	30
II.4.1. L'EQUIVALENT DE SABLE [NFP 18-597, NFP 18-598, EN 933-8]	30

II.4.2. L'ESSAI AU BLEU DE METHYLENE [EN 933-9].5	30
II.4.3. LA FRIABILITE DES SABLES NFP 18-576.....	31
II.5. CONCLUSION.....	31
Chapitre III: NORMALISATION ROUTIERE EN MATIERE DE GRANULATS	
III.1 INTRODUCTION	33
III.2. LES DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS	33
III.2.1 CLASSEMENT SELON L'ORIGINE DE LA ROCHE	33
III.2.1.1. Les granulats alluvionnaires	33
III.2.1.2. Granulats issus de roches massives.....	33
III.2.2. CLASSEMENT SELON L'UTILISATION	34
III.2.2.1. Granulats recyclés	34
III.2.2.2. granulats de laitier.....	34
III.2.2.3. Les granulats artificiels	35
III.2.3 CLASSEMENT SELON LA DIMENSION	35
III.3 CARACTERISTIQUES DES GRANULATS	36
III.3.1 LES CARACTERISTIQUES DE FABRICATION.....	36
III.3.1.1. La granularité.....	36
III.3.1.2. La forme	37
III.3.1.3. L'angularité.....	37
III.3.1.4. La propreté	37
III.3.2. PROPRIETES INTRINSEQUES.....	37
III.3.2.1. RESISTANCE A LA FRAGMENTATION (CHOCS).....	37
III.3.2.2. Résistance à l'attrition et à l'usure	37
III.5. LA CODIFICATION DES GRANULATS	38
III.5.1. CODIFICATION DES GRANULATS EN FONCTION DE LEURS CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES.....	38
III.5.1.1. Les gravillons et graves.....	38
III.5.1.2. Sables	39
III.5.2. CODIFICATION DES GRANULATS EN FONCTION DE LEURS CARACTERISTIQUES DE FABRICATION	40
III.5.2.1. Granularité	40
III.5.2.2. Teneur en matières organiques	40
III.5.2.3. Degré de concassage des granulats alluvionnaires	40
III.5.2.4. Codification des gravillons.....	41
III.5.2.5. Codification des sables	42
III.6. LES FUSEAUX GRANULOMETRIQUES	42
III.6.1. FUSEAU ENVELOPPE.....	42
III.6.2. FUSEAU DE SPECIFICATION	42
III.6.3. FUSEAU DE FABRICATION	42
III.7. SITUATION EN ALGERIE EN MATIERE DE RESPECT DES NORMES	43
III.7.1. PROVENANCE DES GRANULATS.....	43
III.7.2. LES CARACTERISTIQUES DES GRANULATS.....	44
III.7.2. FUSEAUX GRANULOMETRIQUES ET GRANULARITE:.....	44
III.7.3.RESULTATS DE L'ENQUETE :	47
III.7.3.1 La granularité.....	47
III.7.3.2. Forme et propreté :	47

III.7.3.3. Essais mécaniques	48
III.7.4. RESULTATS	50
III.8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	50
Chapitre IV : LES LIANT HYDROCARBONES	
IV.1. DEFINITION	52
IV.2 COMPOSITION ET STRUCTURE DES BITUMES.....	52
IV.3. LES BITUMES MODIFIES	54
IV.3.1. LES AGENTS MODIFIANT UTILISES	54
IV.3.1.1. Les polymères thermodurcissables.....	55
IV.3.1.2. Les polymères thermoplastiques	55
IV.3.2. LE LATEX	57
IV.3.2.1. Caoutchouc naturel (NR) « Naturel Rubber »	57
IV.3.2.1. Le caoutchouc styrène butadiène (SBR).....	59
IV.3.2.3. Le polychloroprène (CR).....	59
IV.4. LE BITUME CAOUTCHOUC	60
IV.4.1. PROCEDE DE FABRICATION D'UN BITUME CAOUTCHOUC.....	61
IV.4.1.1. Modification par voie humide "Wet process"	61
IV.4.1.2. Modification par voie sèche "Dry process"	61
IV.4.2. INFLUENCE DES PARAMETRES DE FABRICATION SUR LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU BITUME - CAOUTCHOUC [2].....	62
IV.5. CONCLUSION.....	63
Chapitre V: LA NORMALISATION EN MATIERE D'ENROBES BITUMINEUX	
V.1. INTRODUCTION.....	66
V.2. DEFINITIONS.....	66
V.2.1. LES GRAVE BITUME.....	66
V.2.2. LES BETONS BITUMINEUX.....	66
V.3. CONSTITUTION ET CONSTITUANTS DES ENROBES BITUMINEUX.....	66
V.3.1. LES GRANULATS.....	67
V.3.1.1. Les fines.....	67
V.3.1.2 Les sables	67
V.3.1.3. Les gravillons	67
V.3.2. LE BITUME.....	68
V.4. FORMULATION DES ENROBE BITUMINEUX	68
V.4.1. SELECTION DU SQUELETTE GRANULAIRE.....	68
V.4.2. DETERMINATION DE LA TENEUR EN LIANT	69
V.5. LES PROPRIETES D'USAGE DES BETONS BITUMINEUX.....	70
V.6. INFLUENCE DE LA GRANULOMETRIE SUR LA QUALITE D'UN BETON BITUMINEUX	71
V.7. CONCLUSION.....	72

Chapitre VI PRESENTATION ET ANALYSE DES MATERIAUX

VI.1. LES GRANULATS	75
VI.1.1. ORIGINE DES GRANULATS ET DU SABLE	75
VI.1.2. ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE	75
VI.1.3. ANALYSE GRANULOMETRIQUE	77
VI.1.4. CARACTERISTIQUES DES GRANULATS	81
VI.1.4.1. Caractéristiques de fabrication des granulats.....	81
VI.1.4.2. Caractéristiques intrinsèques des granulats :	83
VI.2. BITUME	84
VI.2.1. CARACTERISTIQUES DU BITUME	85
VI.2.1.1. Essai de pénétrabilité à l'aiguille.....	85
VI.2.1.2. Détermination de la température Bille Anneau.....	86
VI.2.1.3. Susceptibilité thermique	87
VI.2.1.4. La ductilité	89
VI.2.1.5. Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test".....	90
VI.2.1.6. Caractérisation du bitume par FTIR	92
VI.3. LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC	92
VI.3.1. CARACTERISTIQUES DE LA POUDRETTE.....	93
VI.3.1.1. L'analyse granulométrique de la poudrette.....	93
VI.3.1.2. Mesure de la densité de la poudrette.....	95
VI.3.1.3. Caractérisation de la poudrette par FTIR	95
VI.4 CONCLUSION.....	96
Chapitre VII :ETUDE DU BITUME MODIFIE	
VII.1. NOMENCLATURE DES MATERIAUX	97
VII.2. FABRICATION DU BITUME CAOUTCHOUC	97
VII.2.1. PRINCIPE ET MATERIELS UTILISE	97
VII.2.2. MODE OPERATOIRE.....	98
VII.3. INFLUENCE DE LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC SUR LES CARACTERISTIQUES DU BITUME.....	99
VII.3.1. INFLUENCE DE LA TENEUR EN NR SUR LA PENETRABILITE	99
VII.3.2. TAUX VARIATION DE LA PENETRABILITE DU BITUME MODIFIE PAR RAPPORT AU BITUME PUR	99
VII.3.3. INFLUENCE DE LA TENEUR EN POUDRETTE SUR LA TEMPERATURE BILLE ET ANNEAU	100
VII.3.4. TAUX VARIATION DE LA TEMPERATURE DE RAMOLLISSEMENT DU BITUME MODIFIE PAR RAPPORT AU BITUME PUR	101
VII.4. CONCLUSION.....	102
Chapitre VIII: INFLUENCE DU CALIBRE DES GRANULATS SUR LE BETON BITUMINEUX	
VIII.1. FORMULATION DE L'ENROBE BITUMINEUX A BASE DE GRANULATS CLASSIQUES.	105
VIII.1.1. DETERMINATION DE LA COURBE DU MELANGE	105
VIII.1.2. DETERMINATION DE LA TENEUR EN LIANT OPTIMALE	106
VIII.1.3. ANALYSE DE L'ENROBE A BASE DE GRANULATS CLASSIQUE	108
VIII.1.4. RESULTATS	113
VIII.2. FORMULATION ET ETUDE DE L'ENROBE BITUMINEUX A BASE DE GRANULATS USUEL	113
VIII.2.1 COMPARAISON DES CLASSES GRANULAIRES	113

VIII.2.2. DETERMINATION DE COURBE GRANULOMETRIQUE DU MELANGE	114
VIII.2.2.1. Exigences de granularité pour la formulation de mélanges hydrocarbonés.	114
VIII.2.3. DETERMINATION DE LA TENEUR EN LIANT OPTIMALE.....	116
VIII.2.4. ETUDE DE L'ENROBE BITUMINEUX A BASE DE CLASSES ROUTIERES	119
VIII.3. ETUDE COMPARATIVE DES DEUX ENROBE BITUMINEUX	119
VIII.3.1. SQUELETTE GRANULAIRE	119
VIII.3.2. COMPARAISON DES RESULTATS MARSHALL	120
VIII.4. CONCLUSION.....	122
Chapitre IX :ETUDES DES BETONS BITUMINEUX MODIFIES	
IX.1. NOMENCLATURE DES MATERIAUX	125
IX.2. INFLUENCE DE LA TENEUR EN POUDRETTE SUR LES CARACTERISTIQUES MARSHALL DE L'ENROBE MODIFIES	125
IX.3. COMPARAISON DU BBU (0) AVEC LE BBCM MODIFIE A DIFFERENTES TENEURS EN POUDRETTE.....	128
IX.4. CONCLUSION	130
CONCLUSION GENERALE.....	132