

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département
GENIE CIVIL

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vu de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie civil

Thème :

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

**Amélioration des performances
d'un béton bitumineux**

Proposé par :

M^{me} : R. KETTAB

Réalisé par :

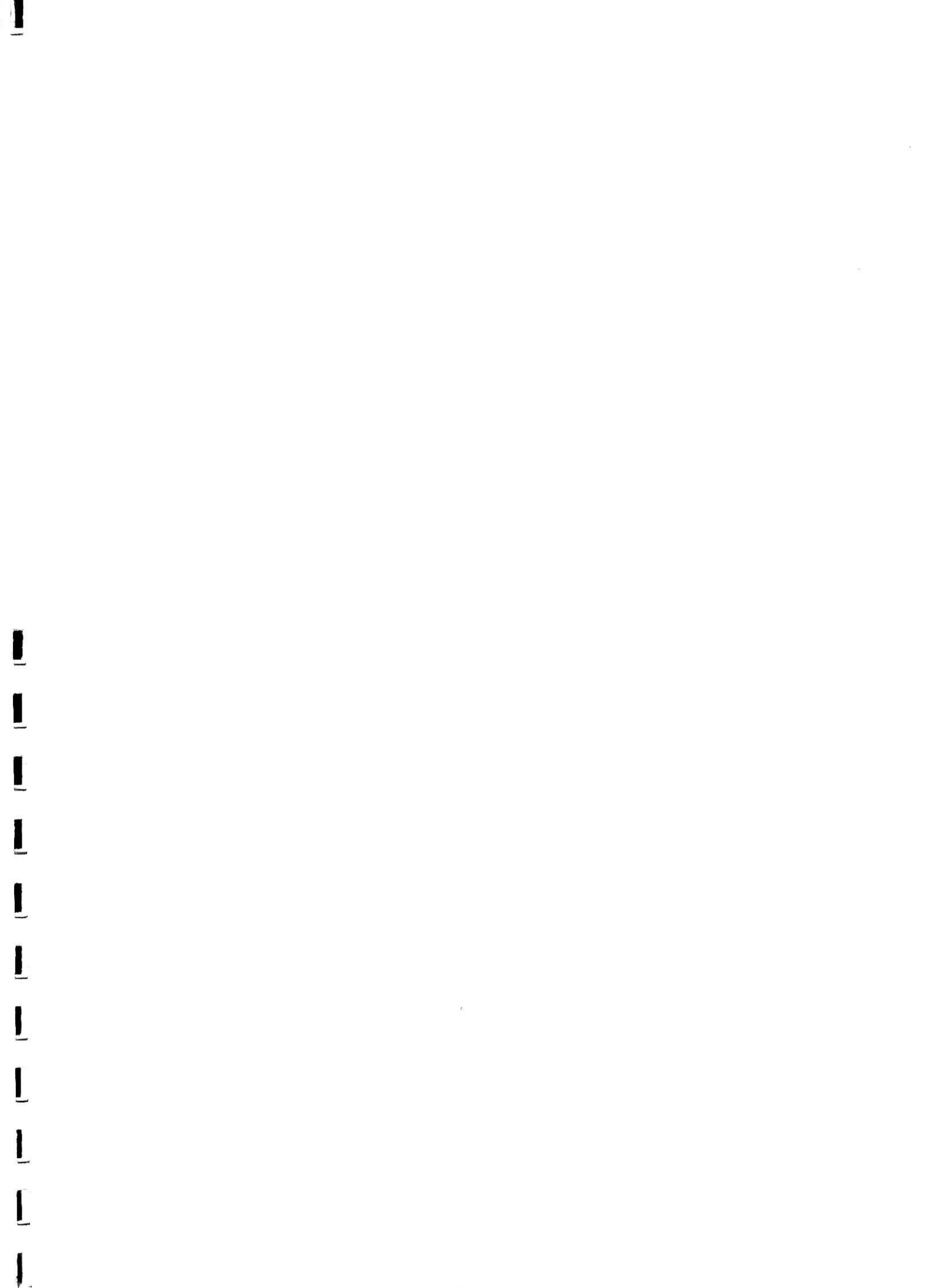
MESSAOUDÈNE Abdenour
TICHOUCHAI Kamel

Dirigé par :

M^{me} : R. KETTAB
M^r : M. BENSAIBI

Promotion 2003

E.N.P 10.Avenue Hassan Badi. El Harrach. Alger
Tél : (021) 52.53.01/03 . Fax : (021) 52.29.73 . E-mail : ENP@IST.CERIST.DZ



DEDICACES



Je dédie ce modeste travail à :
Ma très chère mère ,
Mon très cher père,
Ma sœur ,
Mon frère ,
Toute ma famille,
Tous mes amis.

Tichouchai Kamel

Je dédie ce travail à mes parents pour tous les
sacrifices consentis à mon égard.
A toute ma famille
A Laïd FERDJ, Zenati. , Amine, Rachid,
A tous ceux qui me sont chers.

Abdennour

SOMMAIRE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale	1
Historique.....	2

Première partie : Synthèse bibliographique

Chapitre I : Les enrobés bitumineux

I.1. Introduction.....	3
I.2. Utilisation des enrobés bitumineux	3
I.2.1. En technique routière.....	3
I.2.2. Dans les travaux hydrauliques	4
I.3. Qualités exigées d'un enrobé bitumineux	4
I.3.1. La stabilité.....	4
I.3.2. La flexibilité	4
I.3.3. Absence de sensibilité à l'eau.....	4
I.4. Essais sur les enrobés bitumineux	5
I.5. Béton bitumineux	5
I.6. Classification des enrobés bitumineux d'après le mode de fabrication.....	5
I.6.1. Les enrobés à chaud.....	5
I.6.1.1. Définition	5
I.6.1.2. Importance des enrobés à chaud	6
I.6.1.3. L'étude de laboratoire des enrobés bitumineux à chaud	6
I.6.2. Enrobés à froid.....	7
I.6.2.1. Introduction.....	7
I.6.2.2. Domaines d'emploi	9
I.6.2.3. Formulation	13
I.6.2.4. Fabrication et application.....	14

Chapitre II : Emulsion de bitume

II.1. Introduction.....	18
II.2. Définition - types d'émulsions	18
II.3. Les émulsions de bitume	19
II.3.1. Principaux emplois des émulsions	19
II.3.2. L'émulsification	19
II.3.3. Choix de la formulation	20
II.3.4. Conditions d'émulsification	20
II.3.5. Caractéristiques technologiques des émulsions	21
II.3.5.1. Stabilité des émulsions	21
II.3.5.2. Adhésivité des émulsions	24
II.3.5.3. Viscosité	25
II.3.6. Caractéristiques physico-chimiques	25
II.3.6.1. Le PH des émulsions	25

II.3.6.2. Conductivité des émulsions	25
II.3.6.3. Facteurs influant sur la granulométrie	26
II.3.6.4. Technologie de fabrication des émulsions de bitume	26
II.3.7. Fabrication de l'émulsion	26
II.3.7.1. Préparation de la phase liant	27
II.3.7.2. Préparation de la phase aqueuse	28
II.3.8. Emulsification	29
II.3.8.1. Emulsionneur	29
II.3.9. Stockage et livraison des émulsions	29
II.3.9.1. Stockage souterrain	29
II.3.9.2. Stockage aérien	29
II.3.9.3. Livraison	30

Chapitre III : Les bitumes

III.1. Les bitumes purs	32
III.2. La composition chimique	32
III.2.1. Les asphaltènes	32
III.2.2. Les maltènes	33
III.3. La structure colloïdale	33
III.3.1. Les états structuraux du bitume	33
III.3.2. La stabilité colloïdale	34
III.4. Propriétés des bitumes	34
III.4.1. Propriétés physiques	34
III.4.2. Résistance à l'attaque chimique	34
III.5. Les essais disponibles sur les bitumes	35
III.5.1. La pénétrabilité	35
III.5.2. Le point de ramollissement	35
III.5.3. La densité relative à 25°C	35
III.5.4. La perte de masse au chauffage	35
III.5.5. Le point d'éclair	35
III.5.6. La ductilité à 25°C	36
III.5.7. L'indice de pénétrabilité	36
III.6. Les objectifs recherches	38

Chapitre IV : Les liants modifiés

IV.1. Généralités	41
IV.1.1. Liants modifiés	41
IV.1.3. Bitumes spéciaux	41
IV.1.4. Historique des bitumes modifiés	42
IV.2. Objectifs recherchés avec les liants modifiés par rapport à l'emploi des bitumes purs.	43
IV.3. Essais pour la caractérisation de ces liants	44
IV.4. Indicateurs traditionnels de caractérisation des liants bitumineux	45
IV.4.1. Meure de la pénétrabilité	45
IV.4.2. Détermination du point de ramollissement bille et panneau	45
IV.4.3. Indice de pénétrabilité	45
IV.4.4. Les analyses physico-chimiques	46
IV.5. Les méthodes d'essais spécifiques aux liants modifiés	46
IV.5.1. Les essais rhéologiques	46
IV.5.2. Les essais mécaniques pour caractériser la rupture	47
IV.6. Les liants modifiés	48
IV.6.1. Les polymères thermodurcissables	48

IV.6.2. Les polymères thermoplastiques	48
IV.6.3. Les polymères thermoplastiques élastomères	48
IV.6.4. Les polymères thermoplastiques plastomères	49
IV.6.5. Le latex	49
IV.6.6. La poudrette de caoutchouc	50
IV.6.7. Les cendres volantes	50

Chapitre V : Les granulats

V.1. Introduction	51
V.2. Qualités exigées des granulats	51
V.3. Origine des graves	52
V.3.1. Graves brutes naturelles.....	52
V.3.2. Graves naturelles concassées	52
V.3.3. Graves entièrement concassées	52
V.4. Les caractéristiques des granulats	52
V.4.1. Les caractéristiques intrinsèques des granulats.....	52
V.4.2. Les caractéristiques de fabrication des granulats.....	52
V.4.3. Classification	53
V.4.4. Spécifications des granulats.....	53
V.4.5. Essais sur les granulats.....	54
V.4.5.1. Les graviers.....	54
V.4.5.2. Les sables.....	54

Deuxième partie : Etude expérimentale

Chapitre VI : Identification des matériaux

VI.1. Introduction	57
VI.2. Identification des matériaux	57
VI.2.1. Le sable	57
VI.2.1.1. Définition d'un sable	57
VI.2.1.2. Classification d'un sable	57
VI.2.1.3. Sable utilisé	58
VI.2.1.4. Granulométrie.....	58
VI.2.1.5. Propreté du sable 0/3	58
VI.2.1.6. Friabilité.....	59
VI.2.2. Les graviers 3/8 et 8/15	60
VI.2.2.1. Analyse granulométrique.....	60
VI.2.2.2. Coefficient d'aplatissement	62
VI.2.2.3. Propreté superficielle des gravillons	62
VI.2.2.4. Poids spécifique au pycnomètre	63
VI.2.2.5. Essai d'abrasion (LOS ANGELES)	64
VI.2.2.6. Essai d'usure MICRO-DEVAL Humide	64
VI.2.3. Fines d'apport pour enrobés	65
VI.2.3.1. Analyse granulométrique de la Poudrette de caoutchouc et du Filler calcaire.....	67
VI.2.3.2. Le poids spécifique des ajouts	69
VI.2.4. Analyse chimique.....	69
VI.2.5. Etude des liants	70
VI.2.5.1. Bitume utilisé	70
VI.2.5.2. L'émulsion 65 %	71

Chapitre VII : Formulation du béton bitumineux

VII.1. Formulation du béton bitumineux	75
VII.1.1. Principe.....	75
VII.1.1.1. Introduction	75
VII.1.1.2. Généralités	75
VII.1.1.3. Les constituants	76
VII.1.2. Méthodologie d'une étude de formulation	78
VII.1.2.1. La composition granulométrique	78
VII.1.2.2. La teneur en liant	79
VII.1.2.3. Les caractéristiques de l'enrobé	80
VII.2. Le traitement à chaud (ESSAI MARSHALL)	81
VII.2.1. Mélange A (témoin)	81
VII.2.2. L'ajout des fillers d'apports.....	83
VII.2.2.1. Mélange B (Ajout de 2% du Filler Calcaire)	83
VII.2.2.2. Mélange C (Ajout de 2% du Filler Calcaire + différents % de la Poudre de Caoutchouc)	85
VII.2.2.3. La comparaison entre les mélanges A, B et C2	88
VII.2.2.4. Mélange D (Ajout de 3% du CPJ45)	90
VII.2.5. Mélange E (Ajout de 3% du CPJ45 + 2% de Poudre de Caoutchouc)	90
VII.2.2.6. La comparaison entre les mélanges A, D et E	93
VII.2.3. Conclusion	94
VII.3. Le traitement à froid (ESSAI DURIEZ)	95
VII.3.1- Premier mélange A (Témoin)	95
VII.3.2. L'ajout des fillers d'apport	96
VII.3.2.1. Mélange B (Ajout de 2% du Calcaire)	96
VII.3.2.2. Mélange C (Ajout de 2% du Calcaire + différents pourcentages de la Poudre de Caoutchouc).....	98
VII.3.2.3. La comparaison entre les mélanges A, B et C2	100
VII.3.2.4. Mélange D (Ajout de 3% du CPJ45)	101
VII.3.2.5. Mélange E (Ajout de 3% du CPJ45 + 2% de poudre de caoutchouc)	102
VII.3.2.6. La comparaison entre les mélanges A, D et E	103
VII.3.2.7. Mélange F (Ajout de 3% la chaux)	104
VII.3.2.8. Mélange G (Ajout de 3% la chaux + 2% de poudre de caoutchouc)	106
VII.3.2.9. La comparaison entre les mélanges A, F et G	108
VII.3.2.10. Comparaison entre les mélanges A, B, C2, D, E, F et G (Figure 8)	108
VII.3.3. Conclusion	110
VII.4. La comparaison entre le bitume résiduel de l'émulsion et le bitume 40/50.....	111
VII.4.1 Mélange H (enrobé avec le bitume résiduel de l'émulsion)	111
VII.4.2. Interprétation des résultats	111
Conclusion générale.....	112
Annexe 1	
Annexe 2	
Annexe 3	
Références bibliographiques	

Liste des Tableaux

N°	Titre	Page
II.1	Densité du bitume.	22
II.2	Caractéristiques des émulsions cationiques.	31
III.1	Caractéristiques des bitumes fabriqués par le semi-soufflage.	37
III.2	Caractéristiques des bitumes fabriqués par la distillation directe.	38
V.1	Caractéristiques exigées pour les granulats routiers.	55
VI.1	Les valeurs de ES et de Bleu du sable utilisé.	59
VI.2	La friabilité des sables.	60
VI.3	Analyse granulométrique des fractions 0/3, 3/8 et 8/15.	60
VI.4	Coefficient d'aplatissement des graviers.	62
VI.5	Propreté des graviers.	63
VI.6	Propreté des gravillons.	63
VI.7	Les poids spécifiques des granulats.	63
VI.8	L'essai d'abrasion (LOS ANGELES).	64
VI.9	L'essai d'usure MICRO-DEVAL HUMIDE.	65
VI.10	Les caractéristiques mécaniques des gravillons.	65
VI.11	Les composantes du Ciment Portland.	66
VI.12	Composition chimique du ciment CPJ45.	66
VI.13	Analyse granulométrique du filler calcaire et de la Poudrette de Caoutchouc.	67
VI.14	Poids spécifiques des ajouts.	69
VI.15	Compositions chimiques des différentes fractions.	69
VI.16	Caractéristiques physico-mécaniques du bitume.	70
VI.17	Caractéristiques des différentes classes des bitumes routiers purs.	70
VI.18	Les résultats des essais sur l'émulsion.	72
VII.1.1	Fuseaux de spécification pour BB 0/10 et BB 0/14 semi-grenus.	78
VII.2.1	Les résultats des essais effectués sur le mélange A.	81
VII.2.2	Les résultats des essais effectués sur le mélange B.	83
VII.2.3	Les différentes proportions granulaires du mélange C.	85
VII.2.4	Les résultats des essais effectués sur le mélange C.	87

Liste des Tableaux (Suite)

N°	Titre	Page
VII.1.5	La comparaison entre les mélanges A, B et C2.	88
VII.2.6	Les résultats des essais effectués sur le mélange D.	90
VII.2.7	Les résultats des essais effectués sur le mélange E.	90
VII.2.8	La comparaison entre les mélanges A, D et E.	93
VII.3.1	Les résultats des essais effectués sur le mélange A.	95
VII.3.2	Les résultats des essais effectués sur le mélange B.	97
VII.3.3	Les différentes proportions granulaires du mélange C.	98
VII.3.4	Les résultats des essais effectués sur le mélange C.	99
VII.3.5	La comparaison entre les mélanges A, B et C2.	100
VII.3.6	Les résultats des essais effectués sur le mélange D.	101
VII.3.7	Les résultats des essais effectués sur le mélange E.	102
VII.3.8	Comparaison entre les mélanges A, D et E.	103
VII.3.9	Les résultats des essais effectués sur le mélange F.	104
VII.3.10	Les résultats des essais effectués sur le mélange G.	106
VII.3.11	Comparaison entre les mélanges A, F et G.	108
VII.4.1	Comparaison entre le bitume résiduel et l'émulsion et le bitume 40/50.	111

Liste des Figures

N°	Titre	Page
II.1 a	Mouillage préférentiel par l'eau.	23
II.1 b	Mouillage préférentiel par le bitume.	23
II.2	Schéma théorique de fabrication d'une émulsion.	27
II.3	Préparation directe.	28
II.4	La solution mère.	28
VI.1	Courbes granulométriques des fractions 0/3, 3/8 et 8/15.	61
VI.2	Courbes granulométriques de la poudrette de caoutchouc et du filler calcaire.	68
VI.3	La Chaux.	73
VI.4	Filler calcaire.	73
VI.5	CPJ45.	73
VI.6	Pycnomètre.	73
VI.7	Bain thermostatique.	73
VI.8	Viscosimètre Engler.	73
VI.9	Pénétrromètre.	74
VI.10	Appareil Bille-Anneau.	74
VI.11	Cleveland.	74
VI.12	Appareil de distillation.	74
VII.2.1	Courbe granulométrique du mélange A.	82
VII.2.2	Courbe granulométrique du mélange B.	84
VII.2.3	Les résultats des essais effectués sur le mélange B.	85
VII.2.4	Courbe granulométrique du mélange C2.	86
VII.2.5	Les résultats des essais effectués sur le mélange C.	87
VII.2.6	La comparaison entre les mélanges A, B et C2.	88
VII.2.7	Courbe granulométrique du mélange D.	91
VII.2.8	Courbe granulométrique du mélange E.	92
VII.2.9	La comparaison entre les mélanges A, D et E.	93
VII.3.1	Les résultats des essais effectués sur le mélange B.	97
VII.3.2	Les résultats des essais effectués sur le mélange C.	99
VII.3.3	La comparaison entre les mélanges A, B et C2.	100
VII.3.4	Comparaison entre les mélanges A, D et E.	103

Liste des Figures (Suite)

N°	Titre	Page
VII.3.5	Courbe granulométrique du mélange F.	105
VII.3.6	Courbe granulométrique du mélange G.	107
VII.3.7	Comparaison entre les mélanges A, F et D.	108
VII.3.8	Comparaison entre les mélanges A, B, C2, D, E, F et G.	109

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction
Et
Historique

Introduction générale

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

L'augmentation permanente en poids et en nombre de la circulation automobile nécessite une amélioration constante de la qualité des chaussées.

Les recherches sur les bitumes et les enrobés bitumineux remontent à de longues dates. L'enrobé bitumineux est un corps hétérogène, le bitume lui confère son caractère viscoélastique et la partie minérale est responsable de sa résistance, dont les rôles initiaux n'étaient que l'imperméabilisation et l'amélioration des qualités de surface, l'enrobé prend une place de plus en plus importante dans les structures routières.

Le mot enrobé bitumineux est suffisamment vague pour englober une grande variété de matériaux dont le comportement sera très différent pour une sollicitation donnée ; c'est probablement la raison pour laquelle, malgré l'importance des moyens mis en œuvre dans le monde entier, les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux sont encore mal connues.

Les ressources en granulats sont rares dans la majorité des régions et pour des raisons diverses, notamment économiques, la tendance actuelle est d'adapter la technique routière à l'emploi des matériaux locaux, et d'orienter ainsi la recherche vers l'utilisation de ces matériaux.

Ceci nous encourage à chercher des techniques permettant de valoriser des matériaux disponibles localement en utilisant des ajouts, et de les utiliser dans le domaine des routes d'où l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter l'utilisation des granulats basaltiques pour la formulation de bétons bitumineux dont ils seraient les constituants principaux.

Les recherches doivent donc permettre d'adapter les techniques d'utilisation des liants hydrocarbonés, des dopes d'adhésivité, des apports de fillers, et autres tel que le caoutchouc à l'évolution des conditions de circulation, de la conception générale des chaussées, de la politique d'entretien et de renforcement.

L'addition aux enrobés bitumineux de granulats de caoutchouc recyclés provenant de déchets, à base de polymères ou de caoutchouc (pneus usagés, semelles de chaussées, tapis de voitures ...), broyés sous forme de poudrette est une idée explorée depuis une quarantaine d'années dans plusieurs pays, avec comme objectif secondaire l'élimination des pneumatiques usagés.

Dans cette étude, nous avons essayé d'améliorer les performances mécaniques d'un enrobé bitumineux formulé avec des granulats basaltiques qui ont, par leur nature, une faible adhésivité avec les liants hydrocarbonés. Pour cela, on a ajouté la poudrette de caoutchouc, le filler calcaire, le ciment et la chaux comme différents apports pour augmenter l'adhésivité liants/granulats.

Historique

Depuis plus de 4000 ans, le bitume a été utilisé par les égyptiens comme matériau de base dans la construction, ils l'ont utilisé comme liant ou bien pour l'étanchéité et l'imperméabilisation.

Le bitume, qu'ils utilisaient, était un matériau naturel provenant de plusieurs infiltrations d'huile : le pétrole brut montait en surface et les fractions plus légères s'évaporaient dans la nature laissant un résidu visqueux qui contenait de l'eau, des constituants des sols et d'autres impuretés.

Au cours du *IXX^{ème}* siècle, après la découverte du pétrole, on bénéficiait d'une nouvelle course de bitume qui est le pétrole brut, donc après le grand développement des méthodes de forage et de raffinage du pétrole, on pouvait obtenir des quantités abondantes de bitume à moindre coût, ceci se révèle jusqu'aujourd'hui.

Parallèlement, l'industrie véhiculaire connaît des progrès considérables, pour cela on pensait concevoir des chaussées qui offraient des qualités de confort, et ce en utilisant des gravillons enrobés par des bitumes qu'on appelle enrobés bitumineux.

Avant la *II^{ème}* guerre mondiale, l'application des enrobés se faisait à la main suivant le profil d'une règle glissant sur des cales, et les matériaux étaient à la raclette ou au râteau, la mise en place pouvait être excellente et on utilisait en général des cimenteries dont l'habileté était bien nécessaire, mais le rendement était faible.

Après la guerre, l'augmentation du débit des centrales d'enrobage a fait abandonner cette méthode de travail, il a fallu impérativement réaliser une mise en oeuvre mécanique.

Depuis les années 60, avec les conditions modernes de trafic élevé, lourd et rapide, ces solutions se sont avérées encore insuffisantes et, actuellement on assiste à une généralisation des matériaux liés, tant dans le corps de la chaussée, qu'en surface. Il convient de noter que la technique routière devient de plus en plus complexe mettant en oeuvre des matériaux et des matériels de plus en plus performants.

La construction routière nécessite des quantités énormes de granulats. Le caractère assez restrictif des spécifications routières fait que seules certaines catégories de matériaux sont couramment utilisées.

Chapitre I

Les enrobés bitumineux

Chapitre I. Les enrobés bitumineux

I.1. Introduction

On appelle enrobé l'ensemble des matériaux résultant du mélange d'un granulat et d'un liant hydrocarboné, qui peut être soit du bitume donnant un « enrobé bitumineux », soit un goudron donnant un « enrobé goudronneux ».

On peut classer les enrobés bitumineux par différentes manières, soit par :

- Leur compacité : enrobés denses, ouverts, semi-ouverts ...
- Le type de granulat utilisé : grave bitume, sables bitume, enrobés fins ...
- Enrobés coulés à chaud ou à froid.
- Liant utilisé : émulsion de bitume, bitume fluidifié ou fluxé, bitume pur.

Il faut noter que chaque type d'enrobé employé dépend de la couche dont il va t être répandu ou bien de la qualité que l'on exige de la chaussée.

I.2. Utilisation des enrobés bitumineux

I.2.1. En technique routière

Les enrobés bitumineux sont utilisés dans les couches de surface des chaussées ou dans les assises de chaussées (couche de base et couche de fondation).

Pour les enrobés bitumineux utilisés en couche de surface — et tout spécialement en couche de roulement — la conception des enrobés bitumineux doit s'efforcer de répondre le mieux possible aux problèmes posés :

- Offrir au roulement des véhicules une surface convenable quant à la sécurité (propriétés antidérapantes) et au confort (uni).
- Résister aux sollicitations engendrées par le trafic pour que les qualités précédentes ne soient pas détruites :
 - Sollicitations verticales (poinçonnement, déflexion)
 - Sollicitations tangentielles (usure, polissage, fluage, glissement).
- Résister aux sollicitations engendrées par les agents externes, autres que le trafic : soleil, eau, gel, fondants chimiques (sels de déverglaçage) et produits pétroliers.

Pour l'entretien, par emplois partiels, ce recours aux bétons bitumineux n'est pratiquement pas possible et l'on utilise en général des enrobés à froid, semi-denses ou ouverts.

Pour les enrobés bitumineux utilisés en assises de chaussée, les données du problème sont plus simples : il s'agit essentiellement de concilier la résistance à l'orniérage et la

résistance à la fatigue ; c'est dans cet esprit qu'a été mise au point la technique des graves-bitume.

I.2.2. Dans les travaux hydraulique

Les enrobés bitumineux sont également très utilisés dans les travaux hydrauliques (revêtements de canaux, digues, barrages...) :

- Soit pour constituer des écrans imperméables. On utilise à cet effet des bétons bitumineux encore nettement plus compacts que les bétons bitumineux routiers.
- Soit pour constituer des couches drainantes ou filtrantes. On utilise alors des enrobés à chaud (ouverts ou semi-denses).

I.3. Qualités exigées d'un enrobé bitumineux

Qu'il s'agisse d'un enrobé réalisé à chaud ou à froid, la couche ainsi réalisée doit avoir un certain nombre de qualités :

I.3.1. La stabilité

La stabilité est la résistance à la déformation permanente de la couche sous l'effet des charges statiques et dynamiques. L'insuffisance de stabilité se traduit par fluage avec formation de dépression, d'ornièrre et d'ondulation.

La stabilité augmente avec l'angle de frottement interne des granulats, la dureté du liant et le compactage. Si bien que la tendance actuelle pour la chaussée à trafic lourd réside dans l'emploi des bétons bitumineux constitués de liants durs et de granulats durs et anguleux.

I.3.2. La flexibilité

On entend par la flexibilité l'aptitude de l'enrobé bitumineux à admettre, sans fissuration, les déformations d'ensemble qui peuvent être imposées par la déflexion des couches inférieures. L'insuffisance de flexibilité se manifeste par la fissuration du tapis. La flexibilité dépend au premier lieu de la ductilité du liant qui doit demeurer suffisante aux basses températures pendant toute la vie de l'enrobé.

Pour obtenir un enrobé à la fois flexible et stable, il faut donc un liant qui reste visqueux en été sans devenir fragile en hiver et qui de plus résiste bien au vieillissement.

I.3.3. Absence de sensibilité à l'eau

Une bonne affinité entre les granulats et le liant accrue le cas échéant par des dopes, permet de résister au désenrobage des matériaux sous l'effet des eaux. Celle-ci peut d'autre part être altérée par la présence d'argile dans les granulats. Les argiles réduisent considérablement la stabilité des enrobés.

L'enrobé utilisé en couche de surface doit présenter des qualités particulières, telles que la résistance au poinçonnement et une bonne rugosité qui suppose que les granulats ne se polissent pas sous l'effet de la circulation.

I.4. Essais sur les enrobés bitumineux

Les essais couramment utilisés pour les enrobés bitumineux sont :

- Essai Marshall.
- Essai triaxial de Smith.
- Essai Hubbard-Field.
- Essai Duriez.
- Essai d'orniérage.
- Essai de compactage à la presse giratoire CPG.
- Essai de compression simple L.C.P.C.
- Essai HVEEM.

I.5. Béton bitumineux

Ce type d'enrobé bitumineux est constitué par un squelette minéral à granulométrie continue dans lequel les particules les plus petites remplissent les vides formés par les plus grosses, formant ainsi une structure minérale dense avec une faible teneur en vide.

- Différents types de bétons bitumineux

- 1) Les bétons bitumineux 0/10 et 0/14.
- 2) Les bétons bitumineux cloutés.
- 3) Les bétons bitumineux minces (BBM), très minces (BBTM) et ultra-minces (BBUM).
- 4) Les bétons bitumineux drainants (BBD_r).
- 5) Les bétons bitumineux coulés à chaud.

I.6. Classification des enrobés bitumineux d'après le mode de fabrication

I.6.1. Les enrobés à chaud

I.6.1.1. Définition

Ils sont caractérisés par le passage des granulats dans un tambour sécheur aux fins de chauffage et de séchage. Le liant utilisé peut être un bitume pur ou fluxé ou fluidifié, un goudron ou un liant composé, mais le plus souvent ce sera du bitume pur. Ils sont divisés en trois catégories :

- ❖ La catégorie DC : enrobés denses à chaud dont le pourcentage des vides sur éprouvettes LCPC est inférieur à 15 %.
- ❖ La catégorie SC : enrobés semi-denses à chaud dont le pourcentage des vides est compris entre 10 et 15 %.

- ❖ La catégorie OC : enrobés ouverts à chaud dont le pourcentage des vides est supérieur à 15 %.

Dans la catégorie DC se situent les bétons bitumineux et les bétons goudronneux dits bétons hydrocarbonés de la classe B, qui constituent des enrobés denses à hautes performances caractérisés par :

- ❖ La qualité des granulats (propreté, résistance mécanique).
- ❖ La viscosité du liant qui est un bitume pur (ou un goudron de haute viscosité).
- ❖ Une granulométrie continue avec tolérances très strictes.
- ❖ Des performances élevées (forte compacité, résistance mécanique importante).
- ❖ Un soin particulier apporté à la fabrication (séparation des granulats en trois fractions au minimum, apport de filler).

Lorsque le calibre maximum du granulat est inférieur à 6 mm on parlera de sable enrobé et de microbéton hydrocarboné.

I.6.1.2. Importance des enrobés à chaud

Les enrobés à chaud, et notamment les enrobés denses, restent les revêtements les plus surs et les plus performants. Réservés durant de nombreuses années aux chaussées urbaines ou très circulées, ils ont pris en France un développement considérable.

Les bétons bitumineux sont réservés aux autoroutes et aux aéroports sur lesquels le trafic soit par le nombre des passages, soit par la valeur élevée des charges et surtout des pressions, exige des enrobés de haute résistance et qui se densifient peu après leur mise en œuvre.

On notera d'ailleurs que la distinction entre enrobés denses et bétons bitumineux est parfois formelle car il est fréquent que des granulats concassés ou semi-concassés soient d'une granularité et d'une régularité telles que les enrobés denses réalisés aient des performances équivalentes à celles d'un béton bitumineux. Néanmoins la séparation des divers constituants par classes granulométriques est une assurance contre la ségrégation et contre tout risque de dérèglement au concassage, et il est indispensable d'être beaucoup plus strict pour les chaussées très circulées.

I.6.1.3. L'étude de laboratoire des enrobés bitumineux à chaud

L'étude de laboratoire des enrobés bitumineux à chaud consiste à :

- ❖ Définir la composition des enrobés bitumineux par les paramètres tels que la granulométrie, la nature des granulats, la nature et teneur en fines, la classe et teneur en bitume et les dopes (le cas échéant).
- ❖ Déterminer les caractéristiques mécaniques des enrobés.
- ❖ Évaluer la tenue à l'eau des enrobés.

- ❖ Vérifier les performances mécaniques des enrobés au regard des spécifications recommandées.

Concernant la détermination des performances des enrobés, l'étude de laboratoire s'appuie sur la mesure des caractéristiques suivantes :

- La masse volumique réelle des gravillons, **NF P18-554**.
- La masse volumique réelle des sables, **NF P18-555**.
- La masse volumique des gravillons et des sables dans l'huile de paraffine, **NF P18-559** ; (cette mesure tient compte de l'enrobage avec le bitume qui influe sur le calcul de la compacité).
- La masse volumique apparente d'une éprouvette par pesée hydrostatique, **NF P98-250-6**.
- La densité relative du bitume, **NF T66-007**.
- Les caractéristiques mécaniques MARSHALL, **ASTM D1559**.
- Le rapport immersion/compression.

I.6.2. Enrobés à froid

I.6.2.1. Introduction

La technique des enrobés à froid présente des avantages conséquents, notamment la facilité d'exécution et une formulation à squelette composée quasiment de gravillons. Cette technique est bien adaptée au sud où les routes ont un trafic moyen, sinon faible.

I.6.2.1.1. Classification en fonction de l'utilisation des enrobés

L'appellation enrobés à froid s'applique aux trois types de produits que l'on peut définir ainsi :

- enrobés pour entretien et petites réparations de chaussées ;
- enrobés pour usages spécifiques (sols sportifs en particulier) ;
- enrobés pour couche de roulement des chaussées ;

Pour la fabrication de ces trois types d'enrobés, il existe deux procédés de fabrication:

I.6.2.1.1.1. Fabrication en poste fixe

Les enrobés fabriqués sont le plus souvent à utilisation différée (de quelques heures à un mois).

I.6.2.1.1.2. Fabrication sur chantier

Les enrobés sont fabriqués et mis en œuvre simultanément.

I.6.2.1.2. Classification en fonction de la composition des enrobés

I.6.2.1.2.1. Enrobés ouverts à froid (O.F.D)

Les enrobés ouverts à froid sont fabriqués avec des granulats dont la classe granulaire est l'une des suivantes : 2 / 4, 4 / 6, 6 / 10, 10 / 14 ou 10 / 20.

- Le mélange des granulats de plusieurs classes est parfois adopté.
- Le pourcentage de vides de ces enrobés est supérieur à 15 %.

I.6.2.1.2.2. Enrobés semi-denses à froid (S.F.D)

Les enrobés semi-denses à froid sont fabriqués avec des granulats 0/4, 0/6, 0/10, ou 0/14. Leur pourcentage de vides est compris entre 10 et 15 %.

I.6.2.1.2.3. Enrobés denses à froid (D.F.D)

Les enrobés denses à froid sont fabriqués avec les mêmes granulats que les enrobés semi-denses à froid mais leur teneur en filler est plus importante. Leur pourcentage de vides est inférieur à 10 %.

L'émulsion d'enrobage étant à base de bitume pur, la stockabilité de ces enrobés est très réduite.

I.6.2.1.3. Classification en fonction de la stockabilité des enrobés

I.6.2.1.3.1. Enrobés stockables

Les enrobés stockables ou à utilisation différée (d'une heure à un mois) sont fabriqués en poste fixe par des installations continues ou discontinues du type :

- bétonnière dont le rendement est de 100 tonnes par jour environ.
- malaxeur discontinu dont le rendement est de 200 à 800 tonnes par jour.
- malaxeur continu dont le rendement est supérieur à 500 tonnes par jour.

L'origine minérale des granulats dépend de l'utilisation de l'enrobé ; ils peuvent être calcaires, silico-calcaires ou provenir de roche massive.

L'émulsion utilisée est en général à base de bitume fluxé ou fluidifié.

La mise en œuvre s'effectue soit à la main, soit à la niveleuse ou au finisseur.

I.6.2.1.3.2. Enrobés non stockables ou à utilisation immédiate

- Ces enrobés sont fabriqués sur chantier par une installation mobile.

- Cette installation est un camion enrobeur lorsque le chantier consiste à effectuer des travaux de réparation ; la mise en œuvre est alors faite à la main.
- Le granulat introduit dans l'engin est un matériau reconstitué en carrière.

Lorsque les enrobés sont destinés à une couche de roulement, l'installation est du type motopaver. Un malaxeur équipé de pompes doseuses permet de fabriquer l'enrobé aux teneurs en eau et en bitume résiduel nécessaire ; ces teneurs sont déterminées pour permettre l'obtention des performances mécaniques souhaitées et pour faciliter la mise en œuvre.

L'émulsion utilisée est une émulsion de bitume pur, qui confère à l'enrobé des performances mécaniques élevées dès que l'eau de rupture est évacuée.

La mise en œuvre est réalisée :

- ❖ soit à la niveleuse, les enrobés ayant été déposés par la machine en un cordon calibré.
- ❖ soit au moyen d'une table vibrante, identique à celle d'un finisseur, qui étale les enrobés en les compactant dès leur sortie de la machine.

I.6.2.2. Domaines d'emploi

I.6.2.2.1. Réparation et entretien

Selon un procédé ancien et traditionnel, les enrobés sont utilisés pour la réparation des dégradations ponctuelles mais importantes du type « nids de poule », déformation de rives, raccord avec un obstacle, tranchées...etc

On utilise pour cet emploi :

- Soit des enrobés ouverts ou semi-denses stockables fabriqués en poste fixe.
- Soit des enrobés denses à utilisation immédiate fabriqués en poste fixe ou sur chantier.

Si la fabrication est réalisée en poste fixe, la rupture de l'émulsion est retardée. Si la fabrication se déroule sur le chantier, la rupture intervient dans un délai d'un quart d'heure maximum.

Les réparations sont effectuées ainsi :

I.6.2.2.1.1. Enrobés ouverts

La réparation est plus ou moins poussée selon la qualité que l'on attend de la réparation. Pour les dégradations moyennes, on peut réaliser une engravure sur le pourtour de la pièce à traiter, de manière à épauler les bords de l'enrobé.

On pulvérise éventuellement un film d'émulsion sur le fond et les parois latérales du trou. Pour les dégradations profondes, le calibre de l'enrobé sera choisi en fonction de la

profondeur à combler ; si elle est importante, il y a lieu de procéder en deux couches, celle de surface étant réalisée avec un enrobé fin. Un cylindrage sérieux confère à l'enrobé le maximum de stabilité en attendant la consolidation due à l'évaporation des solvants volatils.

I.6.2.2.1.1.1. Avantages des enrobés ouverts

L'enrobé étant un matériau prêt à l'emploi, le matériel utilisé est simple et courant et le personnel n'est pas nécessairement spécialisé ; un camion pour le transport, une pelle et un râteau pour la mise en place, une dame ou un petit cylindre vibrant pour le compactage suffisent. Grâce aux propriétés de stockabilité du matériau, on peut disposer par avance de petits tas d'enrobés à proximité des parties de chaussées dégradées et les utiliser à la demande.

Par ailleurs, la maniabilité assez durable du matériau permet éventuellement de supprimer le cylindrage en laissant ce rôle à la circulation ; cette méthode couramment utilisée est cependant un moindre mal et doit être réservée aux voies à trafic faible. Le ressuage n'est pas à craindre ainsi que le rejet à condition de ne pas négliger le compactage.

I.6.2.2.1.1.2. Inconvénients des enrobés ouverts

Les enrobés ouverts à froid, même après un bon compactage, comportent, par nature, un pourcentage de vides important ; c'est pourquoi, après une pluie, la réparation va se comporter comme un véritable piège à eau. Cette eau va étendre son action destructrice à la couche de base.

Pour remédier à cet inconvénient, il faut, avant de mettre l'enrobé en place, pulvériser dans le fond et sur les parois latérales du trou une couche d'émulsion ; le bitume, grâce à ses propriétés d'étanchéité, protégera la couche de base.

D'autre part, la faible compacité de l'enrobé conférant à celui-ci une texture ouverte, apte à retenir les liquides, va provoquer lors d'un enduit généralisé ultérieur, une absorption de liant conduisant naturellement à un sous-dosage relatif, donc un risque de mauvaise fixation des gravillons.

Le remède consiste à réaliser un scellement à l'émulsion avant enduisage pour fermer la texture de surface. Un autre inconvénient des enrobés ouverts est la nécessité de les conserver stockables donc maniables pendant un délai important entraînant une certaine déformabilité de l'enrobé tant que les solvants présents dans le liant ne se sont pas évaporés ; cette déformabilité va amener des risques de fluage et d'orniérage dans les premiers temps de la réparation, surtout si la surface et l'épaisseur de l'enrobé mis en place sont importantes et si le compactage est d'intensité médiocre.

I.6.2.2.1.2. Enrobés semi-denses

Les réparations sont effectuées comme avec les enrobés ouverts à froid. Il est nécessaire d'intensifier le compactage.

I.6.2.2.1.2.1. Avantages et inconvénients des enrobés semi-denses

Les enrobés semi-denses présentent pratiquement les mêmes avantages que les enrobés ouverts alors que les inconvénients sont moins prononcés :

- Leur cohésion, plus forte, leur permet de bien résister aux efforts tangentiels.
- Leur meilleure compacité confère une relative imperméabilité à la chaussée, offrant ainsi une protection contre l'eau de pluie et évitant l'absorption du liant d'un futur enduit généralisé.

Cependant, il faut éviter de mettre en œuvre des épaisseurs trop importantes car l'évaporation des fluxants serait alors très lente.

I.6.2.2.1.3. Enrobés denses à froid

Les réparations sont réalisées comme avec les autres catégories d'enrobés à froid ; la phase du compactage est essentielle ; il faut y veiller tout particulièrement.

I.6.2.2.1.3.1. Avantages des enrobés denses

Le liant des enrobés ne contenant aucun produit volatil, la prise est beaucoup plus rapide qu'avec les catégories d'enrobés examinées plus haut. On obtient un enrobé doué d'une forte cohésion pouvant être mis en œuvre en fortes épaisseurs (dans la limite des possibilités de compactage. L'absence de risques de fluage et la bonne imperméabilité du matériau constituent ses meilleures qualités.

I.6.2.2.1.3.2. Limites d'emploi

Elles sont définies par la stockabilité et la maniabilité de l'enrobé. Celui-ci doit être mis en œuvre et compacté avant l'élimination de l'eau.

I.6.2.2.2. Usages spécifiques

Une très grande utilisation des enrobés à l'émulsion a été trouvée dans les aires de jeux (tennis, frontons, etc....)

Dans ces réalisations sont utilisés en général des enrobés ouverts ou semi-denses stockables.

La mise en œuvre est réalisée soit à la main, le nivellement se faisant à l'aide de règles, soit au moyen d'un finisseur.

La mise en service de l'aire de jeux peut se faire dès que l'évaporation des solvants est terminée (délai de 15 jours à 3 semaines).

La cohésion de la surface est renforcée par l'application d'une peinture compatible.

I.6.2.2.2.1. Avantages

Pour les aires de jeux, les enrobés à l'émulsion donnent des tapis d'une grande souplesse, sur lesquels l'eau de pluie ne séjourne pas. Ces tapis ne présentent pas de joints de construction ni de fissuration. Les réparations ultérieures éventuelles sont très faciles à réaliser.

I.6.2.2.3. Enrobés pour couches de roulement

Depuis plus de dix ans, l'utilisation des enrobés à l'émulsion pour couche de roulement s'est très sensiblement développée. Les types de chantiers sont les suivants :

- Fabrication en centrale fixe d'enrobés ouverts mis en œuvre à la niveleuse ou au finisseur ;
- Fabrication et mise en œuvre simultanées sur chantier d'enrobés ouverts par une machine autonome de type motopaver.

I.6.2.2.3.1. Avantages

Les enrobés pour couche de roulement s'étalent sur des épaisseurs très variables (de 3 à 22 cm). Ils présentent une drainabilité permanente; les phénomènes d'aquaplanage dus à la présence d'eau sur la chaussée sont supprimés ainsi que les phénomènes d'éblouissement.

La rugosité de la surface est forte. Les rendements d'exécution peuvent atteindre 1000 tonnes par jour.

Le tapis présente un bon comportement même s'il est de faible épaisseur et repose sur un support compressible ou à fortes déflexions.

Le dosage en bitume relativement faible et la densité inférieure à 2,10 permettent une économie appréciable.

I.6.2.2.3.2. Précautions d'emploi

Ce matériau est poreux, il est nécessaire de prévoir l'écoulement des eaux d'infiltration. Etant donné la porosité des enrobés ouverts, il y a lieu de rendre le support étanche.

Par ailleurs, pour renforcer la cohésion superficielle due à l'action des pneumatiques, il est parfois nécessaire de procéder à un traitement de surface.

I.6.2.2.3.3. Domaines d'emploi

Les enrobés à l'émulsion sont utilisés sur les chaussées supportant un trafic inférieur à T1. Le tapis réalisé a pour but de rectifier le profil de la chaussée et améliorer le confort de la circulation ou d'établir une couche de roulement définitive.

I.6.2.3. Formulation

I.6.2.3.1. Spécifications et résultats

Les formulations font l'objet de spécifications internes aux entreprises spécialisées et doivent permettre d'atteindre les résultats fixés par le cahier des clauses techniques particulières pour la couche de surface construite et concernant en particulier :

- L'imperméabilisation du support ;
- Le lissage de petits défauts de surface ;
- Le reprofilage éventuel des altérations de profil en travers d'amplitude faible ;
- La persistance de la rugosité à long terme (mesure périodique de la hauteur de sable et du coefficient de frottement longitudinal en rapport avec le niveau de trafic et la vitesse des véhicules) ;
- La durabilité.

I.6.2.3.2. Les familles d'enrobés coulés à froid

Elles comprennent trois catégories à base d'émulsions surstabilisées qui correspondent à trois générations de procédés :

I.6.2.3.2.1. Emulsions de bitume pur, sans solvant (première génération)

La formulation de ces émulsions est modulée en fonction de la nature des granulats et des performances à atteindre, essentiellement par le choix de divers émulsions et additifs spéciaux. La rupture de l'émulsion est contrôlée et permet une mise sous trafic rapide (inférieure à 30 minutes).

I.6.2.3.2.2. Emulsions de bitume modifié à base de latex (deuxième génération)

Dans cette catégorie, le développement le plus important a porté sur les émulsions de bitume modifié du type biphasé, dont le principe consiste à mélanger, dans un homogénéisateur adapté, un bitume, un émulateur et un latex.

La formulation est aussi modulée dans ce cas comme dans le précédent, et la mise sous trafic reste également rapide.

I.6.2.3.2.3. Emulsion de bitume modifié à base de polymères (troisième génération)

L'émulsion de bitume modifié est du type monophasé dont le principe consiste à mettre en émulsion un bitume préalablement modifié par des polymères.

I.6.2.4. Fabrication et application

I.6.2.4.1. Matériels de fabrication

I.6.2.4.1.1. Les machines traditionnelles

La fabrication et l'épandage de l'enrobé coulé à froid sont effectués au moyen d'une machine mobile, opérant en continu, avec une autonomie liée au volume de granulats que peut contenir la machine (10 à 15 m³).

Le chargement de tous les constituants est effectué de façon discontinue. Les caractéristiques principales de la machine sont les suivantes :

- une ou deux trémés à granulats débitent en série sur un tapis de distribution alimentant le malaxeur;
- une trémie pour le filler, agent de rupture, et deux réservoirs, l'un pour l'émulsion, l'autre pour l'eau de mouillage et l'additif éventuel, débitent vers le malaxeur à l'aide d'appareils doseurs asservis à l'entraînement du tapis ;
- un seul moteur, hydraulique de préférence, entraîne le tapis et les pompes, ce qui assure des proportions constantes dans le malaxeur ;
- un malaxeur hélicoïdal (disposé dans le sens longitudinal), est situé à l'arrière de la machine. Les granulats sont d'abord mouillés au moyen d'une rampe diffuseuse par le mélange eau / additif au moment où ils tombent dans le malaxeur. Une autre rampe, située un peu plus en arrière, diffuse l'émulsion.

Éventuellement, une rampe de pulvérisation peut être prévue pour mouiller la chaussée par temps très sec avant l'épandage de l'enrobé coulé à froid de façon à améliorer le collage.

I.6.2.4.1.2. Les machines à chargement frontal

Ce matériel, du type à chargement frontal en continu, a été conçu sur le principe d'un motopaver et d'un malaxeur-finiisseur associés pour la fabrication et l'application d'enrobés coulés à froid. Ce matériel auto-moteur comprend les éléments principaux ci-après :

- une trémie de réception des matériaux chargés par bennes de camions, équipée d'un dispositif permettant une manutention à débit élevé (100 à 150 tonnes/ h) ;
- un élévateur de reprise des matériaux de la trémie de réception ;

- une trémie de réserve des matériaux à grande capacité (10 à 15 tonnes) permettant une grande souplesse entre deux vidanges de camions et constituant un stock-tampon ;
- trois réservoirs (eau, émulsion, additif) de capacités adaptées au débit de la machine ;
- une trémie de filler ;
- une cuve de malaxage avec deux lignes d'arbres parallèles munis de pales inclinées.

I.6.2.4.2. Dispositif d'épandage

Ce dispositif, indépendant du type de machine de fabrication, est constitué d'un traîneau de répartition (spreader) de largeur réglable en fonction de la largeur de la chaussée à traiter.

Le mélange fabriqué dans le malaxeur descend par gravité dans le traîneau au moyen d'une goulotte.

Le traîneau est équipé de deux lignes d'arbres munies de palettes inclinées. Le maintien de la qualité du mélange et sa bonne répartition sont obtenus par des variations de vitesse et les inversions de marche des arbres à palettes.

I.6.2.4.3. Condition d'application

I.6.2.4.3.1. Reprofilage

La capacité de reprofilage des enrobés coulés à froid étant limitée, il est recommandé de procéder à un reprofilage préalable :

- en enrobé coulé à froid 0 / 6 ou 0 / 10 pour les flèches comprises entre 2 et 4 cm,
- en enrobé à chaud ou par fraisage pour les déformations supérieures à 4 cm.

I.6.2.4.3.2. Dosage

Les dosages moyens varient, selon l'état du support, dans les fourchettes suivantes données à titre d'exemples :

- ECF 0/6 : 12 à 16 kg/m² (de granulats secs)
- ECF 0/10 : 16 à 20 kg/m² (de granulats secs)

I.6.2.4.3.3. Remise en circulation

Le délai est fonction des conditions climatiques et de l'état du support. En pratique, il varie de quinze à trente minutes.

I.6.2.4.4. Qualités et avantages

D'une manière générale, un tapis d'enrobés coulé à froid présente, en tant que couche de roulement, les qualités suivantes :

- durabilité,
- imperméabilité,
- léger reprofilage, surtout lorsque la mise en œuvre comporte deux couches,
- faible bruit de roulement, avantage appréciable en traverses et en zones urbaines,
- excellente anti-glissance qui se traduit par une adhérence élevée constituant un point essentiel pour l'amélioration de la sécurité routière; les enrobés coulés à froid de formulation 0/8 et 0/10, soumis à un trafic lourd, se situent en matière de coefficient de frottement longitudinal en bonne place dans le fuseau « tous revêtements », en particulier aux vitesses élevées.

A ce qui précède, il y a lieu d'ajouter l'absence de rejets de gravillons, le maintien de l'adhérence (pas d'indentation), le traitement efficace des chaussées poreuses, la possibilité de traiter localement les ornières longitudinales généralisées et de traiter les chaussées comportant des fissures non actives (fissures de vieillissement par oxydation par exemple).

I.6.2.4.5. Domaine et technique d'emploi

La technique est particulièrement bien adaptée aux travaux d'entretien préventif et, dans une certaine mesure, aux travaux d'entretien curatif, lorsqu'un renforcement de structure n'est pas recherché. Cette technique s'applique également aux travaux neufs.

I.6.2.4.5.1. Trafic

La modulation de la formule permet d'adapter la technique à toutes les classes de trafic, depuis les trafics les plus faibles jusqu'aux trafics T1 inclus.

Les caractéristiques des granulats sont, bien entendus, fonction de l'intensité et de la vitesse du trafic.

I.6.2.4.5.2. Support

Les enrobés coulés à froid s'appliquent aussi bien sur support flexible (enrobés, enduits) que sur support rigide (béton, graves hydrauliques).

Il faut souligner le domaine d'application privilégié qui concerne les chaussées poreuses ou présentant de façon hétérogène des zones avec porosité variable ; dans certains cas, le traitement préalable consiste en l'application d'un coulis bitumineux traditionnel.

La technique, destinée à la réalisation de couches de roulement, permet :

- ❖ dans le cas de supports peu déformés, le reprofilage total conduisant à la rectification du profil ;
- ❖ dans le cas de supports déformés (dans certaines limites), la restauration de l'uni par application en deux couches, la première assurant le reprofilage.

I.6.2.4.5.3. Types d'utilisation

Le domaine concerne, de manière non limitative :

- l'entretien des chaussées en voirie urbaine et en rase campagne, même soumises à un trafic allant jusqu'au niveau T1 ;
- la couche de roulement neuve sur couche de base en grave bitume ou grave-émulsion ;
- les revêtements neufs sur bandes d'arrêt d'urgence et parkings d'autoroutes ;
- les parkings de grandes surfaces, cours d'usines et aires de jeux.

Chapitre II

Émulsion de bitume

Chapitre II : Emulsion de bitume

II.1. Introduction

Bien qu'apparaissant, à première vue, comme un système complexe et artificiel, les émulsions sont en fait extrêmement répandues parmi les produits que nous utilisons quotidiennement et comprennent de nombreuses substances naturelles comme le lait ou le latex. Elles interviennent dans notre alimentation, dans nos ordonnances pharmaceutiques et dans nos produits domestiques.

Cette grande variété des utilisations des émulsions tient toujours à une même cause : l'extrême division de la substance émulsionnée qui crée une grande surface spécifique et facilite :

- l'étalement d'un film sur une surface : peintures, vernis, etc....
- l'absorption à travers une membrane : produits alimentaires, laits de beauté, pommades, etc....
- l'utilisation de corps visqueux sous forme fluide.

Aussi ne pouvons-nous être étonnés de retrouver ces propriétés des émulsions adaptées aux techniques routières lorsqu'il est nécessaire soit de traiter une surface, soit de pénétrer dans un corps de chaussée.

II.2. Définition - types d'émulsions

Une émulsion est une dispersion de deux liquides, non miscibles, l'un dans l'autre, préparée généralement à l'aide de produit dénommé émulsif ou émulsifiant. Elle est composée de deux phases, une phase dispersée et une phase dispersante.

Les émulsions directes, c'est-à-dire de type "huile dans l'eau", sont constituées d'un liquide hydrocarboné dispersé dans l'eau.

Les émulsions inverses, c'est à dire du type "eau dans l'huile", sont constituées d'eau dispersée dans un liquide hydrocarboné.

Les deux phases sont séparées par un film protecteur d'émulsifiant dont les molécules tapissent la surface des particules. Ces molécules ont leur partie apolaire "chaîne hydrocarbonée" piquée dans la phase hydrocarbonée "ou phase d'huile", leur partie polaire émerge dans l'eau et crée en s'ionisant, des charges électriques à la surface des particules.

Le signe de ces charges confère aux émulsions leur caractère anionique ou cationique :

- ❖ les émulsions anioniques possèdent des particules qui se dirigent, dans le phénomène d'électrophorèse, vers l'anode. Elles sont donc chargées négativement.
- ❖ les émulsions cationiques possèdent des particules qui se dirigent, dans le phénomène d'électrophorèse, vers la cathode ; elles sont donc chargées positivement.

II.3. Les émulsions de bitume

Les émulsions de bitume utilisées en technique routière sont des émulsions directes dans lesquelles la phase dispersée est un bitume pur, fluidifié ou fluxé. Aussi permettent-elles la mise en service d'un liant visqueux sous forme fluide.

Ces émulsions sont définies par leur répétition granulométrique et leur composition : nature et quantité de liant, d'émulsifiant, d'acide ou de base servant à salifier l'émulsifiant, qui déterminent leurs caractéristiques physico-chimiques (PH, conductivité, signe des charges, intensité des répulsions électrostatiques), et leurs caractéristiques technologiques (stabilité, vitesse de rupture, adhésivité et viscosité).

II.3.1. Principaux emplois des émulsions

- a. **Réparations par « point à temps »** : l'émulsion doit être adhésive, relativement visqueuse et représenter une rupture rapide.
- b. **Enduits superficiels** : les critères de choix sont les mêmes que pour les réparations.
- c. **Enrobage** : la viscosité et la rupture doivent être particulièrement étudiées afin de permettre la répétition homogène du liant sans provoquer de pertes par écoulement.
- d. **Imprégnation** : l'émulsion doit être fluide et très adhésive.
- e. **Enrobés denses pour répartitions et graves émulsion** : la vitesse de rupture doit être parfaitement contrôlée.

II.3.2. L'émulsification

L'émulsification consiste à diviser le bitume en fines particules chargées, douées d'un pouvoir répulsif les unes pour les autres.

Elle nécessite simultanément une énergie mécanique de cisaillement du liant donnée par la turbine et une énergie physico-chimique apportée par l'émulsifiant qui doit :

- Abaisser la tension interfaciale entre la phase hydrocarbonée et la phase aqueuse ; il diminue donc le travail d'émulsification.
- Créer un film protecteur autour des particules.
- Eventuellement, il peut jouer le rôle de dope d'adhésivité.

Ces diverses exigences nécessitent que l'émulsifiant soit sous forme ionisable et qu'il possède une structure chimique telle qu'il puisse former un film interfacial.

La gamme des émulsifiants généralement utilisés, compte tenu de leur coût et de leur efficacité, se réduit :

- pour les émulsions anioniques : aux acides gras, abiétiques et naphéniques, salifiés par une base forte (en règle générale la soude ou le potasse).
- pour les émulsions cationiques aux polyamines, amido-amines, imidazolines et ammoniums quaternaires à chaîne grasse. L'acide fort servant à la solidification est généralement l'acide chlorhydrique.

II.3.3. Choix de la formulation

Il n'y a guère de formulation type ; la formule doit être mise au point pour chaque bitume et chaque technique d'emploi.

Toutefois, il faut tenir compte d'un certain nombre de règles générales :

1- La quantité d'acide ou de base ajoutée dans la phase aqueuse doit être calculée afin que l'émulsifiant présent sous forme ionisée soit en quantité suffisante.

2- La concentration en liant ne doit pas dépasser le seuil au-dessus duquel la viscosité atteint des valeurs peu compatibles avec les conditions d'emploi des émulsions. Ce seuil de l'ordre de :

- 65% de bitume pour les émulsions anioniques.
- 70% de bitume pour les émulsions cationiques.

Cette différence de comportement des émulsions anioniques et cationiques tient à l'étendue granulométrique plus importante dans le cas des cationiques.

3- Il est préférable, dans l'absolu, qu'une partie de l'émulsifiant soit, à l'origine, dans la phase hydrocarbonée. Aussi utilise-t-on, pour les émulsions anioniques, des bitumes cationiques acides ou acidifiés.

Par contre, l'adjonction d'émulsifiant cationique dans le bitume pose des problèmes chimiques et technologiques très aigus, elle ne s'utilise que dans des cas très particuliers.

II.3.4. Conditions d'émulsification

L'émulsion se forme en faisant arriver simultanément dans la turbine, le bitume et la phase aqueuse. La température du bitume est choisie pour obtenir une viscosité d'environ 200 centipoises, ce qui donne généralement :

- 140°C pour les bitumes 180/220
- 150°C pour les bitumes 80/100

- 160°C pour les bitumes 40/ 50

Pour limiter le moussage, la température de la phase aqueuse est calculée, grâce à un bilan thermique, de telle sorte que celle du mélange ne dépasse pas 95°C.

II.3.5. Caractéristiques technologiques des émulsions

II.3.5.1. Stabilité des émulsions

II.3.5.1.1. Aspect théorique

On peut considérer l'émulsion comme formée par un ensemble de particules : la surface de celle-ci est tapissée par des molécules de savon dont la partie apolaire est piquée dans le bitume et dont la partie polaire émerge dans l'eau ; cette partie polaire s'ionisant :

- Pour l'émulsifiant cationique : $R-NH_2 + CH \longrightarrow R-NH_3^+ + Cl^-$
- Pour l'émulsifiant anionique : $R-COOH + NaOH \longrightarrow RCOO^- + Na^+ + H_2O$

II.3.5.1.2. Signification de la stabilité

L'émulsion de bitume est par définition un système instable; une émulsion absolument stable vis-à-vis des granulats ne serait d'aucun intérêt routier. Il est nécessaire de considérer deux sortes de stabilité :

- La stabilité au stockage, que l'on désire aussi grande que possible.
- La stabilité vis-à-vis des granulats, dont les limites supérieure et inférieure sont imposées par les techniques d'emploi, il est ici préférable de parler de vitesse de rupture.

II.3.5.1.3. Stabilité au stockage

Il faut distinguer trois phénomènes : la décantation, la floculation et la coalescence.

a. La décantation

Elle peut se traduire, soit par une sédimentation, soit par un crémage.

b. La sédimentation

Hétérogénéité de la teneur en eau pour laquelle la teneur en eau diminue à la partie inférieure.

c. Le crémage

Est un processus inverse du précédent, on peut donc ralentir la décantation :

- en augmentant la finesse de l'émulsion.
- en s'efforçant d'avoir une différence de masse volumique aussi faible que possible entre la phase dispersée et la phase dispersante. Les émulsions de bitume remplissent aisément cette condition ; la densité du bitume étant

de l'ordre de 1,02 (Tableau II.1); ce n'est pas le cas des émulsions de goudron, celui-ci ayant une densité voisine de 1,25 en augmentant la viscosité de la phase dispersante.

Tableau II.1 : Densité du bitume.

Température (°C)	Densité
15	1,020
20	1,070
25	1,014
30	1,011
35	1,008
40	1,004
45	1,001
50	0,998
55	0,995
60	0,992
65	0,989
70	0,986
75	0,983
80	0,980
85	0,977
90	0,974
95	0,971
100	0,968

d. La floculation

C'est le premier stade de la coagulation. Les particules s'agglomèrent mais ne perdent pas leur individualité ; ce phénomène est encore réversible. Il est très probable que cette agrégation réversible corresponde à un minimum représentant un état d'équilibre entre deux particules.

e. La coalescence

C'est le second stade de la coagulation. Les particules agglomérées se combinent pour donner une particule plus grosse. Ce phénomène est irréversible.

Ces deux derniers phénomènes sont inséparables l'un de l'autre et c'est le plus lent qui détermine la vitesse de rupture. On peut enrayer la rupture en augmentant la teneur en émulsifiant et en se rapprochant du PH optimal de stabilisation, valeur qui varie avec la nature du liant et de l'émulsifiant.

La décantation d'une émulsion peut se définir par des mesures de teneur en eau à différents niveaux dans une éprouvette contenant de l'émulsion.

II.3.5.1.3. Stabilité des émulsions vis-à-vis des granulats

II.3.5.1.3.1. La vitesse de rupture

La vitesse de rupture d'une émulsion sur des granulats est sa principale caractéristique. Son importance technologique est évidente. A ce point de vue, il faut distinguer trois sortes d'émulsions :

- Les émulsions à rupture rapide, recommandées par les travaux de répardage.
- Les émulsions à rupture lente, recommandées pour les travaux d'enrobage.
- Les émulsions à rupture contrôlée, servant aux travaux spéciaux tels que les enrobés denses pour réparation et les graves traitées à l'émulsion.

La vitesse de rupture est liée d'une part aux caractéristiques physico-chimiques de l'émulsion et d'autre part à celles du matériau minéral.

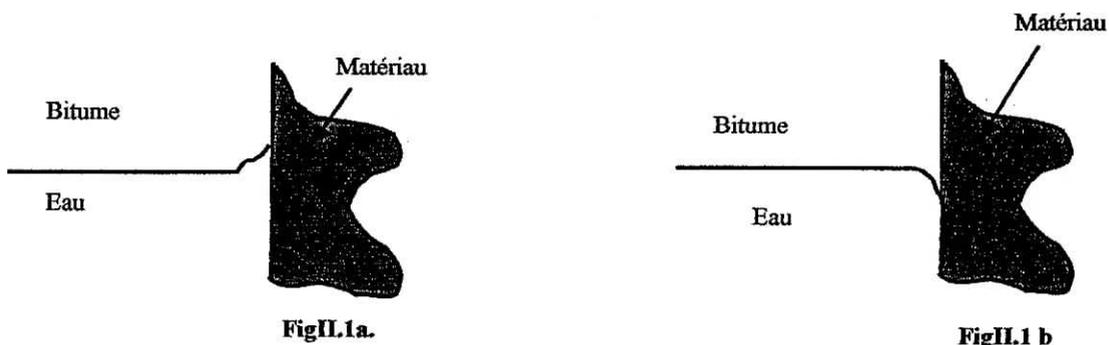
II.3.5.1.3.2. Adhésivité

Adhésivité du liant et angle de contact

L'adhésivité d'un bitume est une de ses propriétés principales du point de vue technologique.

Lorsque les trois phases, bitume eau et pierre, sont en contact, il peut se passer deux phénomènes différents :

- Mouillage préférentiel par l'eau, c'est-à-dire angle de contact favorable à l'eau (FigII.1 a).
- Mouillage préférentiel par le bitume, c'est-à-dire angle de contact favorable au bitume (FigII.1 b).



Dans le premier cas, il n'y a pas enrobage au sens physico-chimique du mot, dans le second cas il y a enrobage. Si l'on veut être plus rigoureux, on doit considérer l'angle de contact dynamique et non l'angle statique.

Supposons que l'on immerge et émerge une plaque de granulat dans l'eau et le bitume comme le montrent les figures 1. On peut se trouver en présence de 3 cas :

a)- l'angle de contact "sortie" est favorable au bitume mais l'angle de contact "entrée" est favorable à l'eau ; un granulat enrobé résistera à l'eau, mais il sera difficile d'enrober les matériaux humides. On a l'habitude d'appeler ce phénomène adhésivité passive.

b)- Les angles de contact "entrée" et "sortie" sont défavorables au bitume ; pas d'enrobage durable possible. Il est nécessaire de doper.

c)- les angles de contact sont tous deux favorables au liant ; il est possible d'enrober les matériaux humides et le granulat enrobé sera résistant à l'eau. On a l'habitude d'appeler ce phénomène d'adhésivité active.

Dans les applications routières du bitume, nous avons toujours besoin de l'adhésivité passive ; par contre, l'adhésivité active n'est pas toujours nécessaire (cas des enrobés à chaud). Il est donc impossible d'utiliser un même test d'adhésivité pour toutes les applications routières du bitume.

II.3.5.2. Adhésivité des émulsions

En ce qui concerne les émulsions cationiques de bitume, l'émulsifiant nécessaire à la fabrication de la dispersion est une dope d'adhésivité. Mais parfois le bitume est dopé indépendamment de la mise en émulsion, c'est le cas des émulsions anioniques dopées que l'on devrait appeler plus logiquement émulsions anioniques de bitume dopé.

L'adhésivité d'une émulsion dépend :

- de la nature du bitume employé et des additifs éventuels.
- de la nature et de la quantité d'émulsifiant employé : on peut s'apercevoir que l'adhésivité est améliorée par augmentation de la quantité d'émulsifiant ; mais on ne peut aller trop loin dans cette voie, une quantité trop grande d'émulsifiant risquant de rendre l'émulsion trop stable.
- du PH de l'émulsion : chaque émulsifiant a un intervalle de PH où l'adhésivité est la plus grande.
- de la granulométrie de l'émulsion : on a pu s'apercevoir, sans bien en éclaircir d'ailleurs les raisons profondes, que pour les émulsions cationiques l'adhésivité était d'autant plus grande que l'émulsion avait tendance à la monodispersion.

- de la nature minéralogique du granulat, de sa propreté, de son humidité et de ses conditions de stockage.

II.3.5.3. Viscosité

La viscosité est une caractéristique importante qui intervient :

- ❖ pour le transfert à travers les canalisations, le pompage et le répandage.
- ❖ pour l'utilisation sur le chantier.

II.3.5.3.1. Facteurs influençant la viscosité

- La teneur en liant.
- La granulométrie.
- La viscosité de la phase dispersante.
- La viscosité de la phase dispersée.
- La nature de l'émulsifiant.

II.3.6. Caractéristiques physico-chimiques

II.3.6.1. Le PH des émulsions

Le PH d'une émulsion est en fait une caractéristique de la phase aqueuse après émulsification. Il peut être perturbé par des substances susceptibles de migrer d'une phase dans l'autre.

Il a une très grande importance, tant du point de vue stabilité que du point de vue adhésivité : on sait qu'en règle générale, l'adhésivité des émulsions cationiques est plus grande pour les PH compris entre 3 et 5 que pour des PH inférieurs à 3, mais qu'au contraire la stabilité est meilleure pour des PH plus bas.

Il faut toutefois signaler que l'on rencontre des émulsions très stables bien que leur PH soit élevé; il suffit que la quantité d'émulsifiant salifié, c'est-à-dire sous forme ionisée, soit suffisante ou que l'on utilise un stabilisant ; ce qui, dans la pratique, est plus rentable.

II.3.6.2. Conductivité des émulsions

La conductivité est fonction de la concentration des électrolytes en solution dans la phase aqueuse. Elle permet, par comparaison des valeurs de PH, de détecter la présence de sels minéraux dissous et peut expliquer certaines instabilités.

- La viscosité d'une émulsion est d'autant plus grande (toutes choses restantes égales par ailleurs) que l'émulsion est plus fine et son écart type plus petit.

- La stabilité varie en fonction directe de la finesse.

On peut mesurer les tailles des particules par deux sortes de méthodes :

1. Les méthodes globales : opacité et hématimétrie qui ne donnent qu'un diamètre moyen.
2. Les méthodes par dénombrement tel le comptage avec l'appareil "Coulter" : ces méthodes donnent toute la courbe granulométrique.

La distribution granulométrique des émulsions est du type logarithmo-normale, c'est-à-dire qu'elle s'obtient à partir de loi normale par un simple changement de variable.

II.3.6.3. Facteurs influant sur la granulométrie

- Nature de l'émulsifiant.
- Quantité d'émulsifiant
- Viscosité de liant au moment de l'émulsification.
- Quantité d'acide (ou de base).

II.3.6.4. Technologie de fabrication des émulsions de bitume

Le but est de décrire succinctement les équipements et processus utilisés pour leur fabrication en nous limitant au seul cas des émulsions cationiques qui tendent rapidement à remplacer les anioniques dans la plupart des applications.

Au fur à mesure que sera décrit chaque poste, les variantes possibles seront signalisées en précisant brièvement leurs avantages et leurs inconvénients.

Une usine de fabrication d'émulsions comprend :

- Un ensemble de réception et de stockage des matières premières.
- Un ensemble de fabrication comportant l'appareillage nécessaire pour :

- 1- Préparer la phase aqueuse.
- 2- Amener les constituants à la température exigée pour la fabrication.
- 3- Les doser aux proportions et avec la constance voulue.
- 4- Les émulsionner afin d'obtenir un produit répondant aux propriétés désirées.
- 5- Un ensemble de stockage et de distribution des produits élaborés.
- 6- Des annexes, tels que la chaufferie et le laboratoire de contrôle.

II.3.7. Fabrication de l'émulsion

La fabrication de l'émulsion s'opère en deux stades :

- Le premier est celui de la préparation des deux phases : phase aqueuse et phase liant à partir des cinq constituants de base.

- Le second correspond à l'émulsification de la phase liant dans la phase aqueuse

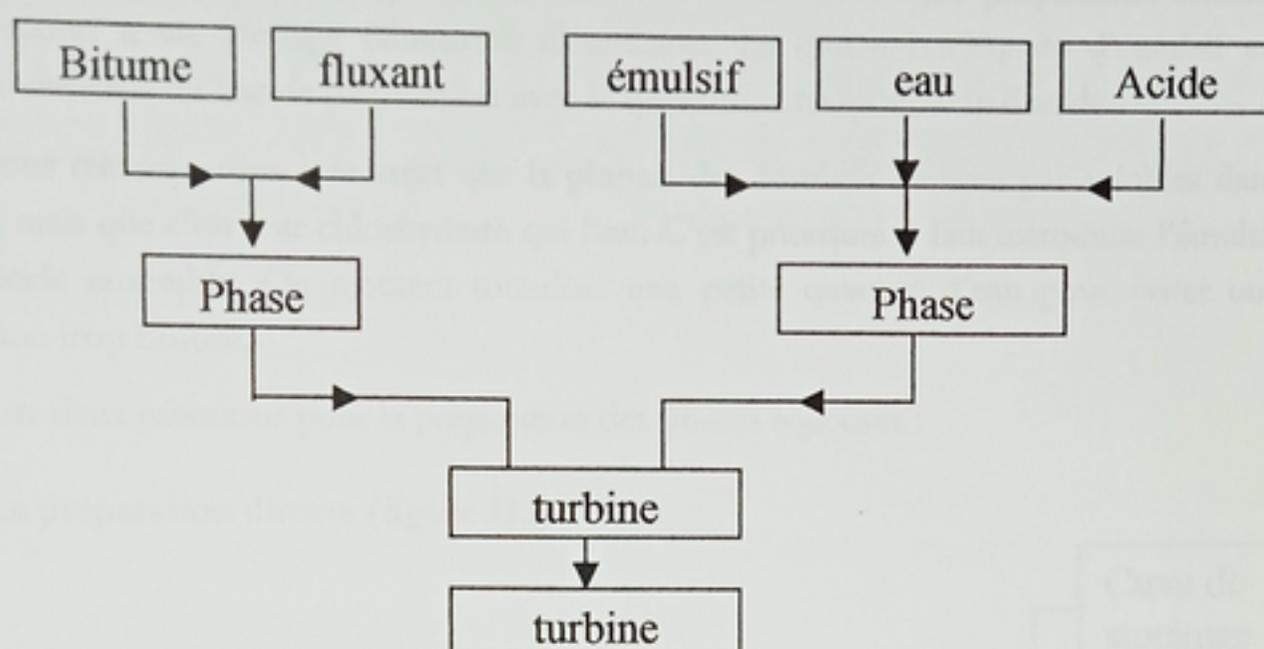


Figure II.2 : Schéma théorique de fabrication d'une émulsion.

II.3.7.1. Préparation de la phase liant

II.3.7.1.1. Fluxage

Si le plus souvent le bitume est employé pur, il arrive parfois qu'une quantité de fluant soit nécessaire ; c'est le cas des émulsions fabriquées en saison froide ou de certaines fabrications pour usages spéciaux.

Le fluxage peut se faire par admission directe du fluxant à l'entrée de la turbine. C'est le procédé le plus simple, mais le mélange du liant et du fluant n'est pas intime et l'on risque fort d'aboutir à la superposition de deux émulsions : une de bitume et l'autre de fluant.

Il semble préférable de préparer le liant à l'avance dans un malaxeur conçu à cet effet. C'est une opération supplémentaire, mais le résultat est beaucoup plus sûr qu'avec le procédé direct.

II.3.7.1.2. Mise en température de la phase liant

Pour que le liant se disperse dans la phase aqueuse, il est nécessaire que sa viscosité soit relativement faible.

La viscosité optimale est de l'ordre de 200 centipoises en maintenant le liant à une température, bien déterminée en fonction de sa pénétrabilité, qui sera pour un bitume pur 180/200, environ 140°C ; pour un bitume 80/100, 150°C ; pour un bitume 40/50, 160°C. Les conditions idéales d'émulsification impliquent de maintenir ces températures à un ou deux degrés près.

II.3.7.2. Préparation de la phase aqueuse

La phase aqueuse est préparée de façon discontinue. Chaque préparation unitaire correspond à un tonnage déterminé d'émulsion. La quantité adéquate d'émulsif est introduite dans un bac de préparation avec la quantité correspondante d'acide.

Nous remarquerons à ce sujet que la plupart des émulsifs ne sont pas solubles dans l'eau, mais que c'est leur chlorhydrate qui l'est. C'est pourquoi il faut introduire l'émulsif et l'acide ensemble. On ajoutera toutefois une petite quantité d'eau pour éviter une réaction trop brutale.

On cite deux processus pour la préparation des phases aqueuses :

1 – La préparation directe (figure II.3)

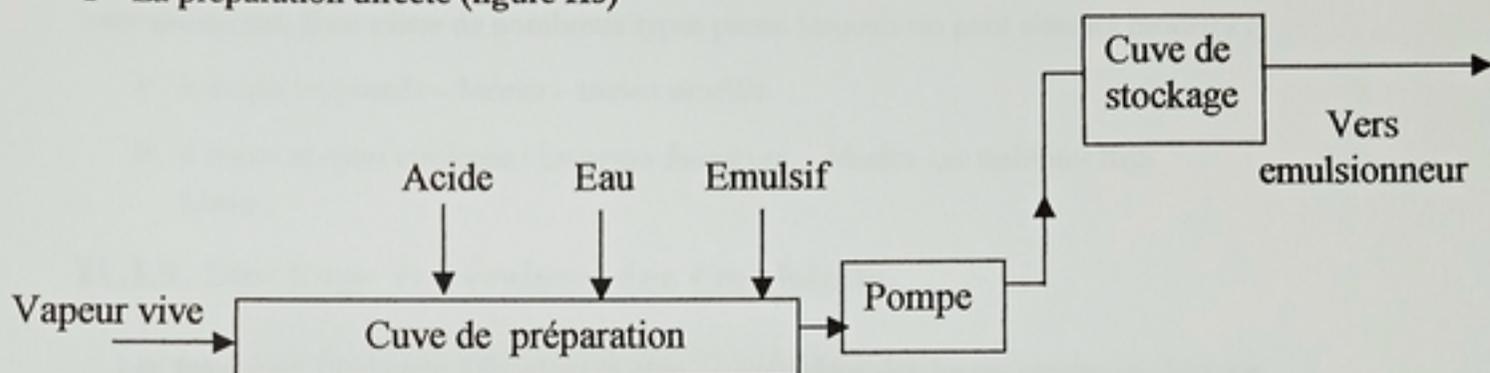


Figure II.3 : Préparation directe.

2 - La solution mère (figure II.4) :

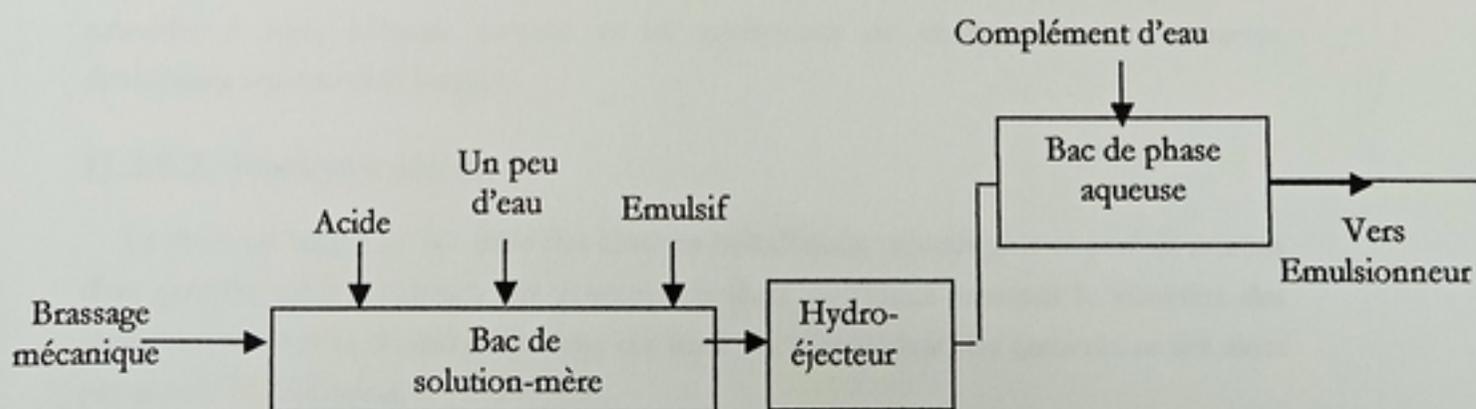


Figure II.4 : La solution mère.

II.3.7.2.1. Mise en température de la phase aqueuse

Comme nous l'avons déjà dit, pour assurer une bonne émulsification, la température du bitume doit être celle qui correspond à une de 200 centipoises.

Par ailleurs, la phase aqueuse doit être à une température telle que, à la sortie de la turbine, l'émulsion soit la plus chaude possible, tout en restant naturellement, au-dessous de 100°C. Pour des raisons de sécurité, on se limite à 90°C.

II.3.8. Emulsification

II.3.8.1. Emulsionneur

La fabrication des émulsions est faite à l'aide de moulins colloïdaux ou de turbomalaxeurs. Il en existe de nombreux types parmi lesquels on peut citer les modèles :

- à doigts : appareils – Moritz - ancien modèle.
- à stator et rotor coniques : broyeurs finisseurs - Moritz -,et turbine - Rol-Lister .

II.3.9. Stockage et livraison des émulsions

Les émulsions fabriquées s'écoulent le plus souvent dans des fosses situées en dessous de l'émulsionneur. Certains appareils peuvent aussi refouler les produits élaborés dans des cuves en surélévation. Mais on utilise peu cette possibilité car cela se fait au détriment du rendement des appareils.

II.3.9.1. Stockage souterrain

L'ensemble du stockage des émulsions peut se trouver dans des fosses en béton. C'est une solution économique et les déperditions thermiques sont peu importantes.

Par contre, les véhicules de transport ou de répandage sont dans l'obligation de procéder à leurs propres moyens et les opérations de changement des camions deviennent souvent fort longues.

II.3.9.2. Stockage aérien

Le stockage aérien se fait dans des citernes métalliques, calorifugées et parfois munies d'un système de réchauffage, des pompes de forte puissance assurant le transfert des émulsions des fosses de réception dans ces bacs. Le chargement des camions se fait alors par gravité et l'opération est très rapide.

II.3.9.3. Livraison

Les émulsions sont livrées, soit directement dans les répandeuses ou appareils d'utilisation, soit dans des véhicules gros porteurs qui assurent l'approvisionnement des chantiers ou des dépôts locaux.

De nombreuses livraisons sont encore effectuées volumétriquement. Mais les usines s'équipent de plus en plus de ponts-bascules permettant un contrôle plus rigoureux des quantités livrées.

Caractéristiques	Méthodes normalisées de référence	Rapide			Semi-rapide			Lente			Surstabilisée	
		Classes			Classes			Classes			Classes	
		ECR 60	ECR 65	ECR 69	ECM 60	ECM 65	ECM 69	ECL 55	ECL 60	ECL 65	ECS 55	ECS 60
Teneur en eau (%)	NF T 66-023	39 à 41	34 à 36	30 à 32	39 à 41	34 à 36	30 à 32	44 à 46	39 à 41	34 à 36	44 à 46	39 à 41
Pseudo viscosité Engler à 25°C		2 à 15	> 6	—	> 2	> 6	—	< 15	2 à 15	> 6	< 15	> 2
Pseudo viscosité STV à 25°C	NF T 66-020	—	—	> 9	< 18	—	> 9	—	—	—	—	< 18
Homogénéité :		< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
-particules supérieures à 0.63 mm	NF T 66-016	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25
-particules comprises entre 0.6 mm et 0.16 mm		< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Stabilité au stockage par décantation	T 66-022	> 90	≥ 90	≥ 90	≥ 90	≥ 90	≥ 90	—	—	—	—	—
Adhésivité :		≥ 75	≥ 75	≥ 75	≥ 75	≥ 75	≥ 75	—	—	—	—	—
-émulsion a stockage limité		< 100	< 100	< 100	80 à 140	80 à 140	80 à 140	> 120	> 120	> 120	—	—
1 ^{ère} partie de l'essai		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2 ^{ème} partie de l'essai		positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive
-émulsion stockable		positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive
Indice de rupture	NF T 66-017	< 100	< 100	< 100	80 à 140	80 à 140	80 à 140	> 120	> 120	> 120	—	—
Stabilité au ciment	NF T 66-024	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	≤ 2
Charge de particules	NF T 66-021	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive

Tableau II.2 : Caractéristiques des émulsions cationiques

Chapitre III

Les bitumes

Chapitre III : Les bitumes

III.1. Les bitumes purs

Le traitement de la fraction du pétrole brut (par distillation, soufflage ou par craquage) permet d'obtenir un mélange d'hydrocarbures de couleur sombre à poids moléculaire élevé appelé « bitume ».

Le bitume est l'un des matériaux les plus importants dans le domaine du génie civil, vu qu'il possède de bonnes caractéristiques telles que :

- la bonne adhérence avec la majorité des matériaux (pierres, bois, métal et verre).
- la capacité de lier des granulats entre eux en leur offrant une certaine souplesse, etc.

Les bitumes utilisés à l'heure actuelle proviennent de la transformation du pétrole brut. On distingue quatre types de bitumes selon leur fraction :

- **BITUME I** : bitume de distillation.
- **BITUME II** : bitume reconstitué.
- **BITUME III** : bitume soufflé.
- **BITUME IV** : bitume de cracking.

Les bitumes se présentent comme des composés dont la constitution et le comportement sont extrêmement complexes. On admet généralement que les bitumes sont constitués par une suspension de micelles d'asphaltènes peptisées par les résines dans un milieu d'huiles saturées et d'huiles aromatiques. Cette conception est importante dans la mesure où elle permet d'établir des relations entre l'analyse de la composition chimique après fractionnement en groupes génériques (asphaltènes, résines, huiles aromatiques et huiles saturées) et les propriétés mécaniques et rhéologiques du liant.

III.2. La composition chimique

Quelle que soit la méthode de séparation utilisée, la quasi-totalité des procédés séparent les asphaltènes des maltènes par précipitation partielle des premiers cités par un alcane de bas poids moléculaire.

III.2.1. Les asphaltènes

Ils peuvent représenter jusqu'à 30% du bitume avec un aspect solide noir et cassant. Depuis plusieurs années de nombreux travaux ont été réalisés afin de mieux comprendre la structure des asphaltènes.

III.2.2. Les maltènes

Ils représentent 70% et plus du bitume. La séparation par chromatographie permet de différencier les huiles des résines :

- les huiles peuvent être à caractère paraffino-naphténique (huiles saturées), d'aspect huileux blanchâtre, de fraction la plus légère, constituées de longues chaînes droites de type (C_nH_{2n}) ; ou bien à caractère aromatique d'aspect huileux brun foncé, d'apparition dans la structure de noyaux aromatiques de type naphténo-aromatique.
- les résines d'aspect noir brillant, sont caractérisées par de nombreuses ramifications.

Les huiles saturées sont éluées par l'heptane et les huiles aromatiques (naphténo-aromatiques) par le benzène.

Pour les composés aromatiques polaires (résines), on fait appel au benzène- méthanol puis au trichloréthylène.

III.3. La structure colloïdale

Dans les bitumes routiers, les asphaltènes ne sont pas « solubles », au sens thermodynamique du terme, dans les huiles mais la présence de résines dont la masse moléculaire et surtout la structure chimique sont intermédiaires entre celles des huiles et des asphaltènes permet d'entourer ces derniers d'une enveloppe protectrice qui les conduit à rester en suspension dans la phase malténique. Les asphaltènes sont dits « peptisés » par les résines.

III.3.1. Les états structuraux du bitume

Selon la composition chimique et les concentrations respectives des constituants du bitume, son équilibre colloïdal va-t-être plus ou moins déplacé et donc va conférer au bitume des comportements rhéologiques différents selon la température.

Structure I « GEL »

Elle est caractérisée par l'agglomération de micelles d'asphaltènes formant ainsi un réseau continu dans un milieu dispersant faiblement structuré par les résines. Les bitumes à structure « GEL » sont riches en asphaltènes et ont une phase maltène pauvre en hydrocarbures aromatiques. Ils ont un comportement élastique.

Structure II « SOL »

Elle est caractérisée par la peptisation totale des micelles d'asphaltènes, par les résines. On obtient ainsi une solution diluée et bien stabilisée d'asphaltènes dans un milieu dispersant fortement structuré par les résines. Ceci se rencontre dans les bitumes à phase maltène riche en aromatique. Ces bitumes ont un comportement visqueux.

Structure III « SOL-GEL »

Elle est caractérisée par des agrégats de micelles d'asphaltènes baignant dans un milieu dispersant structuré par les résines et intermédiaire entre I et II ; la majorité des bitumes routiers ont cette structure. Ils ont un comportement viscoélastique.

III.3.2. La stabilité colloïdale

L'état d'équilibre des bitumes, gouverné par la composition chimique de ses constituants, détermine non seulement son comportement rhéologique mais aussi ses variations de comportement avec la température. Il résulte donc d'un équilibre physico-chimique entre les divers constituants.

Ce corps viscoélastique qu'est le bitume peut présenter des structures diverses et variées. Il n'existe pas un bitume mais des bitumes. Cependant, en application routière, les qualités exigées actuellement dépassent souvent les limites auxquelles ils sont soumis. Des additifs ont alors été utilisés pour améliorer leurs propriétés d'usage et notamment des polymères.

III.4. Propriétés des bitumes

III.4.1. Propriétés physiques

Les bitumes de pétrole sont de véritables matières thermoplastiques sous l'influence de la chaleur, ils se ramollissent, se liquéfient et deviennent suffisamment fluides pour être mis en œuvre. Ils reprennent leurs caractéristiques originales dès qu'ils se refroidissent.

Les bitumes sont des liants, dont le pouvoir collant est grand et leur adhésivité à la plupart des matériaux (pierres, bois, métal, verre,...) est excellente. Ils sont insolubles dans l'eau et ne sont pas toxiques. Leur perméabilité à l'eau et à la vapeur d'eau est pratiquement nulle.

L'étanchéité est donc l'une des qualités principales des bitumes. Ils sont de bons isolants thermiques et leur résistance au vieillissement est très bonne.

III.4.2. Résistance à l'attaque chimique

L'expérience a montré que les structures bitumineuses ne sont pas affectées par les solutions chimiques aux concentrations rencontrées dans les sols et les eaux souterraines. Chimiquement, les bitumes sont très peu réactifs. A température ordinaire, ils n'attaquent pas les corps avec lesquels ils sont mis en contact et ils sont solubles dans de nombreux solvants organiques.

III.5. Les essais disponibles sur les bitumes

Le bitume chaud est un fluide qui adhère aux autres matériaux et qui ainsi peut-être appliqué sur d'autres substances, ou leur être mélangé. Après refroidissement à la température ambiante, il devient presque solide mais flexible. Aux très basses températures, il devient dur et fragile, ce qui limite son emploi.

On prépare de grandes quantités de bitumes dont les propriétés mécaniques variées doivent répondre aux spécifications routières et industrielles.

Pour caractériser ces qualités et pour vérifier si un bitume donné répond aux spécifications d'une certaine qualité, différentes méthodes d'essais ont été mises au point. Au début, elles ne visaient qu'à mesurer une propriété mécanique arbitraire permettant de sélectionner les bitumes :

- Le point de FRASS, dans le domaine fragile ;
- La pénétration, dans le domaine quasi-solide ;
- La température de ramollissement Bille et Anneau, au début du domaine fluide.

On cite les essais suivants :

III.5.1. La pénétrabilité [NF T66-004]

C'est une mesure de dureté qui sert de base à la classification des bitumes routiers.

III.5.2. Le point de ramollissement [NF T66-008]

Cet essai nous renseigne sur la consistance du bitume.

III.5.3. La densité relative à 25°C [NF T66-007]

La densité des bitumes est mesurée au pycnomètre de 25°C. Elle est voisine de un (01) pour les bitumes à la température de 25°C.

III.5.4. La perte de masse au chauffage [ASTM D2872-85]

Cet essai permet de s'assurer de l'absence d'une fraction volatile liée à une pollution éventuelle (cet essai s'effectue à l'aide de l'appareil RTFORT).

III.5.5. Le point d'éclair [NF T60-118]

Cette température intéresse la sécurité liée au transport et à la manipulation des produits inflammables.

III.5.6. La ductilité à 25°C [NF T66-006]

La ductilité des bitumes est la longueur atteinte à la rupture du fil dans des conditions normalisées.

III.5.7. L'indice de pénétrabilité

Ce paramètre nous renseigne sur la susceptibilité thermique d'un bitume qui est une des caractéristiques les plus importantes.

La détermination de l'indice de pénétrabilité peut s'effectuer selon deux méthodes :

- La 1^{ère} portant sur la pénétrabilité à différentes températures dite méthode LCPC.
- La 2^{ème} portant sur le point de ramollissement. Cette méthode ne suffit pas pour caractériser cette susceptibilité thermique, en raison des tolérances accordées pour chacune des caractéristiques. Il est d'usage de caractériser cette susceptibilité thermique par l'indice de pénétrabilité (Pfeiffer et Vandarmaal) en supposant que la pénétrabilité correspondante à la température du point de ramollissement BA est de 800°C.

RTFOT (Rolling Thin Film in Oven Test) [ASTM D2872-85]

Lors de la fabrication des enrobés bitumineux, le bitume chauffé à une température variant de 160 à 170°C en présence d'air, subit un choc thermique qui entraîne un vieillissement rapide mais limité. Il est appelé aussi vieillissement à court terme.

La simulation du vieillissement s'effectue à l'aide de l'essai **RTFOT** selon la norme **ASTM D2872-85**.

Les spécifications des bitumes

Tenant compte du climat algérien, du procédé de fabrication du bitume, et de certains critères de performances des chaussées liées à l'orniérage, à la fatigue et à la fissuration à basse température, le CTP (Contrôle Technique des Travaux Publics) après des études spécifiques in-situ et de laboratoires recommande de nouvelles limites de spécifications des bitumes.

Ces limites de spécifications sont données dans les tableaux ci-dessous :

Tableau III.1 : Caractéristiques des bitumes fabriqués par le semi-soufflage.

$$[1 < I_p \leq 3.5]$$

Caractéristiques	Normes	Classe de bitume			
		20/30	40/50	60/70	80/100
Pénétrabilité à 25°C [1/10mm]	NF T66-004	20 à 30	40 à 50	60 à 70	80 à 100
Point de ramollissement [°C]	NF T66-008	62 à 68	57 à 61	52 à 56	46 à 51
Différence de TBA après RTFOT [Δ TBA °C]	NF T66-032	≤ 8	≤ 9	≤ 9	≤ 9
Perte de masse au chauffage [%]	NF T66-011	-	< 1	< 1	< 2
Point d'éclair [°C]	NF T60-118	≥ 250	> 230	> 230	> 230
Densité à 25°C	NF T66-007	1.00 à 1.10	1.00 à 1.10	1.00 à 1.10	1.00 à 1.07

I_p : indice de pénétrabilité.

Tableau III.2 : Caractéristiques des bitumes fabriqués par la distillation directe.

$$[-1 \leq I_p \leq +1]$$

Caractéristiques	Normes	Classe de bitume			
		20/30	40/50	60/70	80/100
Pénétrabilité à 25°C [1/10mm]	NF T66-004	20 à 30	40 à 50	60 à 70	80 à 100
Point de ramollissement [°C]	NF T66-008	52 à 65	47 à 60	43 à 56	41 à 51
Ductilité à 25°C [cm]	NF T66-006	≥ 25	≥ 60	≥ 80	≥ 100
Différence de TBA après RTFOT [Δ TBA °C]	NF T66-032	≤ 8	≤ 9	≤ 9	≤ 9
Perte de masse au chauffage [%]	NF T66-011	< 1	< 1	< 1	< 2
Point d'éclair [°C]	NF T60-118	≥ 250	> 250	> 230	> 230
Densité à 25°C	NF T66-007	1.00 à 1.10	1.00 à 1.10	1.00 à 1.10	1.00 à 1.07

III.6. LES OBJECTIFS RECHERCHES

Les conditions de trafic devenues de plus en plus agressives, alliées à des impératifs d'économie (investissement plus durables dans le temps, couches de plus en plus minces) ont amené les bitumes purs à certaines limites d'emploi par exemples :

- 1) le bitume pur ne permet plus à l'enrobé de type traditionnel d'assurer dans tous les cas une résistance à l'orniérage pour des températures durablement élevées;
- 2) pour un grade plus dur, s'il apporte à l'enrobé un meilleur comportement à l'orniérage, il accroît à l'inverse les risques de fissuration ;

- 3) certains mélanges enrobés de granularité ouverte n'auront pas la résistance mécanique souhaitée du fait de la cohésivité et de l'adhésivité obtenues avec un bitume pur, ni même une durabilité satisfaisante du fait d'une richesse en liant faible ;
- 4) de même, des enduits superficiels sous trafic élevé et lourd ne présentent pas la même durabilité lorsqu'ils sont formulés avec un bitume pur pour les mêmes raisons de qualités mécaniques et d'adhésivité.

Dans ces situations, une solution est de chercher à améliorer certaines des caractéristiques du liant pour accroître les performances de la chaussée suivant les domaines d'application :

- Pour les enrobés ultra-minces ou très minces (2 à 3 cm), dont les formules granulaires sont fortement discontinues, et qui sont appliqués sur des supports en bon état structurel, c'est l'amélioration de la résistance sous les sollicitations de traction et de cisaillement qui est recherchée.

L'objectif est aussi d'obtenir, pour ces enrobés, une épaisseur relativement importante du film du liant autour des gravillon afin d'assurer la durabilité de ces enrobés discontinus plus exposés aux actions de l'environnement et du trafic. Certains polymères (EVA) sont reconnus comme pouvant apporter une amélioration de l'indentation des granulats de cloutage dans la matrice de l'enrobé en particulier en période d'application moins favorable (hiver). Grâce à un meilleur égouttage lors de la mise en œuvre, obtenu par l'emploi de liants modifiés, et qui résulte d'une viscosité plus élevée aux températures d'application, la teneur en liant peut être augmentée et ainsi contribuer à satisfaire aux objectifs précédents.

L'augmentation de l'épaisseur du film de liant retarde son vieillissement et contribue à une plus grande durabilité de l'enrobé.

- Pour les enrobés épais de 5 cm et plus ; et les enrobés minces (3 à 4 cm), la préoccupation principale est la résistance à l'orniérage.

Alors que les bitumes plus durs que ceux normalement utilisés peuvent efficacement combattre ce phénomène mais pas à basse température. Le problème peut être alors traité par l'introduction d'additifs en gardant des bitumes de pénétration moyenne ou par l'emploi de liants ayant un plus large intervalle de plasticité, qu'il s'agisse de liants modifiés ou de bitumes spéciaux.

- Pour les couches d'assise de chaussée, l'objectif peut être l'augmentation de la résistance à la fatigue de l'enrobé sous les chargements répétés du trafic et l'apport d'une certaine flexibilité. Ces qualités sont apportées par les liants modifiés avec des polymères grâce aux propriétés intrinsèques du liant modifié.

- Pour les travaux de renforcement de chaussées, un objectif peut être de minimiser l'épaisseur du rechargement, par exemple dans le cas de travaux en agglomération pour éviter les travaux d'excavation et de relèvement de bordures. Dans cette situation, on pourra chercher à accroître la capacité structurale par l'emploi d'un liant de plus grande rigidité sans pénaliser la résistance en fatigue par un accroissement de la teneur en liant ou l'emploi d'un bitume modifié.

- Pour les membranes destinées à protéger l'assise de chaussée des infiltrations d'eau, ou les couches de surface des remontées de fissures, ce sont les propriétés d'élasticité et une capacité d'allongement qui seront recherchées.

Même l'industrie de l'étanchéité s'intéressait à l'apport des bitumes polymères fortement modifiés : des bitumes élastomères de type SBS en France et en Allemagne, des bitumes plastomères, polypropylène atactique principalement en Italie et en Belgique.

De même, les bitumes modifiés constituent les liants de prédilection pour les chapes d'étanchéité d'ouvrage d'art du fait de leur aptitude à résister aux allongements élevés supportés par les revêtements de surface pour ce type de construction.

Les liants modifiés

Chapitre IV

Les liants modifiés

Chapitre IV : Les liants modifiés

IV.1. Généralités

IV.1.1. Liants modifiés

Il s'agit des liants bitumineux dont les propriétés ont été modifiées par emploi d'un agent chimique qui, introduit dans le bitume de base, en modifie la structure chimique et/ou les propriétés physiques et mécaniques. Il s'agit de liants préfabriqués soit dans une usine séparée du lieu d'utilisation, soit immédiatement avant l'emploi par une unité mobile spécialisée. Le liant ainsi modifié peut être caractérisé en tant que tel séparément du mélange bitumineux.

IV.1.2. Liants modifiés avec additifs

Sont considérés ici les cas d'emploi d'additifs introduits lors de la fabrication de l'enrobé ou de la mise en œuvre de l'enduit. En général, on ne peut pas effectuer de caractérisation séparée de l'ensemble liant et additif ; l'effet de l'additif est apprécié directement sur le mélange bitumineux.

Les différents additifs

Des additifs de différentes natures peuvent être utilisés afin de modifier les caractéristiques des mélanges bitumineux, enrobés ou enduits superficiels. Ces additifs sont répartis dans les familles suivantes :

- Les polymères ajoutés en centrale.
- Les matières plastiques recyclées.
- Les granulats de caoutchouc.
- Les fibres de différents types, minérales, synthétiques ou métalliques.
- Les bitumes et asphaltes naturels.

IV.1.3. Bitumes spéciaux

On qualifiera de bitumes spéciaux, les bitumes issus d'un procédé particulier de raffinage et qui, par certaines de leurs caractéristiques, diffèrent ou vont au-delà des normes définissant les bitumes utilisables en technique routière afin de répondre à certains usages spécifiques.

L'emploi de liants modifiés a aussi été envisagé en matériau d'assise de chaussée du fait de l'amélioration qu'ils apportent à la résistance en fatigue. Mais l'avantage économique recherché par une réduction sensible d'épaisseur a plutôt conduit à l'emploi de bitumes durs afin d'atteindre des modules de rigidité élevés. Ces bitumes dits « spéciaux » (de pénétration 10/20, 15/25, etc.) se sont avérés pour cette application plus économiques que les bitumes modifiés malgré la nécessité d'une teneur en liant forte pour assurer une bonne résistance en fatigue. Ils

ont permis de constituer les Enrobés à Module Élevé (EME) et les Bétons Bitumineux à Module Élevé (BBME).

Différents types de bitumes spéciaux

- Les bitumes durs et les bitumes multigrades utilisés pour les applications d'enrobés à chaud, principalement en couche de base et de liaison.
- Les bitumes et liants de synthèse pigmentables.
- Les émulsions spéciales appelées "high-float".

La capacité de produire des bitumes de spécialité de bonne qualité dépend : du brut traité, de la nature et des capacités de l'installation de raffinage et du savoir-faire des opérateurs.

IV.1.4. Historique des bitumes modifiés

IV.1.4.1. Les premiers essais

Les recherches d'amélioration des propriétés des bitumes par modification de leur structure ou par ajout d'additif sont anciennes. Ainsi, par exemple, BENCOVITZ et BOE publiaient en 1938 dans la revue de l'ASTM, un article sur l'addition du soufre aux mélanges bitumineux. Mais l'essor véritable de recherches de produits et procédés permettant de modifier les caractéristiques et propriétés des bitumes, date d'une trentaine d'année.

IV.1.4.2. L'essor effectif

Vers la fin des années 50, aux Etats-Unis, on relève la réalisation des bitumes modifiés par des caoutchoucs incorporés sous forme de latex.

Le développement significatif des liants modifiés peut être situé dans les années 70 en Europe et particulièrement en Allemagne. Ensuite en Autriche puis en Italie, apparaissent sur chaussées autoroutières de nouveaux revêtements bitumineux à base de polyéthylène introduit au niveau du malaxeur.

En France, c'est en 1972 que la première application a eu lieu sur un pont à dalles orthotropes avec un bitume modifié aux polymères.

IV.1.4.3. Les nouvelles techniques routières

Dans les années 80, le développement et l'industrialisation de bitumes modifiés par des polymères et de l'emploi d'additifs étaient intimement lié à la mise au point de nouvelles formules d'enrobés bitumineux de couches de surface en faible épaisseur, offrant de meilleures performances (qualité d'usage, durabilité).

Ce sont ainsi les bétons bitumineux minces « BBM » (3 à 4 cm) pour lesquels les bitumes modifiés ont permis l'utilisation sur des supports dégradés et déformables, ce qui n'était pas réalisable durablement avec un bitume pur.

La recherche de solutions d'entretien de surface en couche la plus mince possible sur des chaussées neuves ou déjà renforcées et bon état structurel, et adaptées à des trafics lourds élevés, a conduit aux techniques de béton bitumineux très minces « BBTM » (2 à 3 cm), suivies quelque temps après par les techniques de bétons bitumineux ultra-minces « BBUM » (1 à 2 cm).

L'emploi de bitume modifié s'est généralisé pour les chaussées fortement circulées et autoroutières et les bitumes purs restent souvent employés pour les chaussées à trafic modéré.

Une autre application des liants modifiés est celle des membranes anti-fissures en couches intermédiaires minces et de membranes destinées à retarder la remontée des fissures du support à travers la nouvelle couche de surface et des chapes d'étanchéité.

C'est également vers la fin des années 80 que seront mis au point les liants de synthèse pigmentables permettant la réalisation de revêtements de chaussée de couleurs variées, ce qui apporte de nouvelles solutions pour les aménagements urbains et de sécurité.

IV.2. Objectifs recherchés avec les liants modifiés par rapport à l'emploi des bitumes purs

Le bitume pur – lorsque son grade est bien choisi pour le produit bitumineux concerné (enrobé ou enduit) et dans une application donnée – répond dans une grande majorité de cas à l'objectif qui est de garantir des propriétés d'adhésion et des propriétés mécaniques satisfaisantes dans les conditions de trafic et de climat auxquelles on a affaire.

Cependant, les conditions de trafic, devenues de plus en plus agressives, alliées à des impératifs d'économie ont amené les bitumes purs à certaines limites d'emploi :

- Le bitume pur ne permet plus à l'enrobé de type traditionnel (béton bitumineux 0/10 ou 0/14 à granulométrie continue, semi-grenu ou grenu) d'assurer dans tous les cas une résistance à l'orniérage satisfaisante sous trafic très lourd et canalisé pour des températures durablement élevées.
- Un grade plus dur, s'il apporte à l'enrobé un meilleur comportement à l'orniérage accroît à l'inverse les risques de fissuration thermique à basses températures.
- Certains mélanges enrobés de granularité ouverte n'auront pas la résistance mécanique souhaitée du fait de la cohésivité et de l'adhésivité obtenues avec un bitume pur, ni même une durabilité satisfaisante du fait d'une richesse en liant faible.
- De même, les enduits superficiels sous trafic élevé et lourd ne présentent pas la même durabilité lorsqu'ils ont formulés avec un bitume pur pour les mêmes raisons de qualités mécaniques et d'adhésivité.

Dans ces situations, la solution est de chercher à améliorer des caractéristiques du liant pour accroître les performances de la chaussée.

Dans le cas des enduits superficiels, mais aussi des enrobés ultra-minces ou très minces, dans les formules granulaires sont fortement discontinues, et qui sont appliqués sur des supports en bon état structurel, c'est l'amélioration de la résistance sous les sollicitations de traction et de cisaillement qui est recherchée. L'objectif est aussi d'obtenir, pour ces enrobés une épaisseur relativement importante du film du liant autour des gravillons afin d'assurer la durabilité de ces enrobés discontinus plus exposés aux actions de l'environnement et de trafic que les enrobés traditionnels plus fermés, tout en recherchant la suppression du phénomène de ressuage.

En ce qui concerne les enrobés ouverts (enrobés drainants essentiellement), les objectifs privilégiés visés pour le liant sont l'amélioration de :

- **La cohésivité** : permettant une meilleure tenue à l'arrachement.
- **L'adhésivité aux granulats** : pour diminuer les risques de désenrobage par l'eau.

Grâce à une meilleure tenue à l'égouttage lors de la mise en œuvre, obtenue par l'emploi de liants modifiés ou de fibres, l'augmentation de l'épaisseur du film de liant retarde son vieillissement et contribue à une plus grande durabilité de l'enrobé.

En ce qui concerne les enrobés épais de 5cm et plus, et dans une certaine mesure les enrobés minces d'épaisseur de 3 à 4 cm, la préoccupation principale est la résistance à l'orniérage. Cette contrainte peut être contournée en introduisant d'additifs en gardant des bitumes de pénétration moyenne ou par l'emploi de liants ayant un plus large intervalle de plasticité, qu'il s'agisse de liants modifiés ou de bitumes spéciaux.

Dans le cas des couches d'assise de chaussée, l'objectif peut être l'augmentation de la résistance à la fatigue de l'enrobé sous les chargements répétés du trafic et l'apport d'une certaine flexibilité. Ces qualités sont apportées par les liants modifiés avec des polymères grâce aux propriétés intrinsèques du liant modifié.

Dans le cas de travaux de renforcement de chaussées, un objectif peut être de minimiser l'épaisseur du rechargement, par exemple dans le cas de travaux en agglomération pour éviter les travaux d'excavation et de relèvement de bordures. Dans cette situation, on pourra chercher à accroître la capacité structurelle par l'emploi d'un liant de plus grande rigidité sans pénaliser la résistance en fatigue par un accroissement de la teneur en liant ou l'emploi d'un bitume modifié.

IV.3. Essais pour la caractérisation de ces liants

La plupart des essais et techniques d'études utilisés pour les bitumes purs peuvent être employés pour la caractérisation des liants modifiés et des bitumes spéciaux, ces essais sont :

- Les méthodes d'analyse physico-chimique.

- Les indicateurs traditionnels de caractérisation des liants bitumineux en se limitant aux aspects spécifiques aux liants modifiés et bitumes spéciaux.
- Les méthodes d'essais spécifiques aux liants modifiés.
- Les essais rhéologiques et les essais mécaniques pour caractériser la rupture.

Enfin, certains aspects particuliers aux bitumes modifiés par des polymères sont abordés concernant la pénétration des échantillons pour essais ainsi que l'extraction et la récupération du liant à partir de mélanges bitumineux.

IV.4. Indicateurs traditionnels de caractérisation des liants bitumineux

IV.4.1. Meure de la pénétrabilité

La détermination de la pénétrabilité à 25°C ne pose pas en général de problèmes pour la plupart des mélanges à base de SBS et EVA. Pour ces cas, la pénétrabilité de cet essai est comparable à celle obtenue avec des bitumes purs.

Il existe cependant des liants modifiés pour lesquels cette détermination reste problématique. En particulier, avec des liants modifiés à forte teneur en polymère.

IV.4.2. Détermination du point de ramollissement bille et panneau

Les résultats de cet essai peuvent être perturbés dans les cas d'instabilité du bitume modifié. Si cet essai peut conserver un intérêt pour un contrôle de conformité, avec les bitumes-polymère, la température de ramollissement bille-et-panneau (TBA) n'est plus un critère pertinent pour juger du comportement à température élevée des mélanges bitumineux.

IV.4.3. Indice de pénétrabilité

Comme pour les bitumes purs, l'indice de pénétrabilité calculé à partir de détermination de la mesure de la pénétration à cinq (5) températures (I.P.LCPC) semble bien définir la susceptibilité thermique des liants modifiés autour des températures moyennes de service. Les relations entre logarithme de pénétration et température peuvent ne plus être linéaires pour de forts niveaux de modification.

Le calcul de l'indice de pénétrabilité à partir de la TBA et de la pénétrabilité à 25°C (I.P.Pfeiffer) n'a en revanche pas grand sens car l'hypothèse d'une pénétration de 800 (1/10 mm) associée à la température de ramollissement bille et anneau n'est pas vérifiée pour les bitumes modifiés.

Dans le cas des bitumes avec additifs (fibres, caoutchouc,...) la caractérisation ne peut souvent se faire que sur l'ensemble du mélange bitumineux : (granulats/bitume/additif).

IV.4.4. Les analyses physico-chimiques

L'analyse des bitumes modifiés avec des polymères peut être effectuée avec les mêmes outils analytiques que pour les bitumes purs : méthodes spectrométriques et chromatographiques, analyse calorimétrique différentielle ...

Cependant, l'utilisation de ces méthodes et l'exploitation qui est faite des résultats différents en général par les objectifs visés :

1) Méthodes spectrométriques

- ❖ Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier.
- ❖ Résonance magnétique nucléaire.

2) Méthodes chromatographiques

- ❖ Chromatographie d'exclusion sur gel perméable (GPC).
- ❖ Distillation simulée.
- ❖ Séparation en groupes génériques.

3) Analyse calorimétrique différentielle (DSC)

- ❖ Séparation de la phase polymère gonflé.
- ❖ Point de fragilité Fraass.

IV.5. Les méthodes d'essais spécifiques aux liants modifiés

Deux méthodes d'étude spécifiques aux liants modifiés sont couramment utilisées :

- Les techniques d'observation microscopiques pour connaître l'état de dispersion de la phase polymère dans le bitume ou l'émulsion.
- L'essai de stabilité au stockage.

IV.5.1. Les essais rhéologiques

a. Viscosité

La connaissance de la viscosité des bitumes modifiés et des bitumes spéciaux est importante pour vérifier l'adéquation des conditions d'utilisation (pompage, enrobage et répandage). La viscosité cinématique est habituellement déterminée avec un viscosimètre capillaire ; l'essai peut poser des problèmes dans le cas de bitumes polymères très instables au stockage. Les bitumes modifiés présentent souvent un caractère non-newtonien, la viscosité mesurée diminuant quand la vitesse de cisaillement augmente.

b. Module complexe

Dans le cas des bitumes modifiés par des polymères qui se présentent comme des mélanges de deux phases interpénétrées, le module complexe est au premier ordre relativement indépendant de l'arrangement des phase bitume et polymère gonflé mais dépend des caractéristiques de ces deux phases. La détermination des caractéristiques rhéologiques faites sur le mélange mais aussi sur chacune des phase bitume et polymère gonflé isolées par centrifugation à chaud.

c. Essai de fluage en flexion

Cet essai qui consiste à une éprouvette en forme de barreau une charge constante à une série de températures en fonction du temps de charge peut être pratiquée également sur bitumes purs, bitumes spéciaux ou des bitumes modifiés par des polymères.

Recouvrance et retour élastique

Il existe de nombreuses méthodes d'essai pour évaluer cette propriété. La plus connue pour les matériaux routiers est celle qui utilise le ductilimètre habituel aux bitumes.

Ces essais ne sont adaptés qu'aux bitumes modifiés auxquels la modification vise à donner un caractère élastomérique affirmé. Le résultat de l'essai de recouvrance et sensible à la teneur en élastomère, pour les faibles dosages, cette sensibilité disparaît au-delà de quelque pour-cent.

IV.5.2. Les essais mécaniques pour caractériser la rupture

IV.5.2.1. Les essais à la traction

Il existe une multiplicité d'essais de traction qui diffèrent par la forme des éprouvettes, les dispositifs d'essai, l'histoire du chargement appliqué...

A partir de la courbe charge-allongement ou contrainte-déformation, plusieurs résultats associés à une température et une vitesse de chargement donné, sont dégagés : couple de valeurs de contrainte et d'allongement correspondant au seuil d'écoulement et à la rupture, ainsi que des paramètres cohésion et ténacité.

IV.5.2.2. Essai de traction directe

L'essai de traction directe développé pour les bitumes découle des essais de traction appliquée, sur des éprouvettes en forme d'haltère, aux caoutchoucs et aux matières plastiques.

Les améliorations apportées à la forme des éprouvettes, au système de fixation et à la mesure de l'allongement permettent une détermination précise des caractéristiques du liant pour des petites déformations.

IV.5.2.3. Essai force-ductilité

Différents essais ont été développés pour évaluer l'amélioration de la résistance à l'étirement des liants modifiés par des polymères élastomères. Parmi ceux-ci, l'essai de force-

ductilité présente l'avantage d'employer un appareil d'essai relativement simple et courant, un ductilimètre. Force et allongement sont mesurés lors de l'essai pratiqué avec une vitesse de 50mm/min.

IV.6. Les liants modifiés

Les principaux agents modifiants utilisés sont :

IV.6.1. Les polymères thermodurcissables

Il existe quatre grandes familles industrielles de résines thermodurcissables qui sont : les polymères insaturés, les phénoplastes, les polyuréthanes et les résines époxydiques. Ils sont relativement peu utilisés en association avec le bitume en technique routière. Mais utilisés en enduits superficiels aux propriétés fortement antidérapantes, à partir de résines époxydes et de granulats très durs.

Ils durcissent de façon irréversible à une température qui dépend de leur nature chimique. L'enchaînement de leurs molécules forme un réseau tridimensionnel qui s'oppose à toute mobilité thermique.

IV.6.2. Les polymères thermoplastiques

Les polymères thermoplastiques sont subdivisés en deux familles : les élastomères et les plastomères qui se distinguent, aux températures d'usage, par des comportements différents du point de vue, en particulier, de leur rigidité, de leur déformabilité et de leur résilience.

Ils se fluidifient et deviennent malléables sous l'effet de la chaleur, de façon réversible. Ils sont formés, en première approximation, de chaînes macromoléculaires linéaires, éventuellement ramifiées. La combinaison avec le bitume se fait à température élevée, alors que le mélange se présente sous une forme fluide plus ou moins visqueuse.

IV.6.3. Les polymères thermoplastiques élastomères

La modification des bitumes par des élastomères conduit à des liants appelés bitumes élastomères. Généralement, le bitume élastomère est obtenu par simple mélange physique, mais il peut être également réticulé (ajout d'un réactif chimique après dispersion du polymère dans le bitume, en général l'agent de réticulation est à base de soufre).

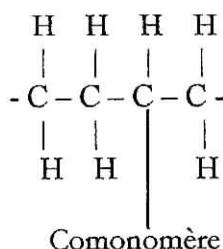
- Copolymère styrène butadiène styrène SBS
- Copolymère styrène isoprène styrène SIS
- Styrène-butadiène/styrène-butadiène SB
- Copolymère statistique styrène/butadiène SBR

IV.6.4. Les polymères thermoplastiques plastomères

La modification des bitumes par des plastomères peut faire appel à différents types d'homopolymères ou de copolymères.

- Copolymère éthylène-acétate de vinyle EVA
- Copolymère éthylène-acrylate de méthyle EMA
- Copolymère éthylène-acrylate de butyle EBA
- Polyisobutylène/Polyisobutylène PIB

Les copolymères d'éthylène sont obtenus par copolymérisation radicale, sous haute pression d'éthylène et de comonomère. Ils répondent à la formule générale donnée ci-après :



Le comonomère est :

- L'acétate de vinyle (OCOCH₃) dans le cas des EVA,
- L'acrylate de méthyle (COOCH₃) dans le cas des EMA ,
- L'acrylate de butyle (COOC₄H₉) dans le cas des EBA.

Une très faible teneur en comonomère conduit, pour le copolymère, à un paramètre de solubilité trop faible pour qu'il présente une bonne compatibilité avec le bitume. Les copolymères d'éthylène les plus efficaces pour la modification des bitumes correspondent au meilleur compromis entre les caractéristiques physiques du polymère et son paramètre de solubilité. L'ensemble de ces caractéristiques dépend de la teneur et de la nature du comonomère en premier lieu et des caractéristiques macromoléculaires en second lieu. C'est pourquoi certains polymères sont plus préconisés pour les applications routières.

Le bitume peut être aussi modifié par adjonction d'un élastomère et d'un plastomère. Ces liants fortement modifiés, de coût élevé, sont utilisés dans divers types d'enrobés de couche de roulement sur des cites fortement sollicités pour lesquels on attend une amélioration importante des résistances à la fissuration et à l'orniérage.

IV.6.5. Le latex

- Polychloroprène.
- Caoutchouc SBR
- Caoutchouc naturel

Les latex naturels utilisés proviennent de latex produits par certains arbres, en particulier l'*Hevea brasiliensis*.

Les caoutchoucs de polychloroprène, en général connus sous le nom de néoprène. Il y a de nombreuses variantes de ce type de caoutchouc non vulcanisés, avec diverses applications industrielles.

Les caoutchoucs synthétiques SBR sont des polymères formés à partir de styrène et de butadiène. Quand la polymérisation est obtenue par le biais d'une émulsion, le résultat est un latex avec une distribution aléatoire des motifs monomères.

Les objectifs essentiels d'utilisation du latex sont l'adhérence et l'imperméabilité en couche de roulement ultramince sur un support peu déformé, faible déflexion.

IV.6.6. La poudrette de caoutchouc

Deux types de caoutchouc sont utilisés dans l'industrie des pneumatiques :

- des caoutchoucs synthétiques pour les véhicules légers
- des caoutchoucs à forte proportion de caoutchouc naturel pour les véhicules lourds.

Il faut noter que le caoutchouc utilisé pour la fabrication des pneumatiques a été « vulcanisé », ce qui entraîne une modification chimique de sa structure et lui confère des caractéristiques différentes de solubilité et de gonflement de celle du caoutchouc non vulcanisé.

Le caoutchouc provient en général de pneumatiques usagés réduit à l'état de poudrette de taille au plus millimétrique.

La modification se fait par introduction de la poudrette dans le bitume à chaud, le caoutchouc réagit et gonfle par absorption de fractions aromatiques du bitume. Le mélange doit être utilisé immédiatement en raison de son instabilité au stockage. Pour assurer la stabilité du liant bitume-caoutchouc, il faut procéder à une déhydrogénation à haute température (250°C) suivie de l'addition de sélénium à une température plus basse. Pour son utilisation, le liant modifié est réchauffé à une température de 180°C.

IV.6.7. Les cendres volantes

La Colombie possède un réseau dense de centrales thermiques qui produisent des cendres volantes (sous-produits de la combustion du charbon). Une étude a été réalisée sur l'utilité de ces cendres en technique routière notamment dans les assises de chaussées.

Chapitre V

Les granulats

Chapitre V : Les granulats

V.1. Introduction

Les granulats utilisés dans les enrobés en couche de roulement jouent un rôle de première importance dans le phénomène d'adhérence pneus - chaussée. Sous l'effet de la circulation, les granulats en surface tendent à se polir plus ou moins rapidement selon leur nature et leur composition minéralogique.

A court ou à moyen terme, selon la densité du trafic, la chaussée peut devenir glissante.

Cet aspect fait l'objet de recherches en laboratoire et sur la route dans le but de déterminer les textures de surface et les compositions minéralogiques des matériaux granulaires afin d'obtenir des mélanges bitumineux rugueux qui répondent aux conditions exigées.

Ainsi les caractéristiques de surface et de forme des granulats influençant le lien bitume-granat, la maniabilité et la performance des enrobés bitumineux; Certains phénomènes d'orniérage ou de désenrobage peuvent s'expliquer par l'interaction entre le bitume et les granulats ou d'après la forme des granulats.

Les granulats utilisés dans la confection des enrobés bitumineux doivent donc répondre aux critères de qualité et aux caractéristiques propres à chaque usage.

V.2. Qualités exigées des granulats

Les granulats doivent :

- ne pas se fragmenter sous l'effet de la répétition des charges;
- ne pas évoluer par attrition au contact des grains;
- épanouir les charges en ayant, en place un module d'élasticité élevé;
- avoir une stabilité propre qui évite le fluage sous l'effet des charges répétées;
- être insensibles à l'eau.

Ces qualités sont issues de :

- la nature de la roche dont est issue la grave ;
- l'échelonnement granulométrique;
- le coefficient de frottement des grains entre-eux;
- la présence d'argile.

Il est certain qu'un granulat issu d'une roche ne fragmentera pas et ne produira pas de fines et qu'un béton sec compact sera rigide, épanouira les charges et n'offrira que peu d'occasions aux grains de bouger les uns par rapport aux autres.

Un matériau plein anguleux à fort frottement n'aura pas tendance à fluer au passage des roues, ce qui serait le cas pour les granulats ronds et lisses et ayant peu de contact les uns avec les autres. De plus un matériau ayant de l'argile dispersée autour des grains risque une fois humide de perdre toute stabilité.

V.3. Origine des graves

Les graves fréquemment utilisées sont d'origines très variables. Schématiquement, on peut les classer en :

V.3.1. Graves brutes naturelles

Ce sont des matériaux alluvionnaires roulés utilisés tels quels.

V.3.2. Graves naturelles concassées

Il s'agit en général de graves naturelles comportant à la fois des éléments fins et moyens non concassés et des éléments concassés provenant du concassage des galets les plus gros.

V.3.3. Graves entièrement concassées

Il s'agit soit de la fraction grosse d'une grave naturelle qu'on concasse soit d'un matériau entièrement concassé provenant d'une carrière.

V.4. Les caractéristiques des granulats

Il existe deux types de caractéristiques.

V.4.1. Les caractéristiques intrinsèques des granulats

Elles sont liées à la qualité de la roche exploitée, on distingue :

- Masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau (NF P18-554 pour les gravillons et NF P18-555 pour les sables).
- Los Angeles (NF P18-573).
- Micro-Deval (NF P18-572).
- Friabilité des sables (NF P18-576).
- Tenue à l'eau du couple bitume-granat (Essai d'immersion statique).

V.4.2. Les caractéristiques de fabrication des granulats

Elles dépendent des conditions de fabrication, on distingue :

- Granularité (NF P18-560).

- Aplatissement (NF P18-561).
- Angularité (NF P18-563) pour les gravillons et (NF P18-564) pour les sables.
- Propreté superficielle des gravillons (NF P18-591).
- Propreté des sables (NF P18-597) pour la mesure de l'équivalent de sable à 10 % de fines et l'essai au bleu de méthylène.
- Vides Rigden des fines (NF P18-565), pour la détermination de la porosité d'une couche de filler à l'état compacté.
- Indice de concassage.
- Rapport de concassage.

Il est important de souligner que l'ensemble des essais qui fournissent ces caractéristiques, intervenant dans l'étude de formulation des enrobés, doivent être réalisés sur le même échantillon global.

V.4.3. Classification (NF P18 – 101)

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

Avec :

D : dimension du plus gros grain

d : dimension du plus petit grain

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

V.4.4. Spécifications des granulats

Au cours de la durée de vie de la chaussée, les couches bitumineuses sont soumises à diverses sollicitations tels que la répétition des charges des roues exercées par les véhicules et les effets climatiques (température, précipitation de pluie, etc.).

Les spécifications qui concernent les enrobés bitumineux sont :

V.4.4.1. Spécifications relatives aux caractéristiques intrinsèques des granulats

On distingue deux spécifications :

- Spécifications liées aux caractéristiques mécaniques des gravillons et de la fraction gravillon des graves.

- Spécifications liées à la friabilité des sables.

V.4.4.2. Spécifications relatives aux caractéristiques de fabrication des granulats

On distingue quatre spécifications :

- Spécifications liées aux caractéristiques de fabrication des gravillons.
- Spécifications liées aux caractéristiques de fabrication des sables et des graves.
- Spécifications liées aux caractéristiques des fines.
- Spécifications liées à la forme et la propreté des gravillons.

V.4.4.3. Spécifications relatives à la nocivité des fines argileuses et l'adhésivité bitume-granat vis-à-vis de l'eau

Nous distinguons deux caractéristiques :

- La nocivité des fines argileuses contenues dans le sable 0/D.
- L'adhésivité bitume-granat.

V.4.5. Essais sur les granulats

V.4.5.1. Les graviers

- Analyse granulométrique (NF P18-560)
- Coefficient d'aplatissement (NF P18-561)
- Essai de propreté superficielle (NF P18-561)
- Poids spécifique au pycnomètre
- L'essai Los Angeles (NF P18-573)
- L'essai micro Deval (NF P18-572)
- La résistance au polissage

V.4.5.2. Les sables

- Granulométrie (NFP 18-560)
- Friabilité (NFP 18-576)
- L'essai au bleu de méthylène (NF P18-592)
- Equivalent de sable (NFP 18-598)

Le tableau V.1 dans la page suivante nous donne les caractéristiques exigées pour les granulats routiers :

Tableau V.1 : Caractéristiques exigées pour les granulats routiers.

Trafic PL/j (V/j dans les 2 sens) à titre indicatif	Caractéristiques	Couche de liaison	Couche de roulement
		Bétons bitumineux	
T₄ <25 (< 500 V/j)	A.....	≤ 30	≤ 30
	IC.....		≥ 60 %
	LA.....	≤ 30	≤ 25
	MDE.....	≤ 25	≤ 20
	CPA.....		≥ 0.45 (1)
	P.....	≤ 2 %	≤ 2 %
	ES.....	≥ 50	≥ 50
T₃ 25 à 150 (500 à 3000 V/j)	A.....	≤ 30	≤ 25
	IC.....	IC = 100 %	≥ 2
	LA.....	≤ 25	≤ 20
	MDE.....	≤ 20	≤ 15
	CPA.....		≥ 0.50
	P.....	≤ 2 %	≤ 2 %
	ES.....	≥ 50	≥ 50
T₂ 150 à 300 (3000 à 6000 V/j)	A.....	≤ 25	≤ 20
	IC.....	≥ 2	≥ 2
	LA.....	≤ 25	≤ 20
	MDE.....	≤ 20	≤ 15
	CPA.....		≥ 0.50
	P.....	≤ 2 %	≤ 2 %
	ES.....	≥ 50	≥ 50
T₁ 300 à 750 (6000 à 15000 V/j)	A.....	≤ 20	≤ 20
	IC.....	≥ 2	≥ 4
	LA.....	≤ 25	≤ 20
	MDE.....	≤ 20	≤ 15
	CPA.....		≥ 0.50
	P.....	≤ 2 %	≤ 2 %
	ES.....	≥ 50	≥ 50
T₀ > 750 (< 15000 V/j)	A.....	≤ 20	≤ 20
	IC.....	≥ 4	≥ 4
	LA.....	≤ 25	≤ 15
	MDE.....	≤ 20	≤ 15
	CPA.....		≥ 0.50
	P.....	≤ 2 %	≤ 2 %
	ES.....	≥ 50	≥ 50

(1) On pourra admettre 0.40 comme minimum absolu lorsque la vitesse est limitée à 60 km/h

Abréviations :

PL/j	: Poids lourds par jour
V/j	: Véhicules légers par jour
A	: Aplatissement
IC	: Indice de concassage
RC	: Rapport de concassage
LA	: Los Angeles
MDE	: Micro Deval en présence d'eau
CPA	: Coefficient de polissage accéléré
P	: Propreté superficielle des gravillons
ES	: Equivalent de sable

Chapitre VI

Identification des matériaux

Chapitre VI : Identification des matériaux

VI.1. Introduction

Le mélange dans le béton nécessite du sable, et des agrégats de différents calibres, les mêmes employés dans la fabrication de béton ou d'enrobés bitumineux de bonne qualité, dans cette partie nous allons identifier ces différents matériaux.

Il y'a des différents types de béton bitumineux, cependant il est possible de formuler un concept d'un agrégat idéal pour la plupart des utilisations. Cet agrégat idéal aura une granulométrie voulue, sera dur, résistant et sera constitué des particules granulaires ayant une porosité modérément faible, et les surfaces seront propres.

Nous avons dans notre étude trois fractions proviennent de la carrière de CAP-DJINET, un sable concassé 0/3, et deux graviers concassés 3/8 et 8/15 dont la nature est le basalte. Et les liants utilisés sont :

- L'émulsion à 65% de bitume résiduel de classe 40/50 dans l'étude à froid.
- Le bitume pur 40/50 dans l'étude à chaud.

Pour l'ajout d'apport de filler on utilise le filler calcaire, le ciment, la chaux et la poudrette de caoutchouc.

VI.2. Identification des matériaux

Pour notre formulation, nous avons utilisé des gravillons et un sable provenant de la carrière de CAP DJINET.

VI.2.1. Le sable

VI.2.1.1. Définition d'un sable

En général, on appelle sable, un matériau dont au moins 50 % de ses éléments sont supérieurs à 80 microns et dont la taille maximale n'excède pas 5 mm.

VI.2.1.2. Classification d'un sable

On peut classer les sables selon trois paramètres dont :

a) **La granularité** : permet de séparer les sable en trois catégories sont :

- Sables fins.
- Sables moyens.
- Sables grossiers.

b) La propreté et la teneur en fines

Elle est appréciée par la valeur de l'équivalent de sable et la valeur au bleu de méthylène.

c) La nature minéralogique

En général, les sables peuvent être classés comme suit :

- ❖ Sables siliceux.
- ❖ Sables silico-calcaires.
- ❖ Sable calcaires.

VI.2.1.3. Sable utilisé

Dans notre étude, on a utilisé le sable basaltique concassé 0/3 provenant de CAP-DJINET.

VI.2.1.4. Granulométrie (NFP 18-560)

C'est la caractéristique physique essentielle pour l'identification des matériaux, puisqu'elle nous permet de déterminer la répartition des grains suivant leurs grosseurs.

a) Classe de sable

Les granulats sont classés en fonction de leur grosseur et sont désignés par « granulats d/D » où d et D sont respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions.

Pour notre sable d est inférieure à 0,5 mm, alors, il s'agit de « granulat 0/D ».

b) Module de finesse

Le module de finesse nous permettra d'avoir un sable qui permet d'obtenir une bonne ouvrabilité et une bonne résistance avec des risques limités de ségrégation pour la réalisation des bétons bitumineux.

Le module de finesse M_f d'un sable est égal au centième de la somme des refus exprimés en pourcentage des tamis 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,50 et 5 mm. Il apparaît nettement que le module de finesse sera d'autant plus petit que le granulat sera plus riche en éléments fins.

Résultat obtenu

Le module de finesse est de 2.64 pour le sable 0/3 de CAP-DJINET. Un bon sable doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8.

VI.2.1.5. Propreté du sable 0/3

On a deux essais importants pour connaître la propreté du sable :

a) Equivalent de sable (NFP 18-598)

Le but de cet essai est de mettre en évidence l'activité des traces d'argile, le limon ou de matières colloïdales qu'existent dans le sable.

b) Bleu de méthylène (NF P18-592)

Cet essai a le même but que l'essai précédent, mais son avantage est d'être à la fois quantitatif et qualitatif.

- **Quantitatif**: plus la teneur en fines sera importante, plus la valeur de Bleu de méthylène sera forte.
- **Qualitatif**: plus les fines seront « actives » plus la valeur de bleu de méthylène sera également forte.

Résultats

Les valeurs des deux essais sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau VI.1 : Les valeurs de ES et de Bleu du sable utilisé.

Essais	Equivalent de sable (%) (ES)	Bleu de méthylène (VB)	Spécification Trafic ≥ 300 PL/j (ES)	Spécification Trafic ≥ 300 PL/j (VB)
Sable 0/3	43,90	0,375	≥ 50	< 1

D'après les résultats obtenus on remarque :

La valeur du bleu de méthylène est inférieure à 1 et la valeur de l'ES est inférieure à 50 donc il n'y a pas beaucoup d'éléments argileux dans notre sable.

VI.2.1.6. Friabilité (NFP 18-576)

L'essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique des sables produits dans un cylindre en rotations bien définies, par fragmentation à l'aide d'une charge en présence d'eau.

- Les éléments fins du sable, inférieurs à 0,1 mm, ne soient pas étudiés.
- Le sable est écrêté à 2 mm.

L'évolution granulométrique sera caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0,05 mm produits au cours de l'essai.

Si M est la masse de produits au cours de l'essai, par définition le coefficient de friabilité du sable sera :

$$F.S = 100 \times \frac{m}{M}$$

On a trouvé que FS = 23.16, et selon la norme (NF P18-576) notre sable est de bonne qualité.

Le tableau suivant indique les spécifications liées à la friabilité des sables selon les normes :

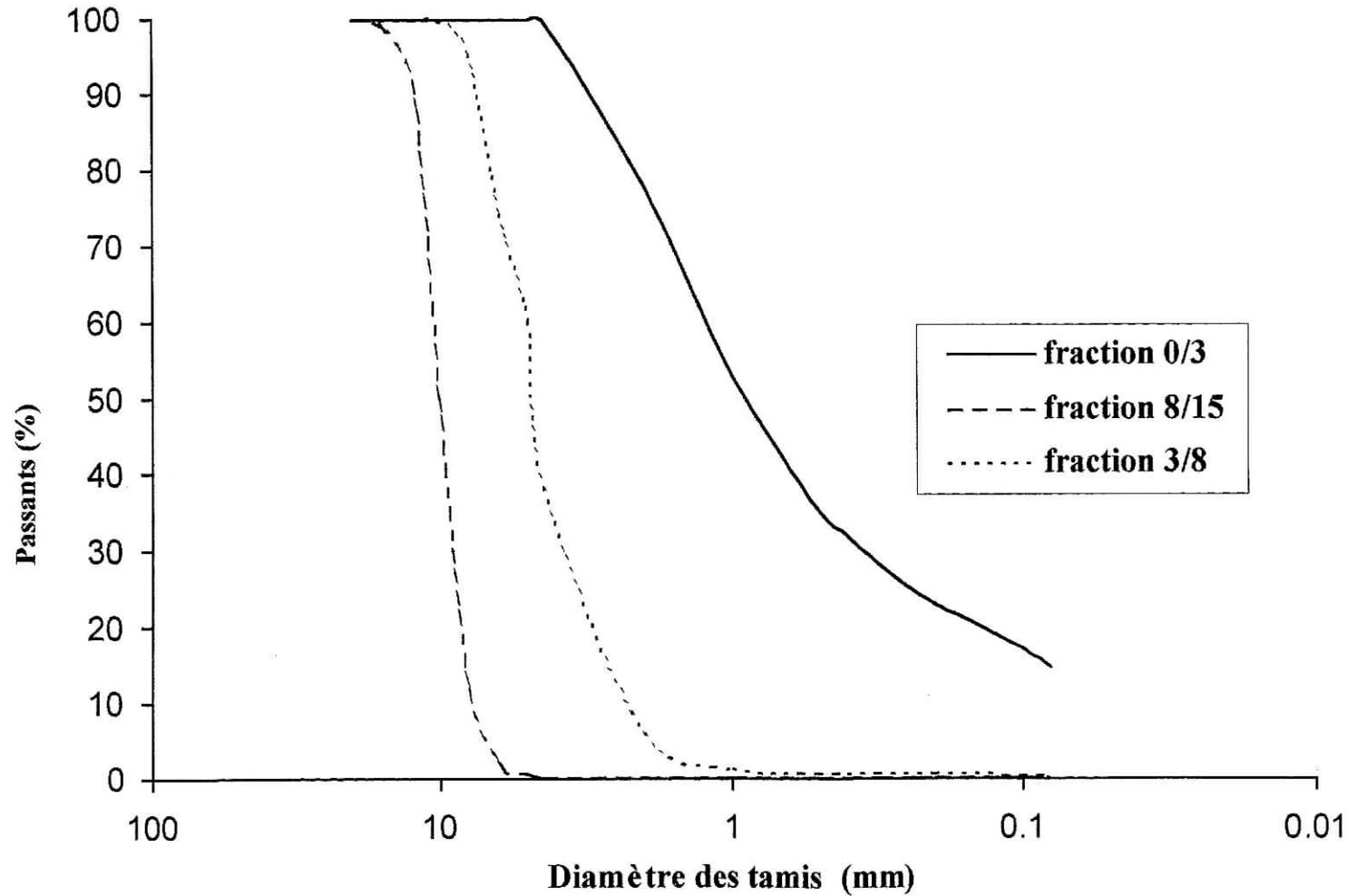


Figure VI.1 : Courbes granulométriques des fractions 0/3, 3/8 et 8/15.

VI.2.2.2. Coefficient d'aplatissement (NF P18-561)

La détermination du coefficient d'aplatissement nous permet de caractériser la forme des graviers 3/8 et 8/15 pour savoir s'ils ont une forme plate ou plus ou moins arrondis.

Ce coefficient s'obtient en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulats :

- Une série de tamis normalisés à mailles carrés.
- Une série de tamis à fentes de largeur normalisée.

Résultats de l'essai

Les valeurs trouvées sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau VI.4 : Coefficient d'aplatissement des graviers.

Type de gravier	3/8 CAP-DJINET	8/15 CAP-DJINET	Spécification Trafic ≥ 300 PL/j (A)
Coefficient d'aplatissement (A)	25.18	16.3	≤ 20

A partir des résultats obtenus qui sont acceptables, on peut constater que les granulats ont une bonne forme géométrique.

VI.2.2.3. Propreté superficielle des gravillons (NF P18-591)

Tous les granulats contiennent plus ou moins d'impuretés. Le pourcentage des impuretés d'après la norme NFP 18-301 ne doit pas dépasser 5%, et selon Dreux elle ne doit pas dépasser 1.5% pour avoir des granulats propres pour la fabrication de béton ou d'enrobés de qualité.

- Certaines impuretés perturbent les résultats au-delà des limites admissibles, même si elles ne sont qu'à l'état de traces.
- D'autres ont un effet moins puissant : elles peuvent être tolérées dans des limites qui seront à définir.

Résultats de l'essai

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau VI.5 : Propreté des graviers.

Type de gravier	3/8 CAP-DJINET	8/15 CAP-DJINET	Spécification Trafic ≥ 300 PL/j (P)
Propreté (P) en %	2.8	1.4	≤ 2

On a les spécifications de la propreté des gravillons suivant la norme **NF P18-591** indiquées dans le tableau suivant :

Tableau VI.6 : Propreté des gravillons.

Type d'enrobé	Caractéristiques	Trafic (PL.MJA) ≥ 300
BB 0/14 ET GB 0/20	Propreté pour des gravillons où $D \leq 25$ mm	≤ 2

On remarque que le gravier 3/8 est pollué par rapport au gravier 8/15 qui est selon la norme propre.

VI.2.2.4. Poids spécifique au pycnomètre

Cet essai permet de déterminer avec précision les poids spécifiques des différents matériaux. Ces valeurs sont très importantes pour la formulation de notre béton bitumineux.

Résultats de l'essai

Ils sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau VI.7 : Les poids spécifiques des granulats.

Fractions	0/3	3/8	8/15
Poids spécifique (γ_s)	2.65	2.64	2.72

VI.2.2.5. Essai d'abrasion (LOS ANGELES) (NF P18-573)

Cet essai est utilisé pour mesurer la résistance des agrégats à l'usure ou à l'abrasion. Le pourcentage d'usure mesuré n'aura pas nécessairement de relation avec le poli des agrégats causé par l'usure due à la circulation par exemple.

On place l'agrégat dans le tambour avec des billes d'acier ayant une masse spécifiée qui agiront comme charge abrasive. On fait faire 500 révolutions au tambour, puis le matériau est enlevé et passé au tamis de 1.6 mm. Le pourcentage passant dans ce tamis nous donne le pourcentage d'usure.

Résultats d'essai pour les graviers 3/8 et 8/15

Ils sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau VI.8 : L'essai d'abrasion (LOS ANGELES).

Fractions	3/8	8/15	Spécification Trafic ≥ 300 PL/j (P)
Coefficient Los Angeles (%)	22.16	13.76	≤ 20

VI.2.2.6. Essai d'usure MICRO-DEVAL HUMIDE (NF P18-572)

Cet essai est réalisé pour les graviers 3/8 et 8/15, il nous permet d'estimer la résistance de ces fractions à la fragmentation par choc et à l'usure au contact de l'eau. L'essai consiste à mesurer l'usure des granulats produite par frottements réciproques dans un cylindre en rotation dans des conditions bien définies.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les classes granulaires :

4 – 6.3 mm, 6.3 – 10 mm, 10 – 14 mm et 25 – 50 mm. Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, et m la masse des éléments inférieurs à 1.6mm produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par la quantité :

$$MDE = 100 \times \frac{m}{M}$$

Par définition, cette quantité sans dimension est appelée suivant la méthode employée :

- Coefficient Micro-Deval du granulat MDS
- Coefficient Micro-Deval humide du granulat MDE.

Résultats d'essai

Ils sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau VI.9 : L'essai d'usure MICRO-DEVAL HUMIDE.

Fractions	3/8	8/15
Micro-Deval Humide (MDE, en %)	50.2	35
Corrélation Deval = 80/MD (en %)	1.56	2.28

Tableau VI.10 : Les caractéristiques mécaniques des gravillons.

Type d'enrobé	Caractéristiques	Trafic (PL.MJA)	
		< 300	≥
BB 0/14 ET GB 0/20	LA	≤ 20	≤ 20
	MDE	≤ 15	≤ 15

Selon les normes **NF P18-572** et **NF P18-573**, on peut dire que les graviers 3/8 et 8/15 résistent bien aux charges abrasives, mais ils ont une faible résistance à l'usure en présence de l'eau.

VI.2.3. Fines d'apport pour enrobés

L'addition de fines d'apport dans la fabrication d'enrobés bitumineux peut s'avérer nécessaire lorsque la teneur en fines des granulats est insuffisante. Les fines d'apport sont le plus souvent constituées de calcaire broyé mais peuvent également être de la chaux grasse, des cendres volantes ou même du ciment.

Il n'existe pas de spécifications relatives aux dopes d'adhésivité destinés à améliorer la tenue à l'eau des enrobés ou l'adhésivité liants- granulats. Leur efficacité étant vérifiée à travers l'amélioration:

- de la tenue à l'eau pour les enrobés (rapport immersion-compression).
- de l'affinité liants-granulats.

a) Filler calcaire

Obtenu par concassage de gravier (plusieurs étapes de concassage), et tamisage manuel des restes de concassage (tamis de 200 µm de maille).

b) Ciments normalisés

Les ciments normalisés font l'objet de la norme (NF P15-301). Le ciment anhydre est un mélange intime d'un ou plusieurs constituants et, éventuellement, en petite quantité, de produits appelés additions.

Les ciments normalisés comportent obligatoirement du Clinker Portland, produit constitué essentiellement de silicates et aluminates de calcium anhydres obtenus par cuisson d'un mélange dosé de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer. Ils peuvent comporter du laitier, de la pouzzolane naturelle ou artificielle, des cendres volantes de houille ou de lignite et autres constituants.

Les additions peuvent être du Sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) destiné à régulariser la prise, des sels solubles en vue d'améliorer certaines caractéristiques du ciment, et des agents de mouture pour faciliter le broyage du Clinker.

Tableau VI.11 : Les composantes du Ciment Portland.

Catégorie du ciment	Clinker	Autres constituants
Ciment Portland composé CPJ	≥ 65%	≤ 35%

Ciment utilisé

Un seul ciment a été employé dans l'ensemble des essais de formulation du béton bitumineux, il s'agit du CPJ 45, utilisé dans la presque la totalité des chantiers en Algérie.

Ce ciment provient de cimenterie de Meftah (Blida), enveloppé dans des sacs de 50 kg, de récente fabrication au moment des essais, sa masse volumique est de 3100 Kg/m³.

Le but d'utilisation de ce matériau est l'absorption de l'eau emprisonnée dans les éprouvettes et l'amélioration des résistances à la compression à sec (R) et à l'immersion (R'). On utilisera ce ciment CPJ45, dont la composition chimique est la suivante :

Tableau VI.12 : Composition chimique du ciment CPJ45.

CIMENT PORTLAND CPJ45	
Eléments	Pourcentage (%)
SiO ₂	20.0
Al ₂ O ₃	5.5
Fe ₂ O ₃	3.0
CaO	60.0
Mg O	1.0
SO ₃	2.0
P.A.F	3.5
Insolubles	0.6 à 0.8

c) La chaux

Dans tous les cas, la chaux utilisée pour la route est une chaux grasse (obtenue par calcination à plus de 900°C d'un calcaire très pur), aérienne (c'est-à-dire qui fait prise en se recarbonatant au contact de l'air). Elle peut être utilisée vive (oxyde de calcium CaO) ou éteinte (hydroxyde Ca (OH)₂).

L'utilisation de la chaux vive nécessite cependant des précautions particulières pour éviter toute perte dans l'atmosphère en raison du danger de ce produit lorsqu'il est inhalé.

De plus, la chaux vive doit, au test de réactivité à l'eau atteindre une température supérieure à 60°C en moins de vingt-cinq minutes.

d) La poudrette de Caoutchouc

La poudrette de caoutchouc qu'on a utilisé est un déchet, cette poudrette à l'origine, est destinée à la fabrication des tapis de voitures, la pureté de ce déchet est de 45%.

VI.2.3.1. Analyse granulométrique de la Poudrette de caoutchouc et du Filler calcaire

Les résultats de l'analyse granulométrique de la Poudrette de caoutchouc et du Filler calcaire sont représentés dans le tableau VI.13 et la figure VI.2 ci-après :

Tableau VI.13 : Analyse granulométrique du filler calcaire et de la Poudrette de Caoutchouc.

TAMIS	PASSANT EN % DES FRACTIONS	
	POUDRETTE DE CAOUTCHOUC	CALCAIRE
16	100	100
12.5	100	100
10	100	100
8	100	100
6.3	100	100
5	100	100
4	100	100
2	100	100
1	99.33	100
0.500	88.83	100
0.400	84.33	100
0.315	77.53	100
0.200	57.73	100
0.100	32.97	100
0.080	19.8	73.58

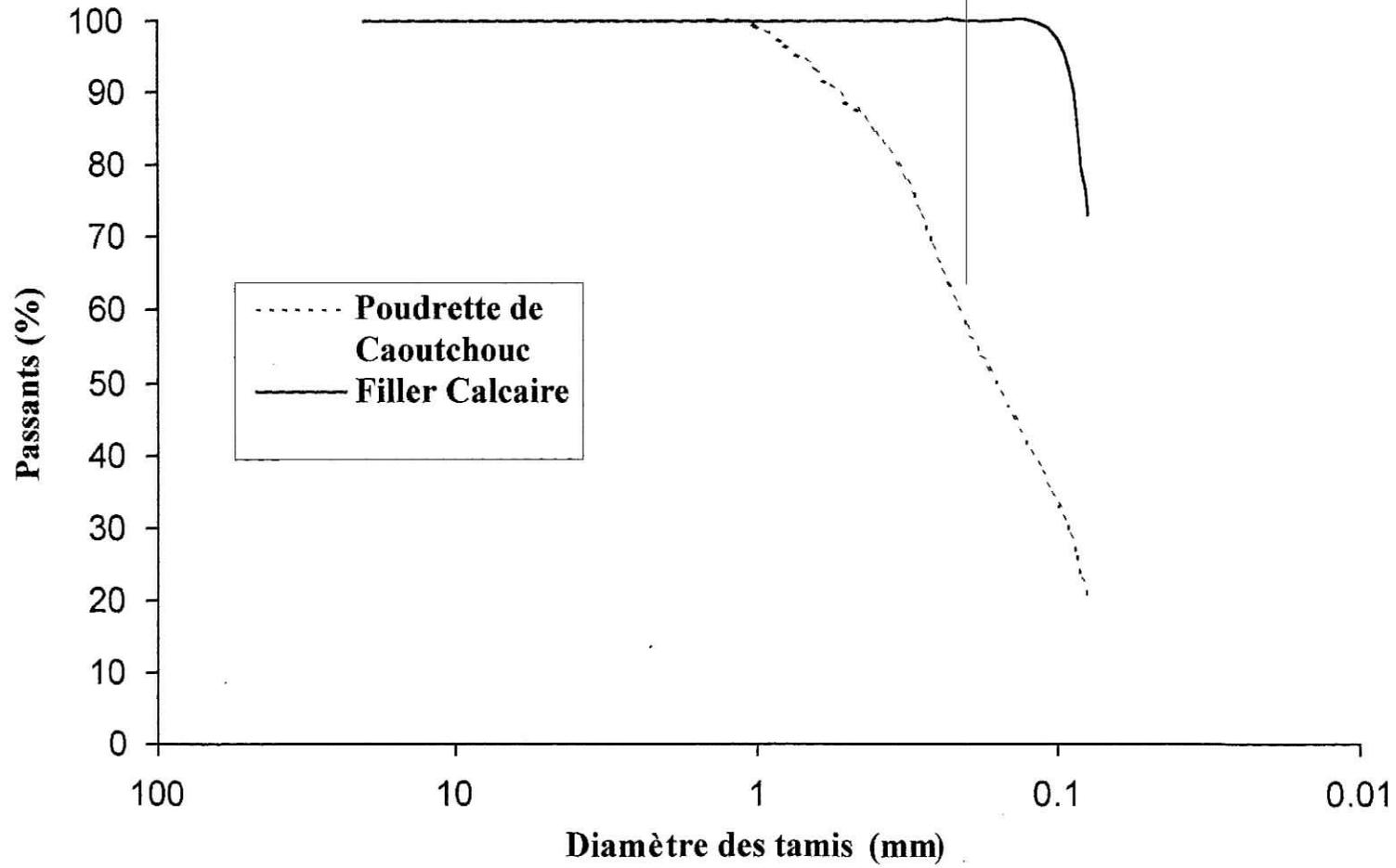


Figure VI.2 : Courbes granulométriques de la poudrette de caoutchouc et du filler calcaire.

VI.2.3.2. Le poids spécifique des ajouts

Les poids spécifiques de la poudrette de caoutchouc, la chaux, filler calcaire et le ciment sont représentés dans le tableau ci-après:

Tableau VI.14 : Poids spécifiques des ajouts.

	Poudrette de caoutchouc	Filler de calcaire	La chaux	Le ciment
Poids spécifique γ_s	0.67	2.62	2.35	3.1

VI.2.4. Analyse chimique

a) but

Cette analyse a été faite dans le but de déterminer les teneurs de matières organiques, les sulfates, les sulfures et chlorures, contenus dans les matériaux. Ces éléments peuvent perturber les résultats, au-delà des limites admissibles.

b) Compositions chimiques des différentes fractions

Tableau VI.15 : Compositions chimiques des différentes fractions.

Résultats \ Fractions	Sable 0/3	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Sable calcaire
Insolubles (Silice-Silicates) (INS)	67.82	72.92	72.41	8.98
Oxyde de Fer et d'Alumine (Al_2O_3 , Fe_2O_3)	17.25	18.3	18.98	2
Les Sulfates ($CuSO_4 \cdot 2H_2O$)	Traces	Traces	Traces	Traces
Les chlorures (NaCl)	0.77	0.12	0.17	0.29
Les carbonates ($CaCO_3$)	10.26	5.13	5.12	88.03
Anhydride carbonique (CO_2)	4.51	2.26	2.25	38.73
La perte au Fer	7.53	4.29	4.39	38.98
L'eau de constitution Ho_2	3.02	2.03	2.14	6.25
Bilan chimique pondéral	98.52	98.5	98.82	99.55

D'après les résultats, on peut dire que les fractions 0/3, 3/8, 8/15 sont issus d'une roche basaltique.

VI.2.5. Etude des liants

VI.2.5.1. Bitume utilisé

Le bitume utilisé est de classe 40/50 dont les caractéristiques mécaniques sont données dans le tableau suivant :

Tableau VI.16 : Caractéristiques physico-mécaniques du bitume.

Pénétration (Norme NFT : 66.004) en 1/100mm	42
Point de ramollissement (billes et anneaux NFT : 66.008)	50.05
Point d'éclair (Vase ouvert Norme NFT : 66.118) en °C	325
Point de flamme (Vase ouvert Norme NFT : 66.118) en °C	335

Selon le tableau ci-dessous on peut confirmer la classe du bitume qui est de 40/50.

Tableau VI.17 : Caractéristiques des différentes classes des bitumes routiers purs.

Caractéristiques	Normes	Classe de bitume			
		20/30	40/50	60/70	80/100
Pénétrabilité à 25°C [1/10mm]	NF T66-004	20 à 30	40 à 50	60 à 70	80 à 100
Point de ramollissement [°C]	NF T66-008	52 à 65	47 à 60	43 à 56	41 à 51
Ductilité à 25°C [cm]	NF T66-006	≥ 25	≥ 60	≥ 80	≥ 100
Différence de TBA après RTFOT [Δ TBA °C]	NF T66-032	≤ 8	≤ 9	≤ 9	≤ 9
Perte de masse au chauffage [%]	NF T66-011	< 1	< 1	< 1	< 2
Point d'éclair [°C]	NF T60-118	≥ 250	> 250	> 230	> 230
Densité à 25°C	NF T66-007	1.00 à 1.10	1.00 à 1.10	1.00 à 1.10	1.00 à 1.07

VI.2.5.2. L'émulsion 65 %

Les essais effectués sur l'émulsion sont :

- détermination de la teneur en eau de l'émulsion ;
- pseudo-viscosité ENGLER ;
- pseudo-viscosité STV.

VI.2.5.2.1. Détermination de la teneur en eau de l'émulsion**VI.2.5.2.1.1. But de l'essai**

Le but de l'essai est de détermination de la teneur en eau de l'émulsion de bitume par entraînement émulsion l'aide d'un solvant (toluène).

VI.2.5.2.1.2. Principe

L'eau contenue dans la prise d'essai est entraînée par distillation à reflux d'un solvant non miscible à l'eau. Après condensation l'eau sépare du solvant et s'accumule dans un tube de recette gradué, de forme convenable. Le liquide d'entraînement retourne dans le récipient de distillation.

VI.2.5.2.2. Pseudo-viscosité (ENGLER, S.T.V)**VI.2.5.2.2.1. But de l'essai**

L'essai a pour but de déterminer la pseudo-viscosité des émulsions de bitume.

VI.2.5.2.2.2. Définition

La viscosité des émulsions de bitume se mesure dans la pratique courante à l'aide de viscosimètres à écoulement. Elle n'a qu'une valeur relative car ces produits ne se comportant pas des liquides newtoniens. On doit donc utiliser le terme de pseudo-viscosité.

VI.2.5.2.2.3. Principe

Selon la limite de viscosité utilisée pour déterminer la pseudo-viscosité, on utilise le viscosimètre Engler si elle est inférieure à 15°, sinon on utilise le viscosimètre S.T.V.

On utilise dans notre étude une émulsion de 65 % à base de bitume 40/50.

Résultats

Les résultats d'identification du liant (émulsion de bitume) sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau VI.18 : Les résultats des essais sur l'émulsion.

Caractéristiques d'identification	Références normatives	Valeurs
Teneur en eau (%)	NF T 66-023	33.66
Pseudo-viscosité ENGLER	NF T 66-020	69.53
Pseudo-viscosité S.T.V	NF T 66-005	33 s

D'après les résultats obtenus, nous avons identifié ce liant, c'est une émulsion qui contient environ 65% du bitume résiduel et 35% d'eau, elle a une pseudo-viscosité ENGLER de 69.53, et une pseudo-viscosité S.T.V de 33s, ce qui confirme la classe d'une émulsion à 65% de bitume résiduel.



Figure VI.3 : La Chaux.

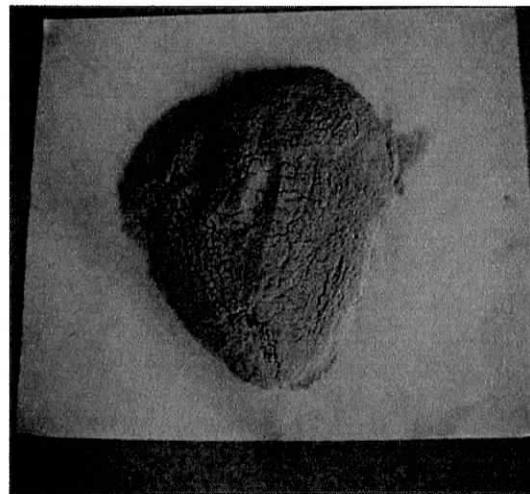


Figure VI.4 : Filler calcaire.

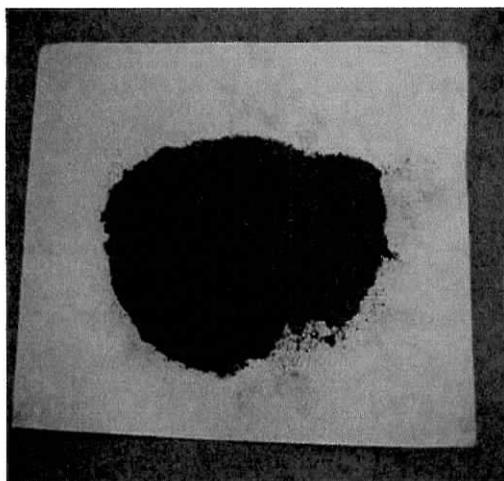


Figure VI.5 : CPJ45.



Figure VI.6 : Pycnomètre (émulsion).



Figure VI.7 : Bain thermostatique.



Figure VI.8 : Viscosimètre Engler.

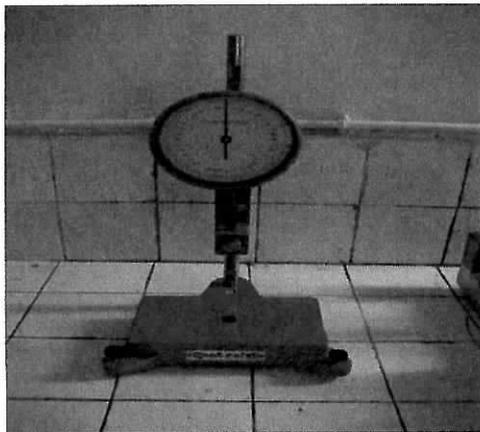


Figure VI.9 : Pénétrömètre à aiguille.

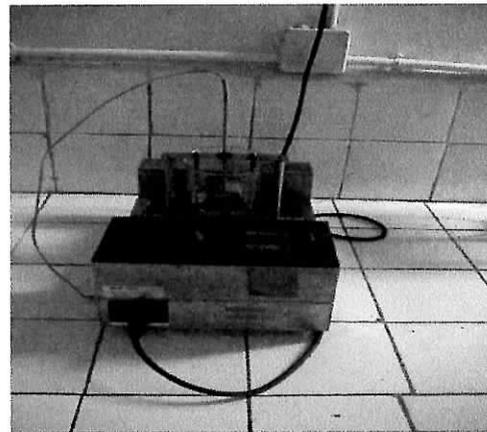


Figure VI.10 :Appareil Bille-Anneau.



Figure VI.11 : Cleveland.

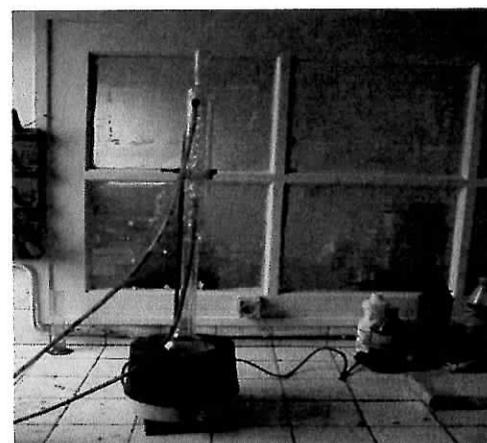


Figure VI.12 : Appareil de distillation.

Chapitre VII

Formulation du béton bitumineux

Chapitre VII.1. Formulation du béton bitumineux

VII.1.1. Principe

VII.1.1.1. Introduction

Formuler un enrobé hydrocarboné c'est déterminer le meilleur mélange de granulats de diverses dimensions et d'un liant (le bitume) permettant d'obtenir un mélange doué de certaines propriétés : imperméabilité, rugosité, résistance mécanique (à l'orniérage et à la fatigue)...

VII.1.1.2. Généralités

Le principal critère à prendre en compte lors du choix d'une formule d'enrobé est le dimensionnement qui se caractérise par les propriétés suivantes :

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

Une formule prévue pour une épaisseur donnée doit être modifiée si l'on modifie l'épaisseur de la couche (par expérience 1 cm d'épaisseur en plus correspond à un gain de un point dans la compacité).

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

- e) *Les conditions d'exploitation hivernale* : pneus à crampons et sels de déverglaçage.
- f) *Les conditions de site au niveau de la sécurité* : routes de montagne, voies à grande vitesse.

VII.1.1.3. Les constituants

Les matériaux entrant dans la composition des enrobés utilisés en couche de roulement de chaussées se répartissent en 4 grandes catégories :

- les granulats à l'exclusion des fines d'apport ;
- le liant, généralement du bitume;
- les fines d'apport ;
- les dopes et les activants.

VII.1.1.3.1. Les granulats

Ils sont identifiés par leur nature pétrographique et leur structure et doivent répondre aux exigences de la norme (NFP 18-321 *Granulats routiers*) et aux spécifications complémentaires qui figurent dans les documents en vigueur pour chaque technique considérée.

Ces exigences concernent la courbe granulométrique et les principales caractéristiques physiques et mécaniques qui sont :

- la forme: donnée par le coefficient d'aplatissement ;
- la propreté des sables : donnée par la mesure de l'équivalent de sable et la valeur au bleu ;
- l'angularité : exprimée par le rapport de concassage ;
- la résistance aux chocs : définie par l'essai Los Angeles ;
- la résistance à l'usure par frottement : définie par l'essai micro Deval humide ;
- la résistance au polissage : mesurée par le coefficient de polissage accéléré (CPA) ;
- la propreté des granulats : définie par l'essai de propreté superficielle des granulats.

La granularité du squelette minéral des enrobés est définie par les dimensions extérieures des éléments qui la composent. On utilise généralement des granularités 0/6, 0/10 ou 0/14.

La granularité peut être :

- a. **Grenue** : ce qui correspond à un mélange riche en gravillons et pauvre en sable.
- b. **Semi-grenue** : là où le dosage gravillons-sable est particulièrement étudié et correspond au mélange le plus couramment utilisé dans les formules actuelles.
- c. **Discontinue** : lorsqu'on supprime une des fractions granulaires du mélange, en général le petit gravillon.
- d. **Continue** : lorsque toutes les fractions granulaires sont présentes, cette granularité tend à disparaître aux profits des courbes discontinues en particulier dans la formulation des enrobés appliqués en couche mince.

VII.1.3.1.2. Le liant hydrocarboné

Le liant utilisé dans les enrobés pour couches de surface est généralement à base de bitume pur d'une catégorie conforme aux normes expérimentales de l'AFNOR (NFT 65-000 et 65-001). Outre le caractère d'imperméabilité de tous les liants actuellement disponibles, pour convenir à l'usage routier le liant hydrocarboné doit présenter certaines propriétés physiques et en particulier :

- résister aux contraintes de traction, de cisaillement et de compression ;
- éviter la susceptibilité thermique, c'est à dire qu'il ne devienne pas plus rigide par temps froid, ni plus mou par temps chaud;
- résister au frottement des pneumatiques ;
- résister au vieillissement sous l'influence de l'oxygène de l'air en particulier ;
- avoir une bonne adhésivité : c'est une caractéristique très importante du couple liant/granulat. En effet, l'eau peut s'interposer entre le granulat et le film de bitume lorsque la qualité du collage entre ces corps n'est pas suffisante. On caractérise cette tenue à l'eau avec l'essai d'immersion/compression appelé essai de désenrobage.

Le moyen le plus couramment utilisé pour résoudre ce problème consiste à remplacer la fraction sable de ces matériaux par un sable ayant une bonne adhésivité au bitume (sable à prédominance calcaire), on obtient ainsi des formules mixtes.

VII.1.3.1.3. Les fines d'apport

Lorsque la teneur en fines (éléments inférieurs à 0,08 mm) apportées par le sable de concassage ou de broyage entrant dans la composition du béton bitumineux s'avère insuffisante, il faut prévoir l'addition des fines d'apport.

Pour caractériser la qualité de ces fines ainsi que celles issues du sable, il convient d'utiliser les essais définis par les règlements en vigueur et de respecter les valeurs minimales imposées.

VII.1.3.1.4. Les dopes d'adhésivité

D'une manière générale, les granulats et le liant étant bien choisis dans la formulation, les bétons bitumineux répondront normalement aux exigences en ce qui concerne, en particulier, le rapport immersion – compression.

Cependant, face à l'action d'agents extérieurs tels que la présence d'eau ou de sels de déverglaçage, il est indispensable de se prémunir contre les dégradations qui peuvent être provoquées au sein du revêtement. C'est le rôle des dopes d'adhésivité qui sont des produits complexes destinés à renforcer la résistance des bétons bitumineux.

VII.1.2. Méthodologie d'une étude de formulation

Une étude de formulation d'un enrobé bitumineux pour couche de roulement comporte trois étapes principales de mise au point :

- la composition granulométrique ;
- la teneur en liant ;
- les caractéristiques de l'enrobé.

VII.1.2.1. La composition granulométrique

Le squelette minéral d'un béton bitumineux est obtenu par composition de sable, de gravillons et éventuellement de fines d'apport.

La composition granulométrique est définie pour chaque catégorie (type) de béton bitumineux par les pourcentages de passants aux différents tamis, ce pourcentage est délimité par des fuseaux des spécifications qui doivent contenir la courbe granulométrique du squelette minéral en tout point (diamètre).

Pour deux types de béton bitumineux semi-grenu : le BB 0/10 et le BB 0/14, les fuseaux des spécifications sont reportés sur le tableau VII.1.1 :

Tableau VII.1.1 : Fuseaux de spécification pour BB 0/10 et BB 0/14 semi-grenus.

Tamisât à (mm)	BB 0/10 (%)	BB 0/14(%)
14	-	94 à 100
10	94 à 100	72 à 84
6.3	65 à 75	50 à 66
4	45 à 60	40 à 54
2	30 à 45	28 à 40
0.08 roulement	7 à 10	7 à 10
0.08 liaison	6 à 9	6 à 9

Les compositions présentées correspondent à des courbes granulométriques continues, mais la possibilité d'introduction d'une discontinuité n'est pas exclue (exemple des enrobés drainants).

La méthode qui est couramment pratiquée pour la recherche d'une courbe granulométrique d'enrobé consiste, en partant des données granulométriques des matériaux, à faire passer la courbe du mélange par quelques points obligés, c'est à dire viser certaines valeurs de tamisât à deux ou trois tamis bien choisis, ou en général à ajuster cette courbe dans un fuseau de spécification. Ensuite, on effectue quelques modifications sur la totalité des fines, en jouant sur les fines d'apport ou sur le sable, ces modifications qui peuvent résulter d'une série préliminaire d'essais mécaniques sur l'enrobé.

Nota : La formule réelle retenue peut être différente de la formule théorique du fait de son optimisation.

VII.1.2.2. La teneur en liant

La teneur en liant d'un béton bitumineux est définie par une étude en laboratoire et elle est calculée à partir du module de richesse (**k**), de la surface spécifique conventionnelle (Σ), et d'un coefficient correcteur de la masse volumique réelle des granulats (**MV_r**) à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Teneur en liant} = K \cdot \alpha \cdot 5 \sqrt{\Sigma}$$

Σ est la surface spécifique conventionnelle en m²/kg, tel que :

$$100 \Sigma = 0.25 G + 2,3 S + 12s + 135f$$

Dans laquelle on a les pourcentages pondéraux des éléments :

- G : éléments supérieurs à 6,3 mm ;
- S : éléments compris entre 6,3 et 0,315 mm ;
- s : éléments compris entre 0,315 et 0,08 mm ;
- f : éléments inférieurs à 0,08 mm.
- α : coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats si elle diffère de 2,65 g/cm³. Dans ce cas on a :

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

K est le module de richesse, il représente l'épaisseur relative du film de liant déposé sur la surface des granulats. La valeur du module de richesse à prendre en compte est en fonction du type d'enrobé retenu, et doit être supérieure ou égale à une valeur minimale (3,3 pour le BB 0/14).

Nota : On peut déterminer la teneur en liant optimale expérimentalement par des tâtonnements (ex : plusieurs essais Marshall), on en déduit indirectement le module de richesse qui doit vérifier les valeurs minimales exigées.

VII.1.2.3. Les caractéristiques de l'enrobé

Lorsque les constituants sont totalement nouveaux, il est nécessaire d'effectuer une étude à caractère général qui fait appel aux essais suivants :

- essai DURIEZ
- essai MARSHALL

Les enrobés réalisés avec les matériaux sélectionnés dans les compositions retenues doivent présenter au minimum des performances à savoir une bonne résistance mécanique, compacité et déformation.

Dans le cas où il s'agit d'adapter ou de vérifier une formule d'enrobé déjà étudiée, l'étude de laboratoire sera simplifiée.

VII.2. Le traitement à chaud (ESSAI MARSHALL)

L'essai MARSHALL a pour but de déterminer, pour un pourcentage donné, la stabilité et le fluage Marshall d'une éprouvette de dimensions déterminées. Il est applicable à tous les enrobés à chaud ne comportant pas de granulats de dimension supérieure à 20mm.

Pour notre échantillon et partant de ses données granulométriques, on donne les pourcentages pondéraux des différentes fractions pour donner un mélange qui entre dans le fuseau de référence d'un béton bitumineux semi-grenu.

Pour aboutir aux pourcentages optimaux en respectant la teneur en fines minimale (7 %), on fixe dans un premier temps le pourcentage de la fraction de sable de manière à aboutir au minimum des fines, ensuite on complète avec les deux autres pourcentages pour obtenir une courbe qui entre dans le fuseau de référence du béton bitumineux 0/14 semi-grenu.

VII.2.1. Mélange A (témoin)

La formule retenue :

- Pourcentage du sable concassé 0/3 = 40 %
- Pourcentage du gravier 3/8 = 25 %
- Pourcentage du gravier 8/15 = 35 %

La teneur en liant :

On choisit $K_3=3.75$ comme le module de richesse utilisé pour calculer la teneur en bitume.

Les résultats Marshall obtenus sont mentionnés dans le tableau VII.2.1 ci-dessous :

Tableau VII.2.1 : Les résultats des essais effectués sur le mélange A.

Module de richesse	Teneur en bitume (%)	Stabilité Marshall (daN)	Fluage Marshall (1/10mm)	Compacité (%)
$k_3=3.75$	5.60	801	34.5	93.06

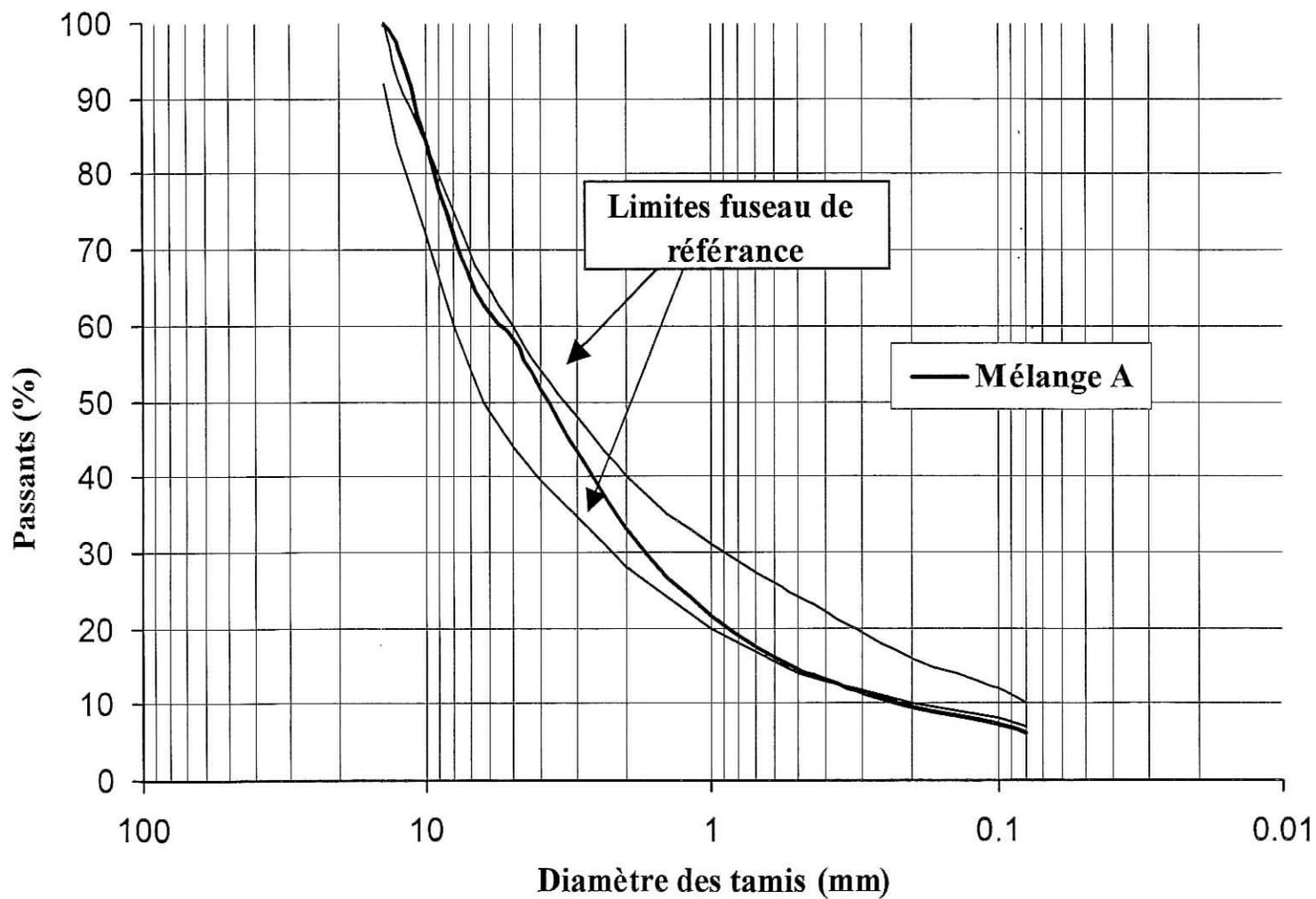


Figure VII.2.1 : Courbe granulométrique du mélange A.

VII.2.2. L'ajout des fillers d'apports

VII.2.2.1. Mélange B (Ajout de 2% du Filler Calcaire)

La formule retenue :

- Pourcentage du sable concassé 0/3 = 38 %
- Pourcentage du gravier 3/8 = 25 %
- Pourcentage du gravier 8/15 = 35 %
- Pourcentage de filler calcaire = 2 %

La teneur en liant :

Pour déterminer la teneur optimale en liant, on va effectuer pour différentes teneurs en bitume, des essais avec le mélange B afin de voir l'évolution de:

- La stabilité,
- Le fluage,
- La compacité.

La teneur en bitume retenue est celle qui confère à l'enrobé le meilleur compromis entre ces trois caractéristiques.

Pour déterminer la teneur en liant optimale du mélange B, nous avons pour cela effectué quatre mélanges avec l'essai Marshall à différents coefficients de module de richesse (K_1 , K_2 , K_3 et K_4).

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau VII.2.2, et représentés sur la Figure VII.2.3 ci-après :

Tableau VII.2.2 : Les résultats des essais effectués sur le mélange B.

Module de richesse	Teneur en bitume (%)	Stabilité Marshall (daN)	Fluage Marshall (1/10)mm	Compacité (%)
$k_1=3.45$	5.60	785	50.2	93.61
$k_2=3.60$	5.84	805	34.2	94.50
$k_3=3.75$	6.08	830	33.9	95.10
$k_4=3.90$	6.33	738	51.0	95.22

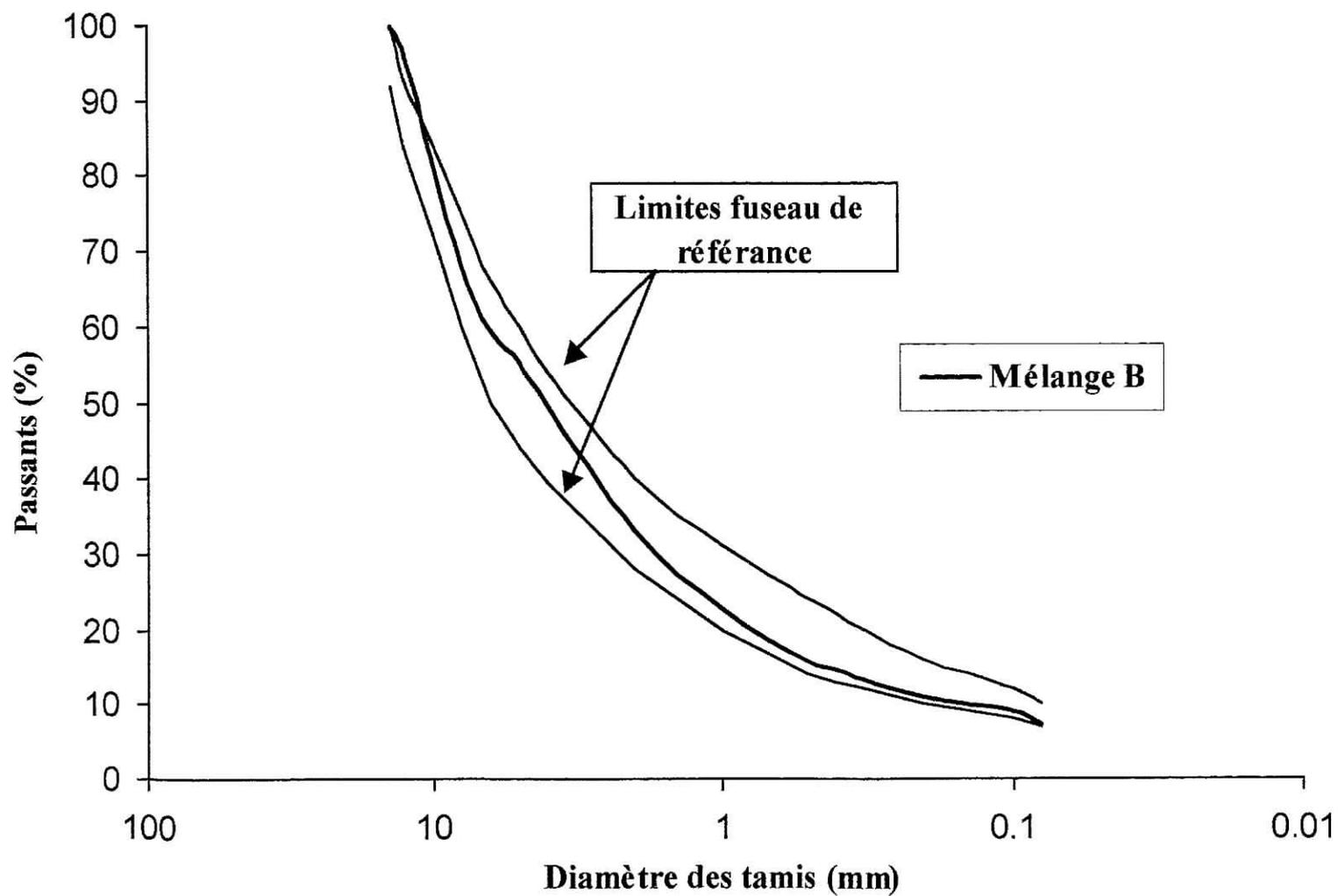


Figure VII.2.2 : Courbe granulométrique du mélange B.

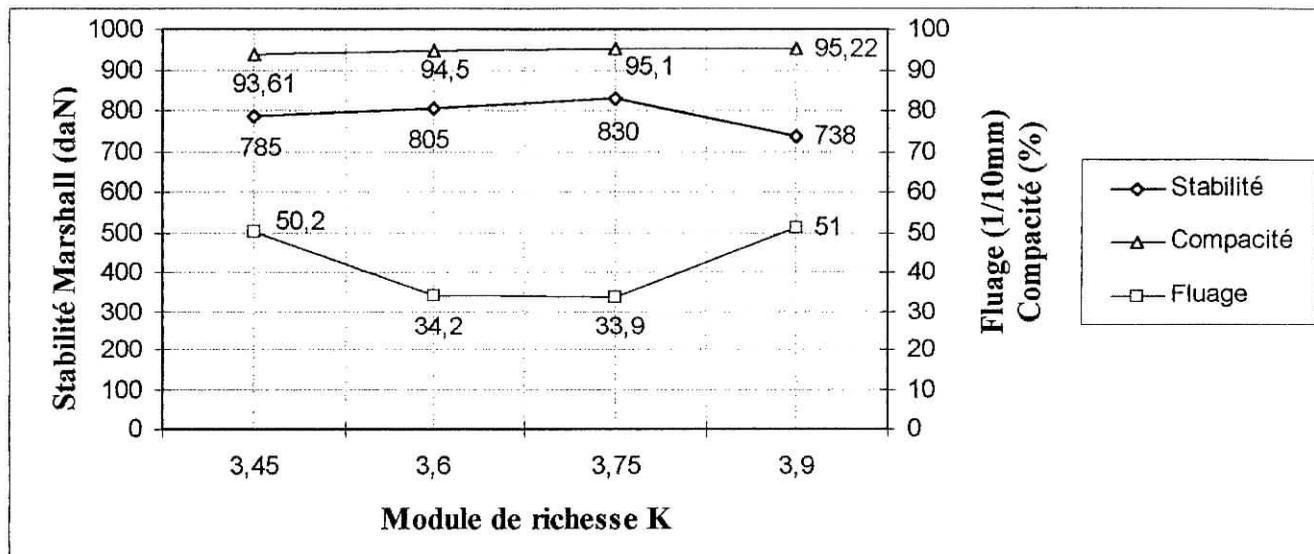


Figure VII.2.3 : Les résultats des essais effectués sur le mélange B.

VII.2.2.2. Mélange C (Ajout de 2% du Filler Calcaire + différents % de la Poudrette de Caoutchouc)

Pour évaluer l'amélioration des performances mécaniques du béton bitumineux en présence de la poudrette de caoutchouc, on effectue des essais Marshall pour chaque teneur en poudrette.

Le dosage en ajout va couvrir une plage de 0% à 4% avec un pas de 1%.

Les formules retenues :

Tableau VII.2.3 : Les différentes proportions granulaires du mélange C.

Mélange	0/3 (%)	3/8 (%)	8/15 (%)	Filler Calcaire (%)	P.C (%)
C1	37	25	35	2	1
C2	36	25	35	2	2
C3	35	25	35	2	3
C4	34	25	35	2	4

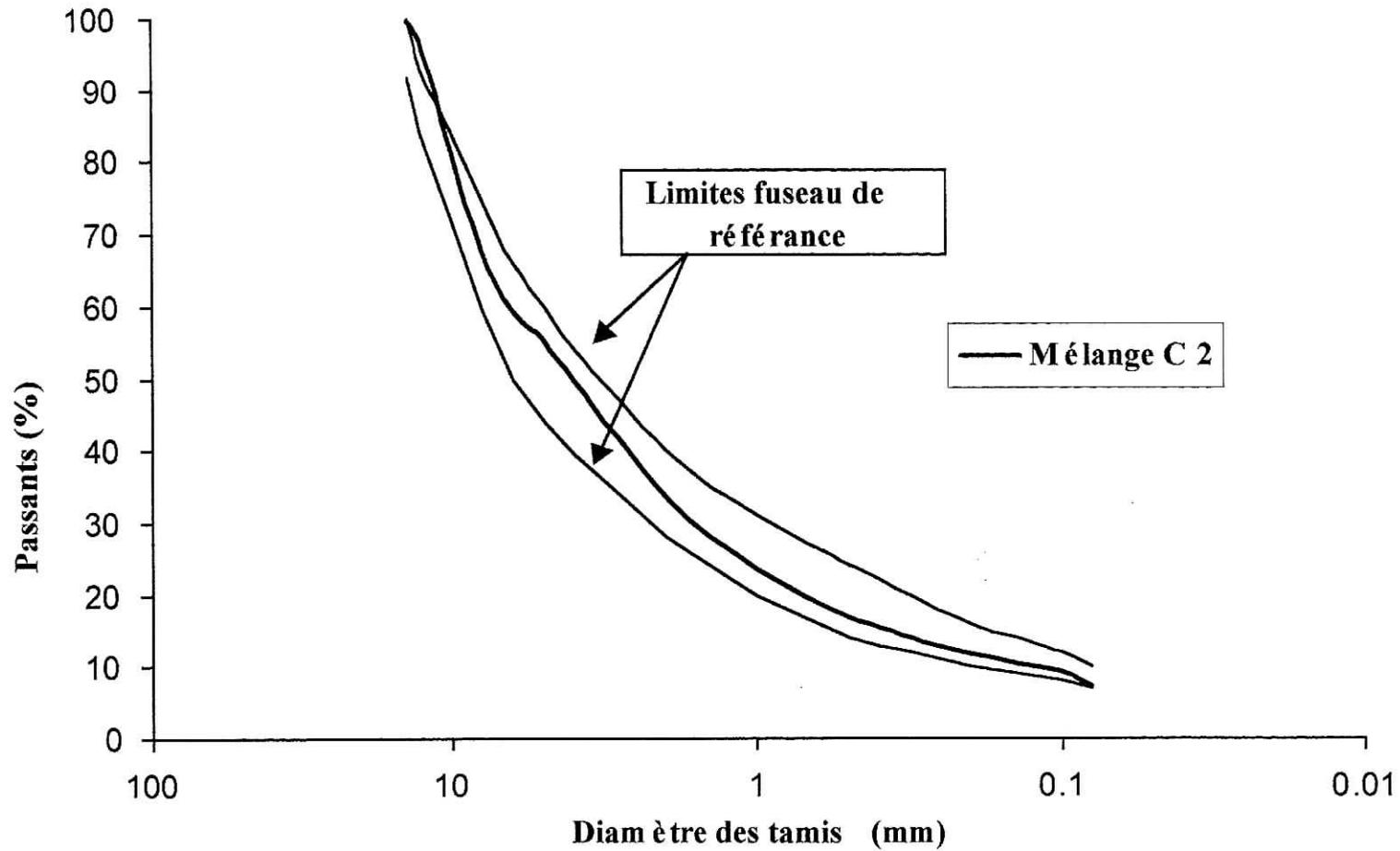


Figure VII.2.4: Courbe granulométrique du mélange C2.

Mode opératoire :

Pour préparer les éprouvettes d'essais Marshall, on suit le mode opératoire énoncé dans la norme **NF P 98-251-2**.

L'introduction de la poudrette de Caoutchouc se fait pendant l'opération de malaxage. La quantité pesée est versée progressivement, à l'intérieur du malaxeur, dans le mélange (liant + granulats) porté à la température de mise en œuvre (160°).

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau VII.2.4, et représentés sur la figure VII.2.5 ci-après :

Tableau VII.2.4 : Les résultats des essais effectués sur le mélange C.

Mélange	Teneur en poudrette de caoutchouc (%)	Teneur en bitume (%)	Stabilité Marshall (daN)	Fluage Marshall (1/10)mm	Compacité (%)
C0	0	6.08	830	33.9	95.10
C1	1	6.26	875	28.3	96.60
C2	2	6.45	917	21.9	97.65
C3	3	6.66	737	38.9	98.12
C4	4	6.86	674	41.9	98.54

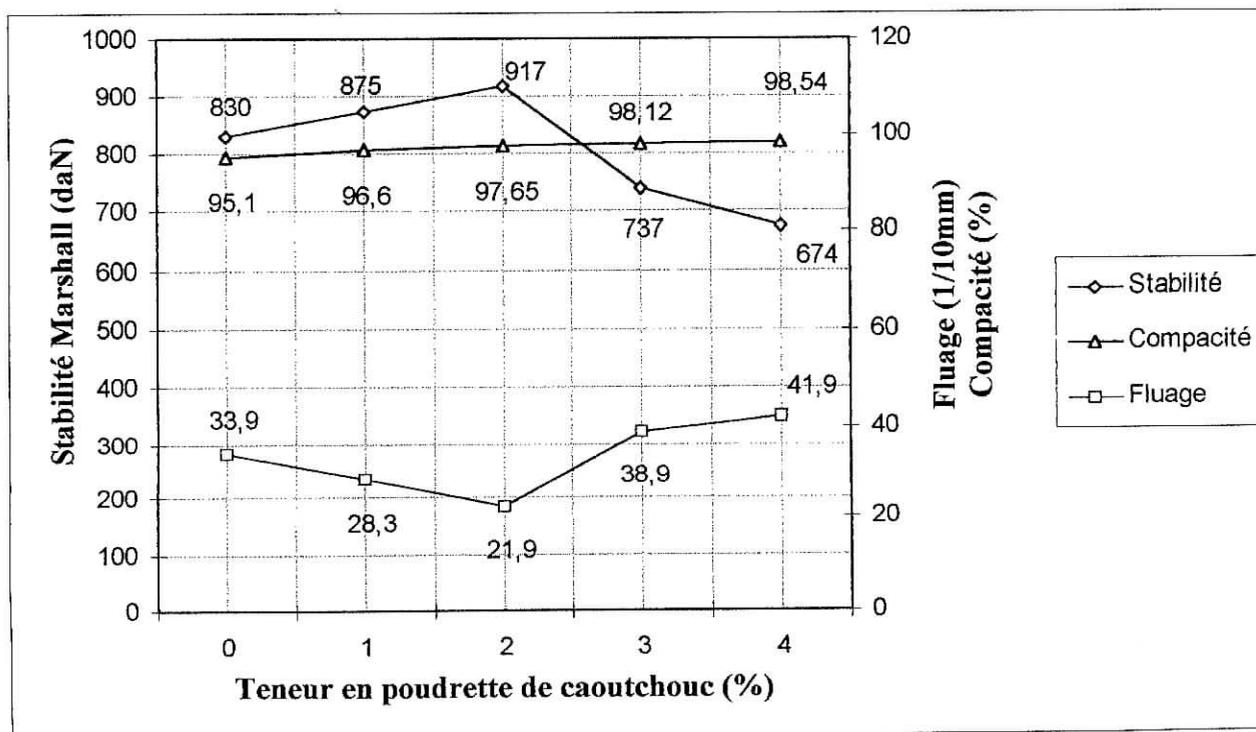


Figure VII.2.5 : Les résultats des essais effectués sur le mélange C.

VII.2.2.3. La comparaison entre les mélanges A, B et C2

Les résultats sont mentionnés dans le tableau VII.2.5, et représentés sur la figure VII.2.6 ci-après :

Tableau VII.2.5 : La comparaison entre les mélanges A, B et C2.

Mélange	Stabilité Marshall (daN)	Fluage Marshall (1/10)mm	Compacité (%)
A (0 % d'ajout)	801	34.5	93.06
B (2 % du Filler calcaire)	830	33.9	95.10
C2 (2% Filler calcaire + 2% P.C)	917	21.9	97.65

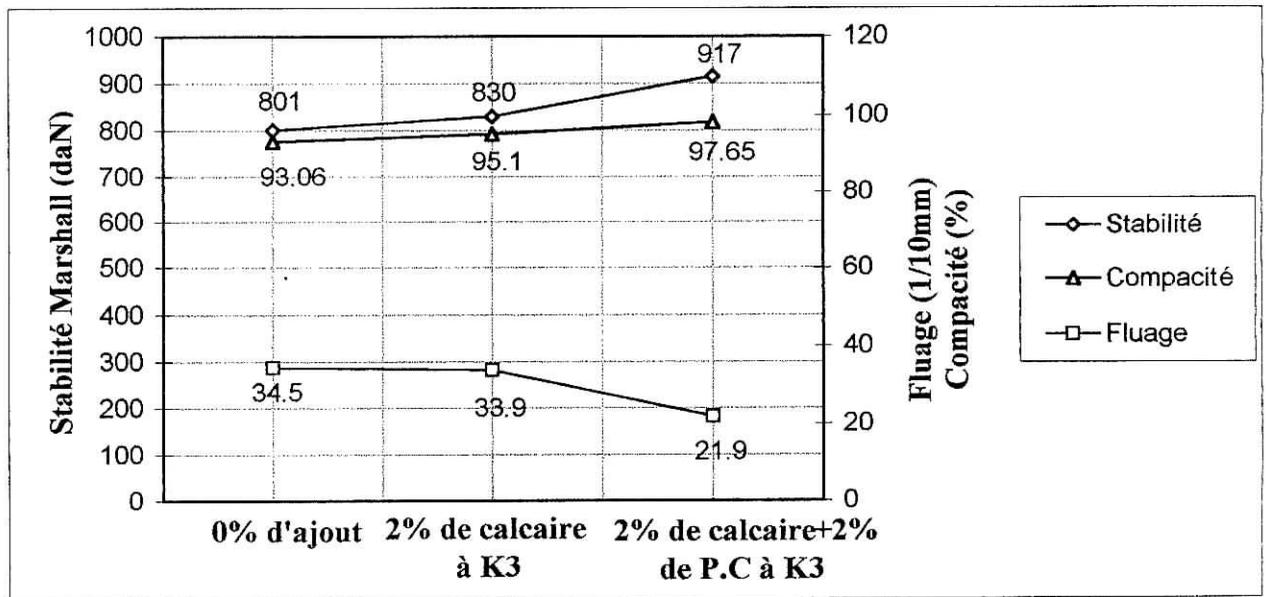


Figure VII.2.6 : La comparaison entre les mélanges A, B et C2.

VII.2.2.3.1. Interprétation des résultats

a)- L'ajout de 2% du filler calcaire a donné les résultats suivants :

- La stabilité Marshall maximale correspond au module de richesse K_3 ;
- Le fluage Marshall minimal correspond au module de richesse K_3 ;
- Un gain de l'ordre de 3.6% au niveau de la stabilité Marshall par rapport au mélange A (témoin) ;
- Une légère diminution de la valeur du fluage Marshall ;
- Une augmentation de la compacité.

D'après les résultats obtenus, le filler calcaire a amélioré la stabilité, le fluage et la compacité de l'enrobé, cette amélioration peut s'expliquer par le fait que le filler calcaire a augmenté l'affinité liant/granulats.

b)- L'ajout de la poudrette de caoutchouc a donné les résultats suivants :

- La stabilité Marshall présente un optimum à un pourcentage de 2% de poudrette de caoutchouc avec un gain de 10.5% par rapport au mélange B (ajout de 2% du filler calcaire), puis elle chute rapidement ;
- Le fluage Marshall présente un minimum à un pourcentage de 2% de poudrette de caoutchouc (diminution de l'ordre de 35.4%) puis il devient rapidement intolérable ;
- La compacité atteint des pourcentages très élevés à 2% de poudrette de caoutchouc (97.65%).

D'après les résultats obtenus, la poudrette de caoutchouc a amélioré les performances mécaniques de l'enrobé, cette amélioration peut s'expliquer par le fait que la poudrette a augmenté d'une façon considérable la compacité du béton bitumineux qui est devenu plus résistant.

En testant les 3% et 4% de la poudrette de caoutchouc dans le mélange, l'enrobé ne s'est pas bien comporté vu la stabilité a nettement chuté ainsi que le fluage, par contre, on remarque que les compacités ont atteint un seuil maximal. Cette chute de résistance mécanique de l'enrobé s'explique par la forte présence d'éléments souples (poudrette de caoutchouc) ce qui rend l'enrobé très mou.

VII.2.2.4. Mélange D (Ajout de 3% du CPJ45)

La formule retenue :

- Pourcentage du sable concassé 0/3 = 37 %
- Pourcentage du gravier 3/8 = 25 %
- Pourcentage du gravier 8/15 = 35 %
- Pourcentage de CPJ45 = 3 %

La teneur en liant :

On choisit $K_3=3.75$ comme le module de richesse utilisé pour calculer la teneur en bitume.

Les résultats sont mentionnés dans le tableau VII.2.6 ci-après :

Tableau VII.2.6 : Les résultats des essais effectués sur le mélange D.

Mélange	Stabilité Marshall (daN)	Fluage Marshall (1/10)mm	Compacité (%)
D (3 % du CPJ45)	839	32.2	95.90

VII.2.5. Mélange E (Ajout de 3% du CPJ45 + 2% de Poudrette de Caoutchouc)

On effectue l'essai MARSHALL pour une teneur de 2 % en Poudrette de Caoutchouc.

La formule retenue :

- Pourcentage du sable concassé 0/3 = 35 %
- Pourcentage du gravier 3/8 = 25 %
- Pourcentage du gravier 8/15 = 35 %
- Pourcentage de CPJ45 = 3 %
- Pourcentage du poudrette du caoutchouc = 2%

La teneur en liant :

On choisit $K_3=3.75$ comme le module de richesse utilisé pour calculer la teneur en bitume.

Les résultats sont représentés dans le tableau VII.2.7 ci-après :

Tableau VII.2.7 : Les résultats des essais effectués sur le mélange E.

Mélange	Stabilité Marshall (daN)	Fluage Marshall (1/10) mm	Compacité (%)
E (3% CPJ45 + 2% P.C)	922	23.1	98.22

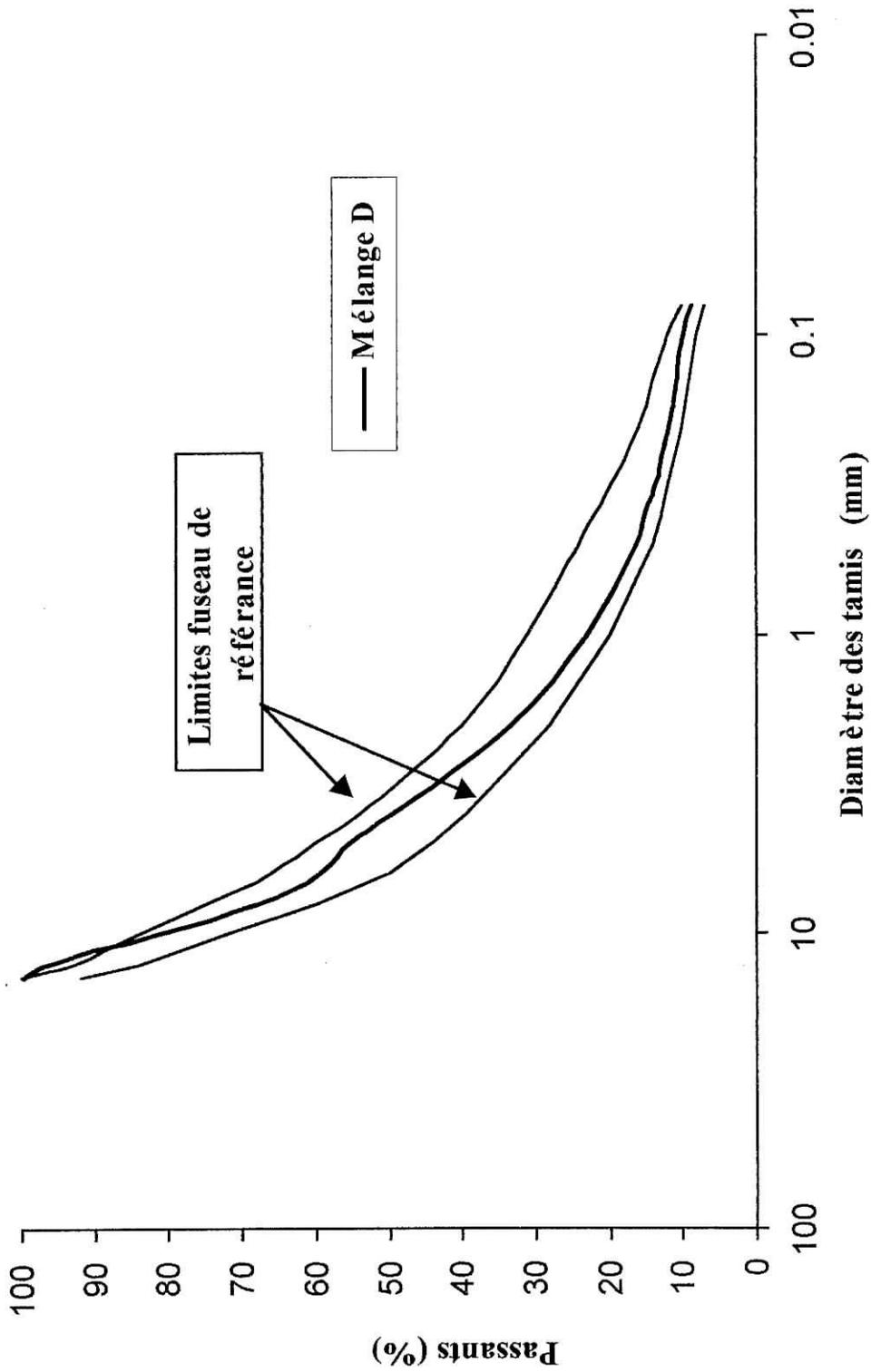


Figure VII.2.7 : Courbe granulométrique du mélange D.

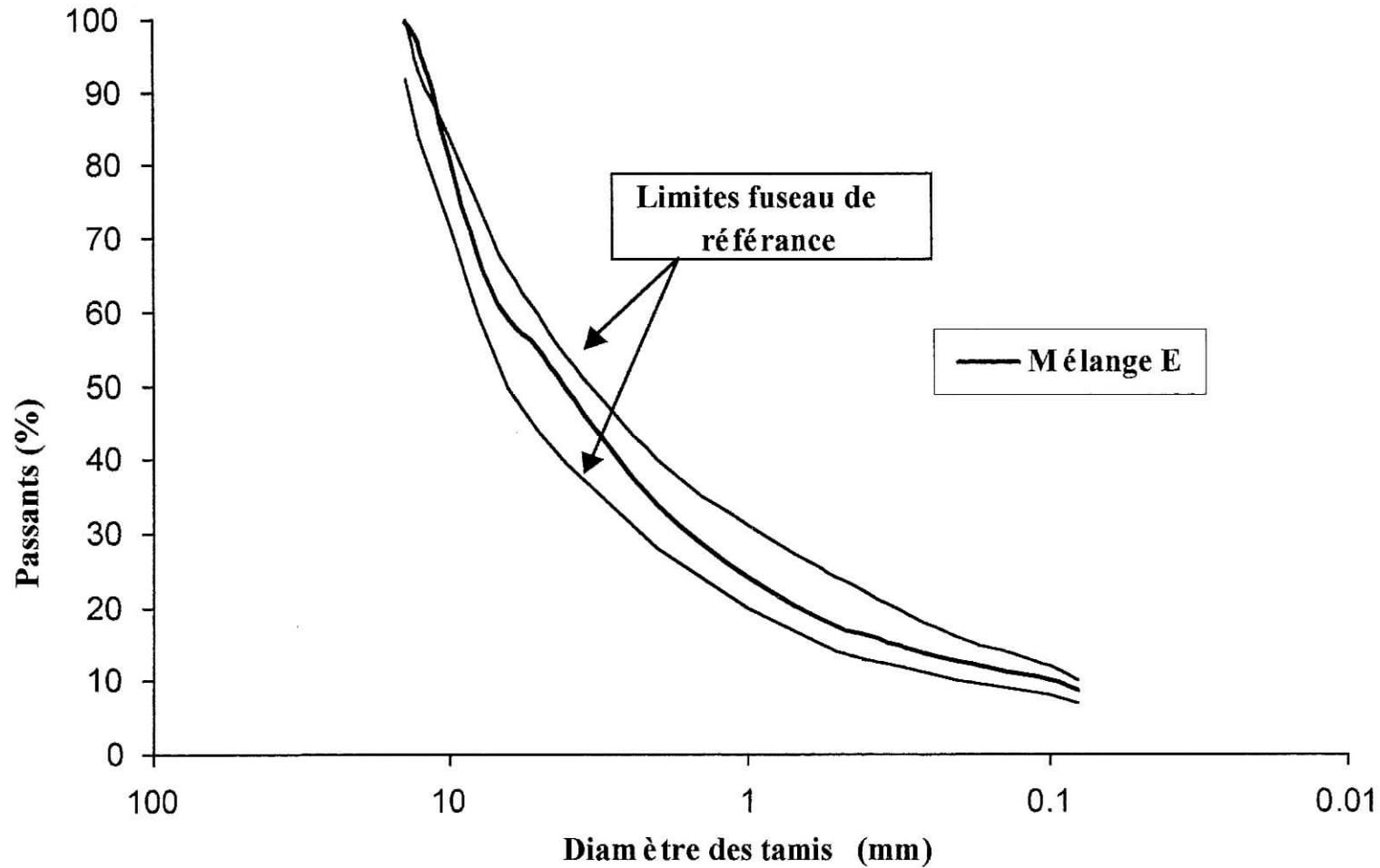


Figure VII.2.8 : Courbe granulométrique du mélange E.

VII.2.2.6. La comparaison entre les mélanges A, D et E

Les résultats sont mentionnés dans le tableau VII.2.8, et représentés sur la figure VII.2.9 ci-après :

Tableau VII.2.8 : La comparaison entre les mélanges A, D et E.

Mélange	Stabilité Marshall (daN)	Fluage Marshall (1/10)mm	Compacité (%)
A (0 % d'ajout)	801	34.5	93.06
D (3 % du CPJ45)	839	32.2	95.90
E (3% CPJ45 + 2% P.C)	922	23.1	98.22

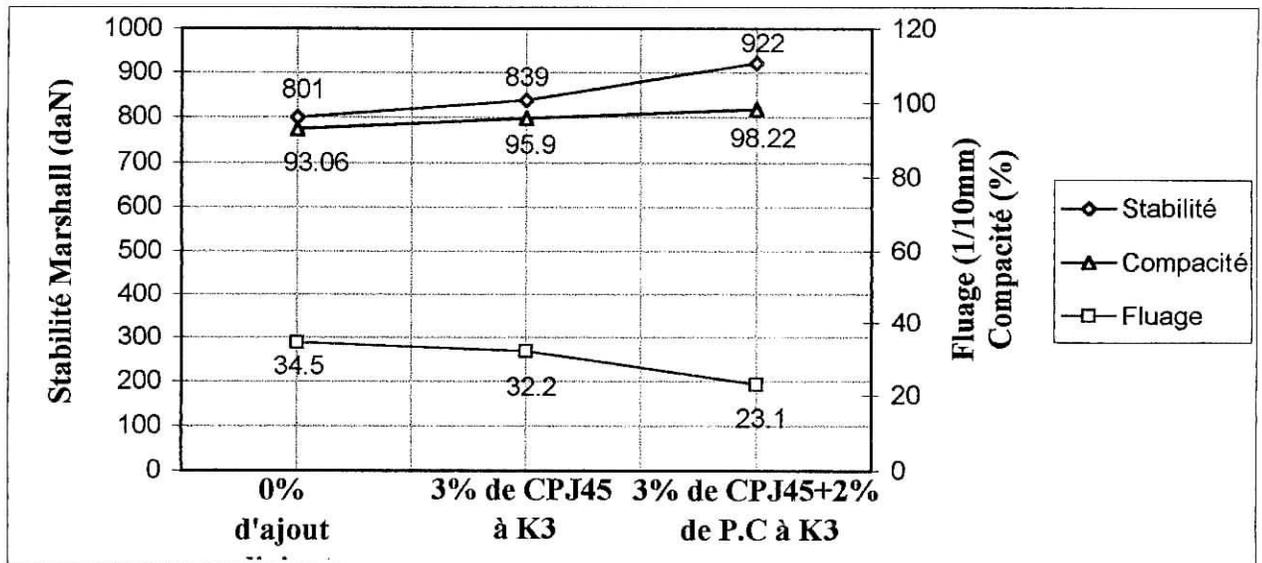


Figure VII.2.9 : La comparaison entre les mélanges A, D et E.

VII.2.2.6.1. Interprétation des résultats

a)- L'ajout de 3% du CPJ45 à notre enrobé bitumineux, a donné les résultats suivants :

- Un gain de l'ordre de 4.7% en niveau de la stabilité Marshall par rapport au mélange A (témoin) ;
- Une légère diminution de 6.7% de la valeur du fluage Marshall ;
- Une augmentation de la compacité (95.9%).

D'après les résultats obtenus, le CPJ45 a amélioré la stabilité, le fluage et la compacité de l'enrobé, cette amélioration peut s'expliquer par le fait que le CPJ45 a amélioré l'affinité liant/granulats, ce qui consolide d'avantage l'enrobé.

b)- L'ajout de 2% de poudrette de caoutchouc et 3% de CPJ45 au béton bitumineux a donné les résultats suivants :

- La stabilité Marshall présente un gain de 9.9% par rapport au mélange D (ajout de 3% du CPJ45) ;
- Une diminution de l'ordre de 28.3% du fluage Marshall ;
- La compacité atteint un pourcentage très élevé (98.22%).

VII.2.3. Conclusion

L'étude du béton bitumineux à chaud avec l'essai Marshall montre que :

1. L'ajout du filler calcaire et du CPJ45 au béton bitumineux a donné une amélioration des performances mécaniques de l'enrobé.
2. le béton bitumineux présente des meilleures caractéristiques à une teneur de 2% en poudrette de caoutchouc.

On peut dire que l'ajout soit du filler calcaire, CPJ45 ou la poudrette de caoutchouc dans le squelette du béton bitumineux ont amélioré ses performances mécaniques. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que l'ajout de ces apports de fillers augmente l'affinité bitume/granulats et améliore la compacité de l'enrobé, donc des meilleures caractéristiques mécaniques.

VII.3. Le traitement à froid

(ESSAI DURIEZ)

Le but de l'essai Duriez est de caractériser les qualités de résistances mécaniques et de résistance au désempolement par l'eau. Dans le cas des matériaux enrobés classiques, les résultats de l'essai Duriez suffisent à eux à caractériser convenablement la qualité des matériaux, dans d'autres cas, on pourra avoir avantage à les compléter par les résultats d'autres essais (Essai Hubbard Field pour les matériaux fins, et l'essai Marshall pour les matériaux à base de granulats ronds ou très anguleux).

Le but de notre étude est l'amélioration des résistances mécaniques et la résistance au désempolement par l'eau d'un béton bitumineux traité à froid.

Pour aboutir aux pourcentages optimaux on suit la même procédure que le traitement à chaud c'est à dire, on respecte la teneur en fines minimale (7%), après on fixe dans un premier temps le pourcentage de la fraction de sable de manière à aboutir un minimum des fines, ensuite on complète avec les deux autres pourcentages restants pour obtenir une courbe qui s'insère dans le fuseau de référence du béton bitumineux 0/14 semi-grenu.

VII.3.1- Premier mélange A (Témoin)

La formule retenue :

- Pourcentage du sable concassé 0/3 = 40 %
- Pourcentage du gravier 3/8 = 25 %
- Pourcentage du gravier 8/15 = 35 %

La teneur en liant : on choisit pour le premier essai un mélange avec un module de richesse $K_3=3.75$ pour calculer la teneur en émulsion.

L'eau d'apport :

Sachant que l'émulsion contient 35 % d'eau de constitution, on ajoute à chaque fois 2% d'eau pour rendre le mélange maniable pour faciliter la confection des éprouvettes.

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le Tableau VII.3.1 ci-après :

Tableau VII.3.1 : Les résultats des essais effectués sur le mélange A.

Module de richesse : $K_3=3.75$					
Teneur en bitume résiduel (%)	Teneur en émulsion (%)	Résistance à sec (R) (bars)	Résistance à l'immersion (R') (bars)	Compacité (%)	R'/R
5.86	9.02	4.6	3.33	93.50	0.74

Interprétation des résultats

On remarque d'après les résultats obtenus que les résistances sont très faibles, ce qui confirme d'une part la mauvaise adhésivité des granulats de nature basaltique à l'émulsion, et d'autre part, on rencontre un autre problème qui est l'emprisonnement de l'eau dans l'enrobé.

Pour régler ces problèmes ci-dessus, on procède à ajouter des fillers d'apports pour améliorer l'adhésivité des granulats au bitume et/ou absorber l'eau emprisonnée dans l'enrobé.

VII.3.2. L'ajout des fillers d'apport

Il n'existe pas de spécifications relatives aux fillers d'apports destinés à améliorer la tenue à l'eau des enrobés ou l'adhésivité liants/granulats ; leur efficacité étant vérifiée à travers l'amélioration :

- de la tenue à l'eau pour les enrobés ;
- de l'affinité liant/granulats.

VII.3.2.1. Mélange B (Ajout de 2% du Calcaire)

Dans ce traitement, on ajoute 2% du filler calcaire et nous aboutirons à la formulation suivant :

- Pourcentage du sable concassé 0/3 = 38 %
- Pourcentage du gravier 3/8 = 25 %
- Pourcentage du gravier 8/15 = 35 %
- Pourcentage de filler de calcaire = 2 %

La teneur en liant :

Pour déterminer la teneur optimale en liant, on va effectuer pour différentes teneurs en émulsion, des essais avec le mélange B afin de voir l'évolution de :

- La résistance à la compression à sec à 18°C pendant 7 jours (R),
- La résistance à la compression à l'immersion à 18°C pendant 7 jours (R'),
- La compacité.

La teneur en émulsion retenue est celle qui confère à l'enrobé le meilleur compromis entre ces trois caractéristiques.

Pour déterminer la teneur en liant optimale du mélange B, nous avons pour cela effectué quatre mélanges avec l'essai DURIEZ à différents coefficients de module de richesse K_1, K_2, K_3 et K_4 .

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau VII.3.2, et représentés sur la figure VII.3.1 ci après :

Tableau VII.3.2 : Les résultats des essais effectués sur le mélange B.

	Emulsion 65 %			
Module de richesse K	3.45	3.60	3.75	3.90
Emulsion (%)	8.62	8.98	9.35	9.74
Bitume résiduel (%)	5.60	5.84	6.08	6.33
Compacité (%)	93.08	94.24	95.08	95.88
Résistance à sec R (bars)	3	3.33	4.67	3.33
Résistance à l'immersion R' (bars)	2.33	2.5	3.5	2.33
Rapport (R'/R)	0.78	0.75	0.75	0.70

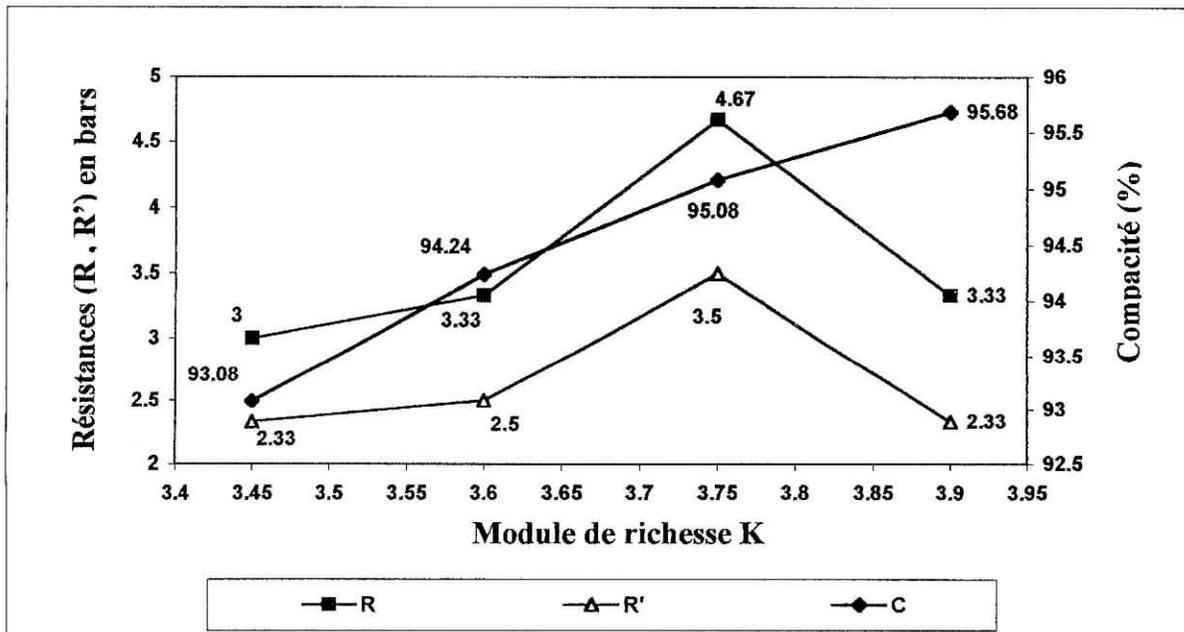


Figure VII.3.1 : Les résultats des essais effectués sur le mélange B.

D'après ces résultats on remarque que :

- La résistance optimale à la compression à sec correspond au module de richesse K_3 ;
- La résistance optimale à la compression à l'immersion correspond au module de richesse K_3 .

Interprétation des résultats :

D'après les résultats précédents, on remarque que l'ajout de filler calcaire n'influe pas beaucoup sur les caractéristiques de notre béton bitumineux, toutefois on peut dire que l'ajout de cette apport n'est pas une solution meilleure pour augmenter les performances mécaniques de l'enrobé.

VII.3.2.2. Mélange C (Ajout de 2% du Calcaire + différents pourcentages de la Poudrette de Caoutchouc)

Dans ce mélange, on ajoute la poudrette de caoutchouc pour voir s'il y a une amélioration des caractéristiques de notre béton bitumineux.

Le dosage en poudrette de caoutchouc se fait progressivement dans un intervalle de 0% à 4% d'ajout avec un pas de 1%.

On a testé quatre mélanges, pour obtenir l'optimum de l'ajout de poudrette ,dont les composantes de ces mélanges sont représentées dans le tableau VII.3.3 ci-après :

Tableau VII.3.3 : Les différentes proportions granulaires du mélange C.

Composantes en % Mélange	0/3	3/8	8/15	Filler de Calcaire	PC
C1	37	25	35	2	1
C2	36	25	35	2	2
C3	35	25	35	2	3
C4	34	25	35	2	4

Mode opératoire :

Pour préparer les éprouvettes d'essai DURIEZ, on suit le mode opératoire énoncé dans la norme **NF P 98-251-4**.

L'introduction de la poudrette de Caoutchouc se fait pendant l'opération de malaxage. La quantité pesée est versée progressivement à l'intérieur du malaxeur pour la bien mélanger avec les autres constituants.

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau VII.3.4, et représentés sur la figure VII.3.2 ci-après :

Tableau VII.3.4 : Les résultats des essais effectués sur le mélange C.

Mélange	Module de richesse K_3				
	C0	C1	C2	C3	C4
Pourcentages de poudrette de caoutchouc(%)	0	1	2	3	4
Emulsion (%)	9.35	9.63	9.92	10.25	10.55
Bitume résiduel (%)	6.08	6.26	6.45	6.66	6.86
Compacité (%)	95.08	96.8	97.33	97.86	98.2
Résistance à sec (R) (bars)	4.67	5.25	6.5	5.4	5.25
Résistance à l'immersion (R') (bars)	3.5	4.17	3.98	2.67	2.5
Rapport (R'/R)	0.75	0.79	0.61	0.52	0.48

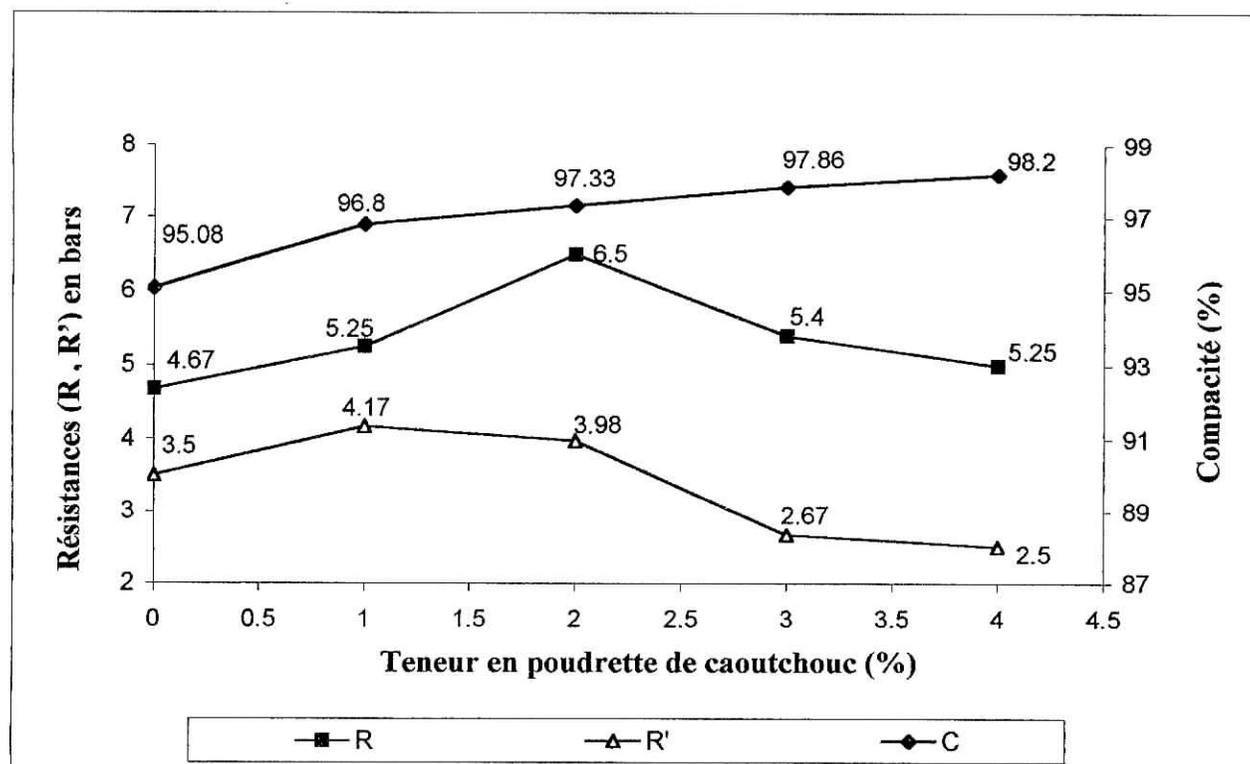


Figure VII.3.2 : Les résultats des essais effectués sur le mélange C.

Interprétation des résultats

- D'après ces résultats on remarque que :
 - Les résistances optimales à la compression à 18°C après 7 jours à sec et à l'immersion correspondent à une teneur de 2% de poudrette de caoutchouc ;
 - Le rapport R'/R atteint 0.61 à 2% de poudrette de caoutchouc ;

Donc la teneur optimale de la poudrette de caoutchouc est de 2%. D'après les résultats obtenus, on peut dire que la poudrette a amélioré l'adhésivité entre le bitume résiduel de l'émulsion et les granulats, cette amélioration est due au rapport entre l'évaporation de l'eau et la compacité, qui donne les meilleures performances à l'enrobé à 2% de poudrette de caoutchouc.

VII.3.2.3. La comparaison entre les mélanges A, B et C2

Les résultats sont mentionnés dans le tableau VII.3.5, et représentés sur la figure VII.3.3 ci-après :

Tableau VII.3.5 : La comparaison entre les mélanges A, B et C2.

Mélange	Résistance à sec (R) (bars)	Résistance à l'immersion (R') (bars)	Compacité (%)
A	4.6	3.33	93.5
B	4.67	3.5	95.08
C2	6.5	3.98	97.33

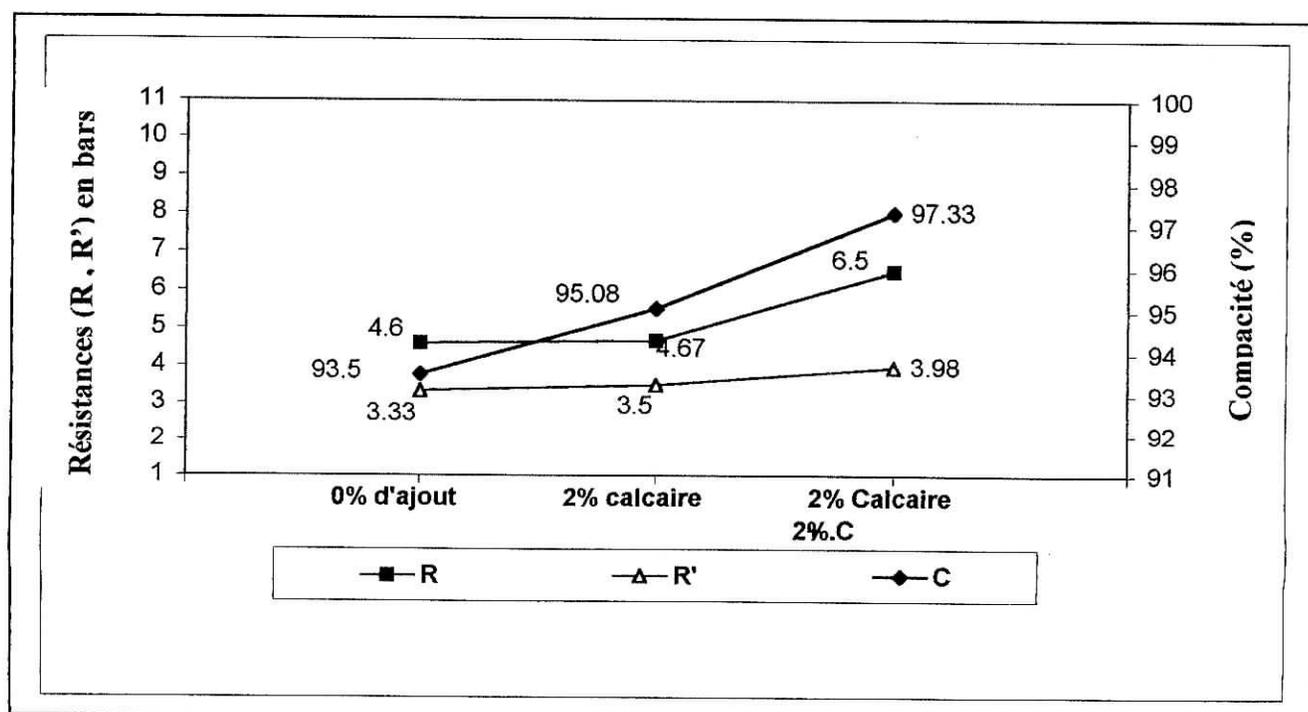


Figure VII.3.3 : La comparaison entre les mélanges A, B et C2.

VII.3.2.4. Mélange D (Ajout de 3% du CPJ45)

Le CPJ45 joue deux rôles très importants :

- L'absorption de l'eau emprisonné dans l'enrobé ;
- Augmentation des performances mécaniques du béton bitumineux après prise au contact de l'eau.

3% du CPJ45 sont ajoutés dans le mélange afin d'apprécier le comportement de l'enrobé vis à vis de l'eau.

La formule retenue :

- Pourcentage du sable concassé 0/3 = 37 %
- Pourcentage du gravier 3/8 = 25 %
- Pourcentage du gravier 8/15 = 35 %
- Pourcentage de CPJ45 = 3 %

La teneur en liant :

On choisit $K_3=3.75$ comme le module de richesse utilisé pour calculer la teneur en émulsion.

Les résultats sont mentionnés dans le tableau VII.3.6 ci-après :

Tableau VII.3.6 : Les résultats des essais effectués sur le mélange D.

Mélange	Bitume résiduel (%)	Emulsion (%)	Compacité (%)	Résistance à sec (R) (bars)	Résistance à l'immersion (R') (bars)	Rapport R'/R
D	6.23	9.58	95.8	25	21.67	0.87

Interprétation des résultats

Selon les résultats obtenus on remarque :

- Un gain important d'environ 450 % au niveau de la résistance à sec et de 550% au niveau de la résistance avec immersion par rapport au mélange A (témoin) ;
- Une augmentation de la compacité par rapport à celle du témoin ;
- Le rapport R'/R atteint 0.87.

Cette amélioration nous permet de conclure que le CPJ45 a joué un rôle très important dans l'enrobé en profitant de l'eau de constitution et de l'eau d'apport pour faire prise et automatiquement améliorer les performances mécaniques de l'enrobé .

VII.3.2.5. Mélange E (Ajout de 3% du CPJ45 + 2% de poudrette de caoutchouc)

Cette fois ci, on a testé l'ajout de 2% de poudrette de caoutchouc + 3% du CPJ45 dans l'enrobé.

La formule retenue :

- Pourcentage du sable concassé 0/3 = 35 %
- Pourcentage du gravier 3/8 = 25 %
- Pourcentage du gravier 8/15 = 35 %
- Pourcentage de CPJ45 = 3 %
- Pourcentage du poudrette du caoutchouc = 2%

La teneur en liant :

On choisit $K_3=3.75$ comme le module de richesse utilisé pour calculer la teneur en émulsion.

Les résultats sont représentés dans le tableau VII.3.7 ci-après :

Tableau VII.3.7 : Les résultats des essais effectués sur le mélange E.

Mélange	Bitume résiduel (%)	Emulsion (%)	Compacité (%)	Résistance à sec (R) (bars)	Résistance avec immersion (R') (bars)	Rapport R'/R
E	6.61	10.17	97.68	14	12	0.86

Interprétation des résultats

Selon les résultats obtenus on remarque :

- ❖ Une chute au niveau des résistances R (environ 44%) et R' (environ 45%) par rapport au mélange D (ajout de 3% du CPJ45) ;
- ❖ Une augmentation de la compacité est observée.

La chute des résistances R et R' peut s'expliquer par la mauvaise adhésivité entre la poudrette de caoutchouc et le CPJ45, ce qui a causé une diminution des performances mécaniques du béton bitumineux .

VII.3.2.6. La comparaison entre les mélanges A, D et E

Les résultats sont mentionnés dans le tableau VII.3.8, et représentés sur la figure VII.3.4 ci-après :

Tableau VII.3.8 : Comparaison entre les mélanges A, D et E.

Mélange	Résistance à sec (R) (bars)	Résistance à l'immersion (R') (bars)	Compacité (%)
A (0 % d'ajout)	4.6	3.33	93.5
D (3 % du CPJ45)	25	21.67	95.8
E (3% CPJ45 + 2% P.C)	14	12	97.68

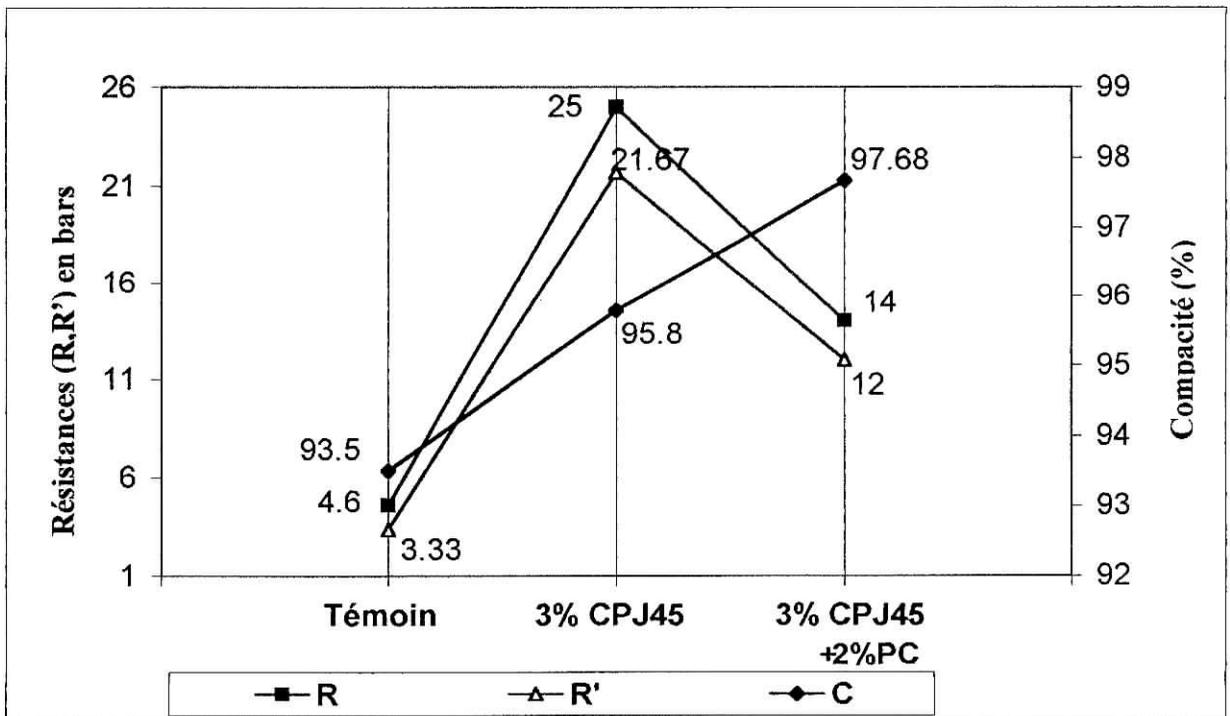


Figure VII.3.4 : Comparaison entre les mélanges A, D et E.

VII.3.2.7. Mélange F (Ajout de 3% la chaux)

Dans ce cas là, on ajout 3% de la chaux, ce filler qui a pour rôle d'absorber l'eau emprisonné dans l'enrobé et donc apporter des solutions aux problèmes rencontrés précédemment.

La formule retenue :

- Pourcentage du sable concassé 0/3 = 37 %
- Pourcentage du gravier 3/8 = 25 %
- Pourcentage du gravier 8/15 = 35 %
- Pourcentage de la chaux = 3 %

La teneur en liant :

Le même module de richesse est employé dans ce mélange ($K_3=3.75$) pour calculer la teneur en émulsion.

Les résultats sont mentionnés dans le tableau VII.3.9, et la courbe granulométrique du mélange F est représentée dans la figure VII.3.5 ci-après :

Tableau VII.3.9 : Les résultats des essais effectués sur le mélange F.

Mélange	Bitume résiduel (%)	Emulsion (%)	Compacité (%)	Résistance à sec (R) (bar)	Résistance avec immersion (R') (bar)	Rapport R'/R
F	6.27	9.65	95.55	14.67	11.33	0.77

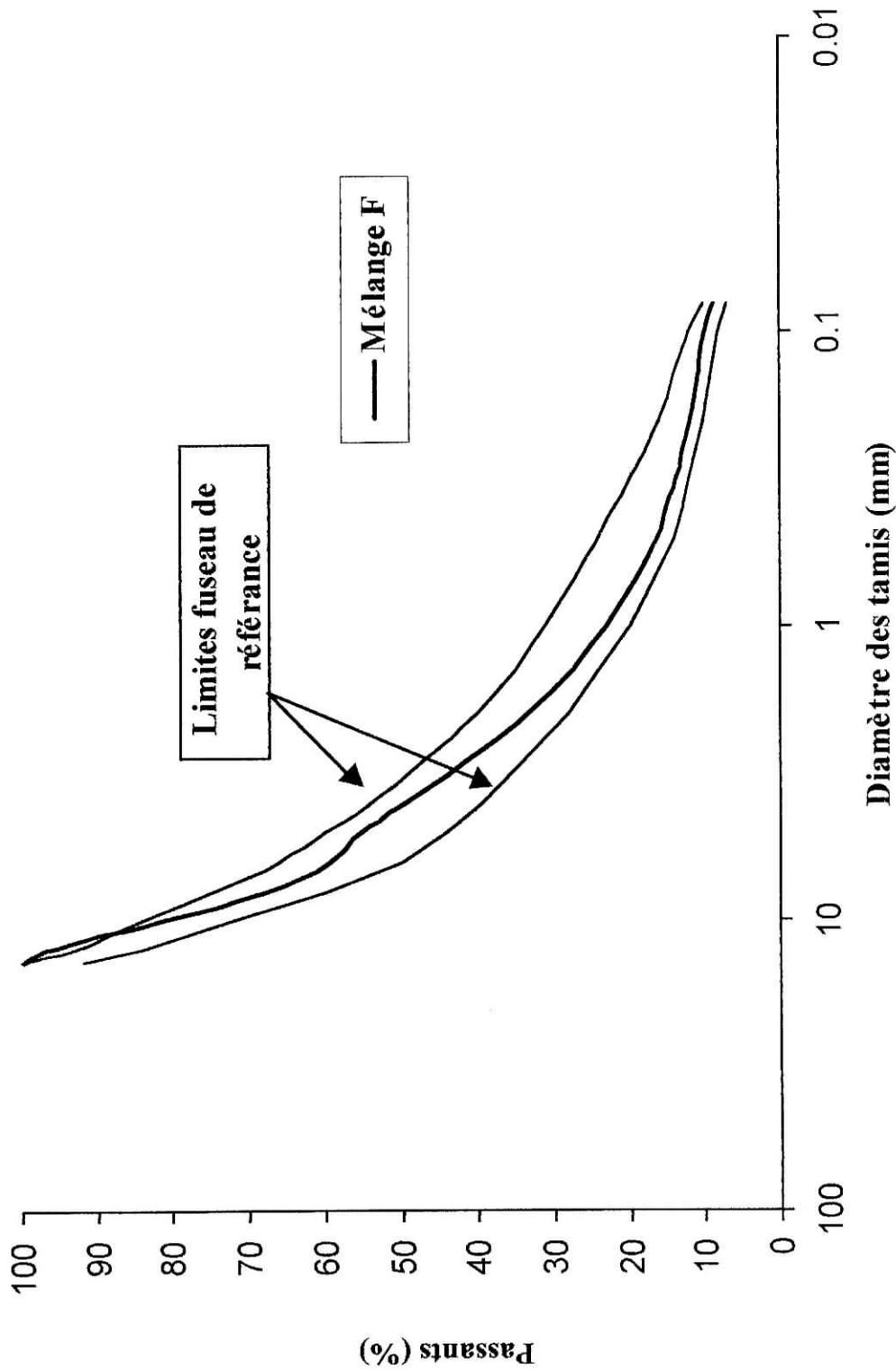


Figure VII.3.5 : Courbe granulométrique du mélange F.

Interprétation des résultats

Selon les résultats obtenus on remarque :

- Un gain important d'environ 220% au niveau de la résistance à la compression à sec et de 240% au niveau de la résistance à l'immersion ;
- Une augmentation de la compacité par rapport au témoin (mélange A) ;
- Le rapport R'/R atteint 0.77.

Cette amélioration est due à l'absorption de l'eau de constitution par la chaux qui a précipité le temps de mûrissement de l'enrobé.

VII.2.8. Mélange G (Ajout de 3% la chaux + 2% de poudrette de caoutchouc)

Toujours dans l'idée d'améliorer les caractéristiques de l'enrobé, on a jugé utile de tester la formule ci-dessous en utilisant toujours le même module de richesse ($K_3=3.75$) pour calculer la teneur en émulsion.

La formule retenue :

- Pourcentage du sable concassé 0/3 = 35 %
- Pourcentage du gravier 3/8 = 25 %
- Pourcentage du gravier 8/15 = 35 %
- Pourcentage de la chaux = 3 %
- Pourcentage du poudrette du caoutchouc = 2%

Les résultats sont représentés dans le tableau VII.3.10, et la courbe granulométrique du mélange G est représentée dans la figure VII.3.6 ci-après :

Tableau VII.3.10 : Les résultats des essais effectués sur le mélange G.

Mélange	Bitume résiduel (%)	Emulsion (%)	Compacité (%)	Résistance à sec (R) (bars)	Résistance à l'immersion (R') (bars)	Rapport R'/R
G	6.66	10.02	98.33	9	8.66	0.96

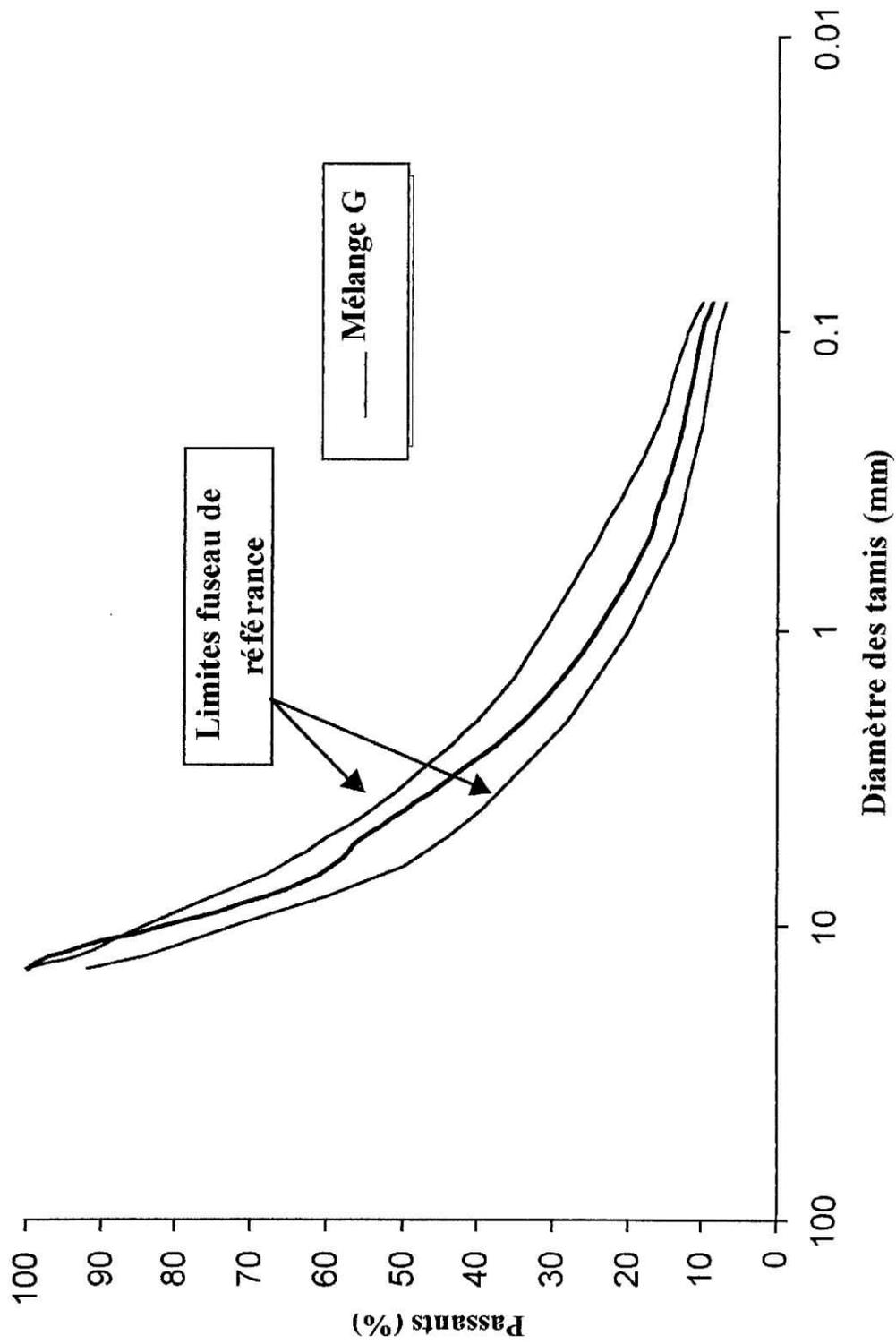


Figure VII.3.6 : Courbe granulométrique du mélange G.

Interprétation des résultats

Selon les résultats obtenus on remarque :

- ❖ Une chute au niveau des résistances R (environ 39%) et R' (environ 24%) par rapport au mélange F (ajout de 3% de chaux), cette chute peut s'expliquer par le fait que la chaux n'adhère pas bien à la poudrette de caoutchouc ce qui a causé une diminution des performances mécaniques du béton bitumineux ;
- ❖ Une nette augmentation de la compacité par rapport à celle du témoin.

VII.3.2.9. La comparaison entre les mélanges A, F et G

Les résultats sont mentionnés dans le tableau VII.3.11, et représentés sur la figure VII.3.7 ci-après :

Tableau VII.3.11 : Comparaison entre les mélanges A, F et G.

Mélange	Résistance à sec (R) (bars)	Résistance à l'immersion (R') (bars)	Compacité (%)
A (0 % d'ajout)	4.6	3.33	93.5
F (3 % de la chaux)	14.67	11.33	95.55
G(3% la chaux + 2% P.C)	9	8.66	98.33

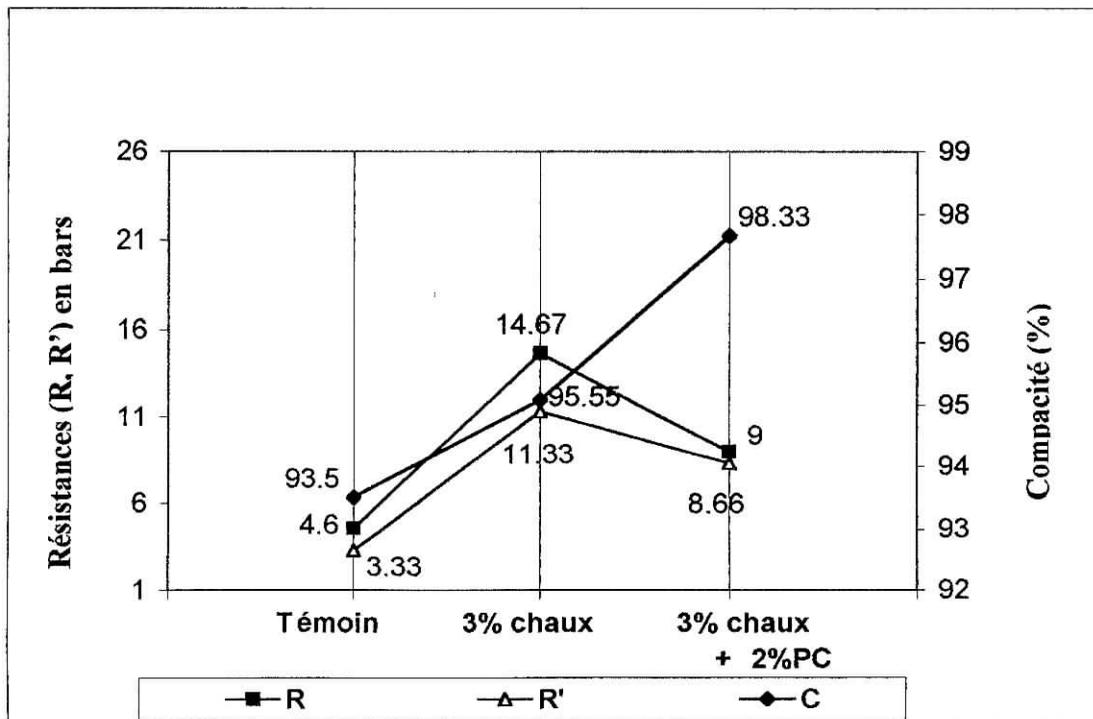


Figure VII.3.7 : Comparaison entre les mélanges A, F et G.

VII.3.2.10. Comparaison entre les mélanges A, B, C2, D, E, F et G (Figure 8)

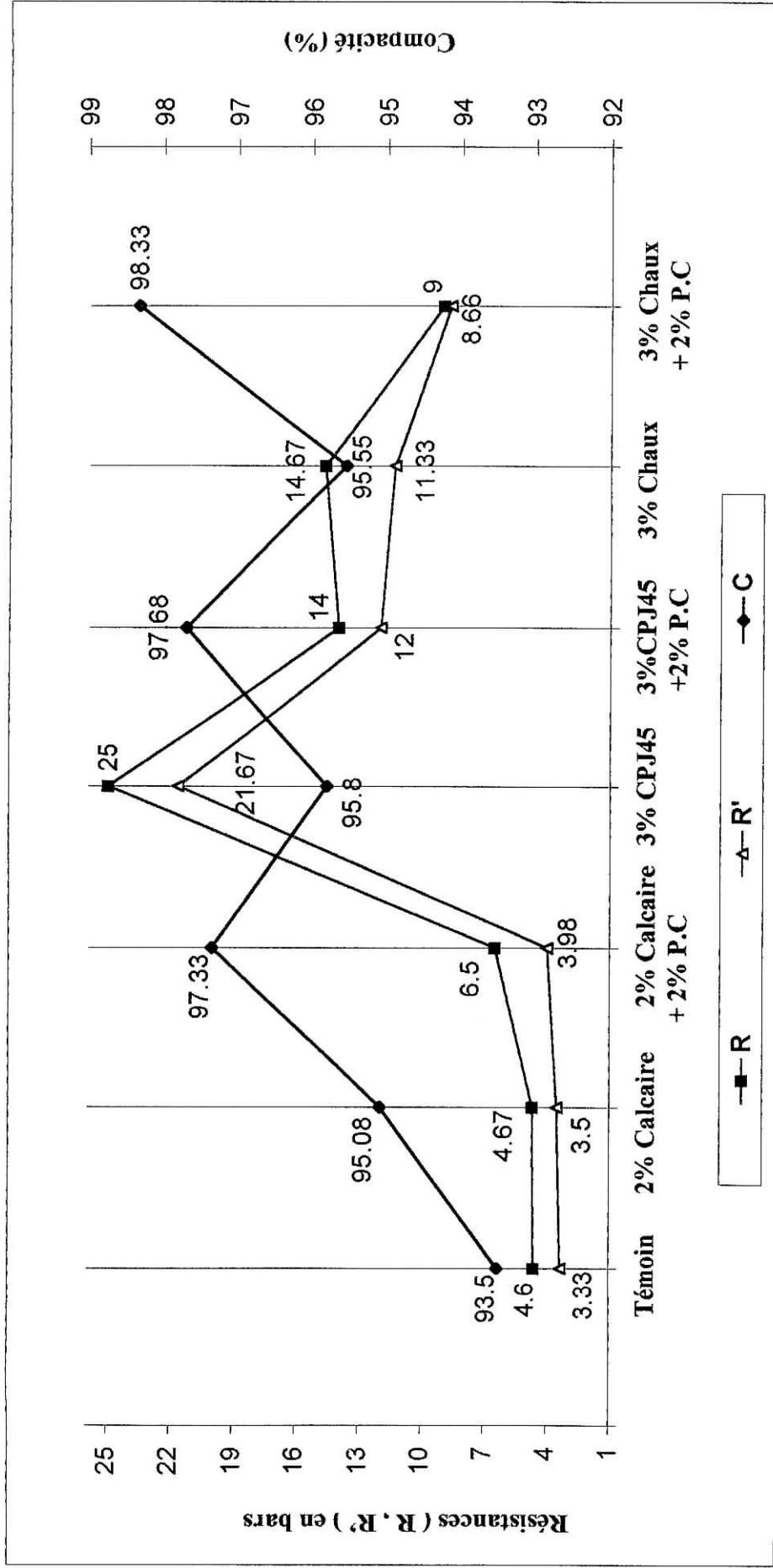


Figure VII.3.8 : Comparaison entre les mélanges A, B, C2, D, E, F et G.

VII.3.3. Conclusion

L'étude de notre béton bitumineux à froid avec l'essai DURIEZ nous a permis de montrer que :

- Les granulats d'origine basaltique posent un problème d'adhésivité avec les liants hydrocarbonés.
- L'ajout d'un apport de filler calcaire n'influe pas beaucoup sur les performances mécaniques du béton bitumineux.
- La période de maturation des éprouvettes (7 jours) est insuffisante pour un mélange sans l'utilisation de filler d'apport qui a pour rôle l'absorption l'eau emprisonnée dans l'enrobé donc anticipation du temps de maturation.
- Le ciment, par ses caractéristiques et propriétés chimiques et minéralogiques, a augmenté d'une façon importante les performances mécaniques de l'enrobé à froid.
- La chaux a amélioré les résistances R et R' d'une façon considérable grâce à son rôle d'absorbeur d'eau.

VII.4 La comparaison entre le bitume résiduel de l'émulsion et le bitume 40/50

Le but de l'essai est de déterminer les performances mécaniques du béton bitumineux en présence de bitume résiduel de l'émulsion, pour cela, on a procédé à une extraction de ce bitume résiduel, et après on a effectué un essai Marshall avec un module de richesse égal à K_3 .

VII.4.1 Mélange H (enrobé avec le bitume résiduel de l'émulsion)

La formule retenue :

- Pourcentage du sable concassé 0/3 = 40 %
- Pourcentage du gravier 3/8 = 25 %
- Pourcentage du gravier 8/15 = 35 %

Les résultats sont mentionnés dans le tableau VII.4.1 ci-après :

Tableau VII.4.1 : Comparaison entre le bitume résiduel et l'émulsion et le bitume 40/50.

Mélange	Stabilité Marshall (daN)	Fluage Marshall (1/10) mm	Compacité (%)
A (Bitume 40/50)	801	34.5	93.06
H (Bitume résiduel de l'émulsion)	493	36.5	93.50

Interprétation des résultats

Selon les résultats obtenus on remarque que :

La stabilité Marshall du mélange H (avec le bitume résiduel de l'émulsion) est inférieure de plus de 300 (daN) par rapport au mélange A (bitume 40/50), cette différence très importante est due à la qualité médiocre du bitume résiduel, ce bitume qui est à l'origine fluidifié par le kérosène, pose un problème au niveau du temps de mûrissement du béton bitumineux, ce qui justifie l'insuffisance des résultats obtenus.

Conclusion générale

Conclusion Générale

L'ajout du filler d'apport (filler calcaire, caoutchouc recyclé, CPJ45 et chaux) dans le squelette solide pour constituer un béton bitumineux à base de liants hydrocarbonés, permettrait d'obtenir un revêtement routier doté d'un comportement mécanique amélioré.

La présente étude a permis de voir l'influence de l'incorporation d'ajouts directement dans le squelette solide (mélange granulaire) sur les performances de l'enrobé. On peut tirer les conclusions suivantes :

1. L'ajout de filler calcaire dans l'enrobé a augmenté l'adhésivité liants-granulats mais cette amélioration reste insuffisante dans les deux traitements (à chaud et à froid).
2. L'ajout du CPJ45 dans le traitement à froid a donné une très importante amélioration du comportement mécanique de l'enrobé ainsi à chaud.
3. L'ajout de la chaux dans le traitement à froid a donné une amélioration des performances mécaniques du béton bitumineux mais moins importante que celle du CPJ45.
4. Le béton bitumineux présente des bonnes caractéristiques avec l'ajout de la poudrette de caoutchouc (optimum de 2 %).
5. Une augmentation de la compacité de l'enrobé grâce à l'action de la poudrette de caoutchouc constaté dans les deux traitements.
6. L'ajout de la poudrette de caoutchouc en plus du CPJ45 ou de la chaux dans l'enrobé, diminue d'une façon très importante ses performances mécaniques.

En plus de ces qualités propres à l'enrobé, l'utilisation de la poudrette de caoutchouc recyclée présente un autre aspect aussi important qui est l'impact sur l'environnement.

Dans le monde, on compte chaque année environ 900 millions de pneus usagés (tous types confondus) et dont il faut se débarrasser. Parallèlement, les estimations indiquent

une augmentation de 19% de la consommation mondiale de pneus d'ici 2005 en raison de la demande croissante de mobilité. Seuls 10% des pneus rentrent dans un système de transformation et de régénération du caoutchouc.

Donc l'utilisation du caoutchouc recyclé comme matériau routier offre en plus de l'amélioration des performances de l'enrobé bitumineux, une solution écologique pour l'élimination des déchets.

En conclusion, on peut d'ores déjà penser à exploiter les pneus usés dans notre pays pour la construction des routes et la préservation de notre environnement.

Annexes

Annexe 1 : Essai Marshall

1.1. Généralités

1.1.1. Définition et but de l'essai

L'essai Marshall a pour but de déterminer, pour un compactage donné, la stabilité et le fluage Marshall d'une éprouvette de dimensions déterminées. Il est applicable à tous les enrobés à chaud ne comportant pas de granulats de dimensions supérieures à 20 mm.

1.1.2. Principe de l'essai

- La stabilité Marshall est la valeur de la charge maximale obtenue par un essai de compression exercée suivant une génératrice de l'éprouvette cylindrique préalablement compactée.
- Le fluage Marshall est l'affaissement de cette même éprouvette au moment de la rupture par compression.

1.2. Appareillage

Un essai MARSHALL nécessite :

- des moules de compactage comportant chacun une base, un corps de moule, un hausse ; la base et la hausse s'adaptent aux deux extrémités du corps de moule.
- des pistons extracteurs de diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du moule.
- une dame de compactage comportant un marteau pesant (4536 ± 5) g . Ce marteau coulisse librement sur une tige de guidage et tombe en chute libre de (457 ± 5) mm sur la base de la dame.
- un bloc support de moule en chaîne de dimensions suivantes : largeur 300 mm, longueur 300 mm, hauteur 450 mm. Ce bloc est muni de deux boulons servant pour le calage du moule.
- des mâchoires d'écrasement, chacune étant composée de deux demi-mâchoires ayant un rayon de courbure intérieur compris entre (50,9 et 51)mm.
- un dispositif de mesure du fluage à 0,1 mm près.
- une presse à avancement moyen à vide réglée à la vitesse de $(0,85 \pm 0,1)$ mm/s, équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort au cours de l'essai.
- un bain thermostatique.

1.3. Fabrication de l'enrobé

1.3.1. Préparation des prises d'essais

Cette préparation consiste à :

- Prélever chacun des granulats entrant dans la composition de l'enrobé à partir de lots de granulats secs parfaitement homogénéisés. La quantité prélevée doit permettre de confectionner une gâchée de 6 kg de granulats.
- Préparer dans un récipient métallique, la quantité de liant nécessaire à l'enrobage de cette gâchée plus de 50 g environ, par sécurité.
- Au moment du malaxage, pour les enrobés à chaud à base de bitume pur, les températures des granulats, du bitume et du matériel sont définies comme suit :
 - L'enrobé à base de bitume 80/100: 1400°C
 - L'enrobé à base de bitume 60/70 : 1500°C
 - L'enrobé à base de bitume 40/50 : 1600°C
- Placer tous les granulats prélevés y compris le filler dans un récipient. L'ensemble devra séjourner au moins 4 heures dans une étuve à la température de malaxage définie plus haut.
- Les différents matériels, récipients, cuve de malaxeur, moules de compactage, pistons doivent être mis à la même température et cela s'effectue par un séjour minimal de 2 heures à l'étuve.
- Effectuer le chauffage du liant à la température de la mise en oeuvre.

1.3.2. Malaxage

- Verser la quantité nécessaire du liant dans le récipient des granulats puis mettre tout le mélange dans la cuve du malaxeur. Cette cuve est centrée sur le malaxeur.
- La durée du malaxage n'est pas imposée l'apprécier visuellement jusqu'à homogénéisation correcte.

1.3.3. Remplissage des moules et compactage

Le remplissage des moules s'effectue comme suit :

- Sortir de l'étuve les moules de compactage et les graisser.
- Effectuer les pesées du mélange correspondant au poids d'une éprouvette.
- Introduire cette quantité d'enrobé dans un moule en une seule fois, après avoir déposé au fond de ce moule un disque en papier (afin de numérotter l'éprouvette).

- Pour assurer un bon état de surface latérale de l'éprouvette et pour éviter une dispersion trop grande des résultats, introduire la spatule (chauffée préalablement à la température de malaxage) le long de la paroi du moule et effectuer environ trente fois un mouvement de haut en bas, en décrivant trois fois le tour et ceci sur toute la hauteur de l'enrobé.
- Assurer le surfaçage supérieur à l'aide du piston extracteur chaud, en faisant pivoter celui-ci trois ou quatre fois au contact de l'enrobé.
- La dame étant maintenue perpendiculairement au moule, le mélange est compacté en appliquant 50 coups de marteau de la dame en (55 ± 5) secondes. Le moule est retourné après avoir retiré la hausse afin de présenter la face inférieure de l'éprouvette au compactage.

L'opération précédente est renouvelée.

- La durée de compactage ne doit pas excéder 3 min.
- Le moule est placé pendant au moins 15 min, sous un jet circulaire d'eau froide maintenu de telle façon qu'il ne mouille pas l'éprouvette. Le moule est conservé pendant une (1) heure au moins à une température ambiante (150°C à 25°C) avant démoulage.

Le démoulage est effectué en faisant passer l'éprouvette du moule dans la hausse à l'aide d'un piston extracteur.

1.3.4. Mode opératoire

- Après démoulage, les éprouvettes sont pesées à 1 g près. Les dimensions des éprouvettes sont mesurées à 0,1 mm près, en trois zones différentes.
- La masse volumique apparente MVA est calculée à partir des mesures géométriques. On effectue les pesées hydrostatiques pour déterminer la masse volumique apparente. Si la MVA d'une éprouvette s'éloigne de la masse volumique apparente moyenne des éprouvettes de $\pm 2\%$ la série est rejetée. Pour chaque éprouvette la moyenne des mesures de hauteur doit être comprise entre (62,5 et 65) mm avec une tolérance pour chaque mesure de $\pm 1,5$ mm par rapport à la moyenne, sinon la série est rejetée.
- Les éprouvettes sont conservées 5 heures au moins à température ambiante après le compactage.
- Les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement sont immergées dans l'eau à $(60 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ pendant (30 ± 1) min.
- Les éprouvettes sont placées dans les mâchoires d'écrasement. L'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression. La vitesse du plateau de l'essai est réglée à $(0,85 \pm 0,1)$ mm/s. Ces opérations doivent être réalisées au moins d'une minute.
- La stabilité Marshall est la valeur maximale de l'effort à la rupture de l'éprouvette.

- Le fluage Marshall est la valeur de l'affaissement de l'éprouvette, selon son diamètre vertical au moment de la rupture.

1.3.5. Expression des résultats

$$MVR_g = \frac{100}{\frac{P_1}{MVR_1} + \frac{P_2}{MVR_2} + \dots + \frac{P_n}{MVR_n}}$$

MVR_g : masse volumique réelle du mélange granulaire.

P_i : pourcentage en poids des différentes fractions du mélange.

MVR_{gi} : masse volumique réelle des différentes fractions du mélange.

$$MVR = \frac{100 + P_1}{\frac{100}{MVR_g} + \frac{P_1}{MVR_1}}$$

MVR : masse volumique réelle de l'enrobé.

P₁ : pourcentage en poids du liant.

MVR₁ : masse volumique réelle du liant.

$$C = 100 \times \frac{MVA}{MVR} \quad C : \text{compacité de l'éprouvette.}$$

$$V_R = 100 - C$$

V_R : pourcentage des vides.

$$MVA_g = MVA \times \left[1 - \frac{P_1}{100 + P_1} \right]$$

MVA_g : masse volumique apparente du granulat dans l'éprouvette.

- La stabilité Marshall est exprimée en décanewtons (daN).
- Le fluage Marshall est exprimé en dixièmes de millimètre (1/10 mm).



Figure 1 : Etuve



Figure 2: Moule Marshall

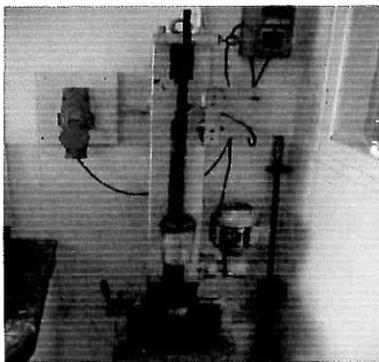


Figure 3 : Dame de compactage

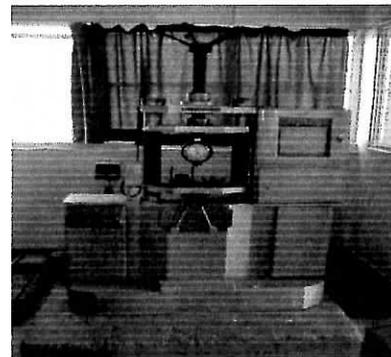


Figure 4: Presse d'écrasement Marshall



Figure 5: Malaxeur

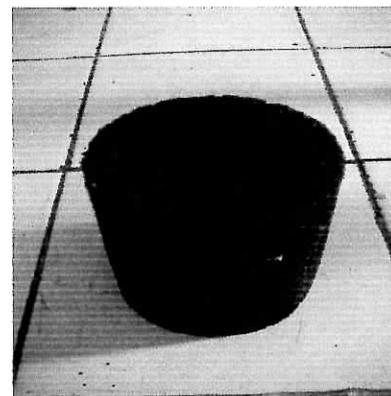


Figure 6: Eprouvette Marshall

Annexe 2 : Essai DURIEZ

1. Essai DURIEZ sur mélanges hydrocarbonés à froid à l'émulsion

Le but de l'essai Duriez est de caractériser les qualités de résistances mécaniques et de résistance au désenrobage par l'eau, dans le cas de matériaux enrobés classiques, les résultats de l'essai Duriez suffisent à eux à caractériser convenablement la qualité du matériau, dans d'autres cas, on pourra avoir avantage à les compléter par les résultats d'autres essais (Essai Hubbard Field pour les matériaux fins, et l'essai Marshall pour les matériaux à base de granulats ronds ou très anguleux).

L'essai Duriez diffère de l'essai Marshall dans la température de l'essai qui est de 18°C au lieu de 60°C, il lui diffère aussi dans le mode d'application de la charge qui est axial alors qu'il était radiale pour l'essai Marshall.

2. Principe de l'essai

Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai sont fabriquées par compactage statique à double effet. Deux éprouvettes sont destinées à la mesure de la masse volumique par pesée hydrostatique pour calculer le pourcentage de vides.

Les autres éprouvettes sont soumises à l'essai de compression après conservation dans des conditions définies : à l'air pour certaines éprouvettes, en immersion pour d'autres.

L'essai se pratique généralement à 18°C, cependant il peut être aussi réalisé à trois températures : à 0°C, à 18°C et à 50°C, pour permettre d'appréhender une forme de susceptibilité thermique du mélange hydrocarboné.

3. Appareillage

3.1. Appareillage spécifique

Moules et pistons

- Mélanges hydrocarbonés de $D < 14$ mm (Figure 1)

Un minimum de 12 moules métalliques cylindriques de diamètre intérieur (80 ± 0.1 mm) et de hauteur minimale 190 mm. Des pistons de diamètre extérieur (79.8 ± 0.05 mm).

- Mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14$ mm

Un minimum de 10 moules métalliques cylindriques de diamètre intérieur (120 ± 0.1 mm) et de hauteur minimale 270 mm. Des pistons de diamètre extérieur (119.8 ± 0.05 mm).

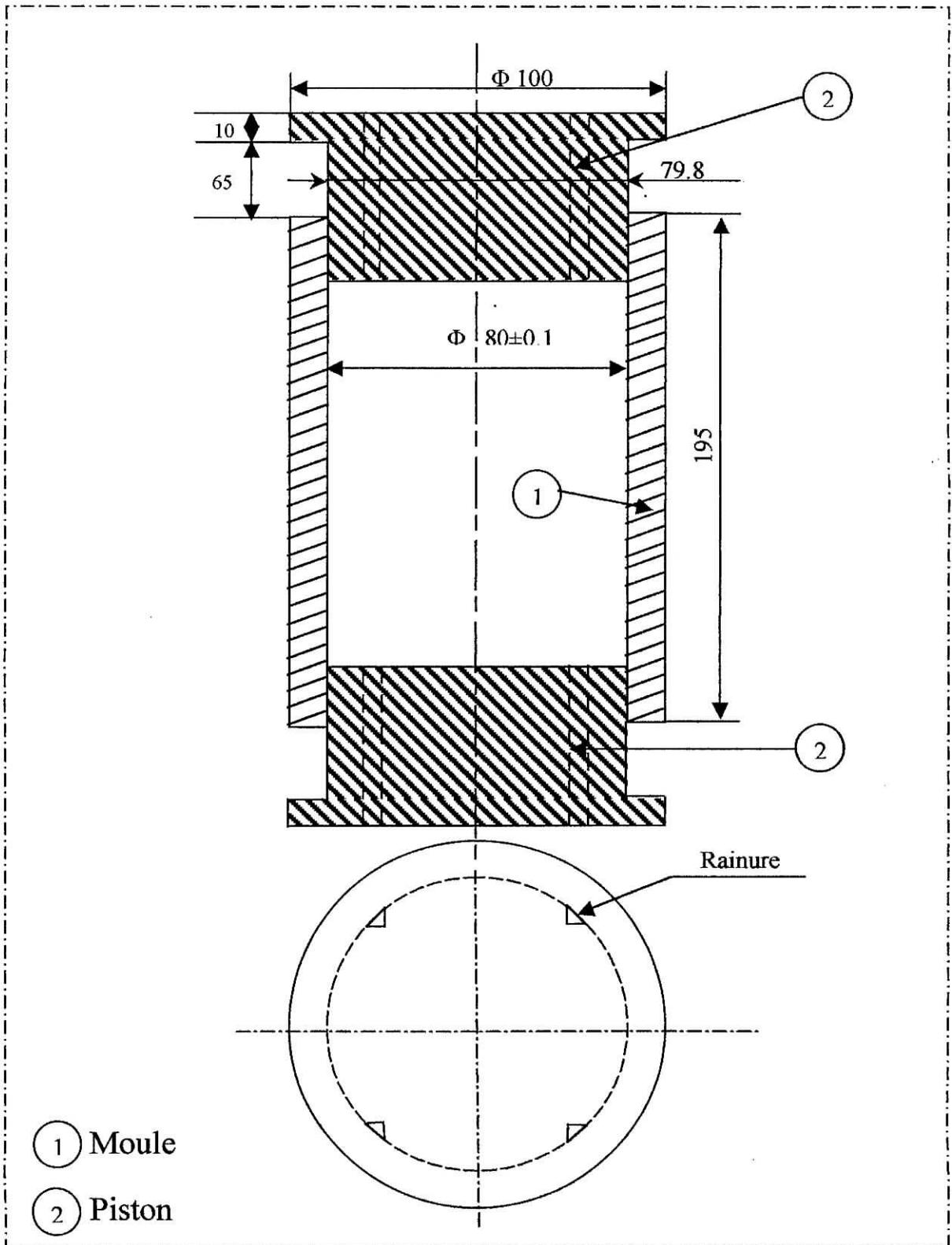


Figure 1: Moule 80 et piston enrobés à froid à l'émulsion de bitume

Les pistons comportent des rainures de 1 mm de profondeur et de 2 mm de large suivant quatre génératrices à 90° pour évacuer l'eau pendant le compactage.

3.2. Appareillage non spécifique

Presses

- Une presse permettant le compactage à double effet et le maintien :
 - d'une charge de $120 \text{ KN} \pm 0.5 \%$ pendant 5 min pour les mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14 \text{ mm}$.
 - d'une charge de $60 \text{ KN} \pm 0.5 \%$ pendant 5 min pour les mélanges hydrocarbonés de $D < 14 \text{ mm}$.
- Une presse à vitesse d'avancement moyen à vide réglé à la valeur de $(1 \pm 0.1 \text{ mm/s})$, équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort en cours d'essai d'exactitude relative $\pm 0.1 \%$.

4. préparation des éprouvettes

Le mélange hydrocarboné doit être fabriqué en une seule fois pour les mélanges de $D < 14 \text{ mm}$ et peut être fabriqué en deux fois pour les autres mélanges selon la norme NF P 98-250-1 « Fabrication des mélanges hydrocarbonés en laboratoire ».

4.1. Remplissage des moules

Les prélèvements ont les masses suivantes :

- $1000 (1 + W) \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D < 14 \text{ mm}$.
- $3500 (1 + W) \text{ g} \pm 3.5 \text{ g}$ dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14 \text{ mm}$.

Le prélèvement est introduit en une seule fois dans le moule, au moins 15 min et au plus 1h après la fin du malaxage.

4.2. Compactage des éprouvettes

Le compactage des éprouvettes doit être réalisé par double effet. La charge appliquée :

- ✓ Pour les mélanges hydrocarbonés de $D < 14 \text{ mm}$: $60 \text{ KN} \pm 0.5 \%$.
- ✓ Pour les mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14 \text{ mm}$: $120 \text{ KN} \pm 0.5 \%$.

La charge doit être atteinte en 60 s maximum et maintenue entre 300 et 305 s. Au bout de ce temps, l'application de la charge est interrompue.

Les éprouvettes sont démoulées entre 12 et 24 h après confection soit le jour (J +1).

5. Mode opératoire

5.1. Vérification des éprouvettes

Après démoulage, les éprouvettes numérotées sont pesées à 1g près après essuyage rapide soit M_{J+1} .

5.2. Maturation des éprouvettes

Les éprouvettes sont conservées pendant 7_j à 18°C et à $50 \pm 10 \%$ d'humidité relative. Au jour $J+8$, les éprouvettes sont pesées à 1g près, soit M_{J+8} .

La hauteur et le diamètre sont mesurés à 0.1 mm près sur trois zones différentes. On calcule la masse volumique apparente (MVa) de l'éprouvette par mesures géométriques, si elle s'éloigne de la moyenne de $\pm 2 \%$ elle est rejetée. Et si la MVa de plus de deux éprouvettes s'en éloigne, la série complète est rejetée.

5.2.1. Répartition des éprouvettes

A partir des masses volumiques apparentes géométriques mesurées pour chaque température d'essai, les éprouvettes sont réparties en trois lots homogènes d'éprouvettes. La MVa moyenne de chaque lot doit être la plus proche possible de la MVa moyenne de la totalité des éprouvettes.

- deux éprouvettes sont destinées à la mesure des masses volumiques apparentes hydrostatiques.
- cinq éprouvettes sont destinées à la conservation sans immersion dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D < 14 \text{ mm}$, quatre dans le cas de ceux de $D \geq 14 \text{ mm}$.
- les éprouvettes restantes sont destinées à la conservation en immersion pour les essais à 18 et 50°C .

5.2.2. Conservation des éprouvettes

a. Conservation sans immersion

J étant le jour de confection des éprouvettes, on commence la conservation sans immersion au jour $J+8$.

- Essai à 18°C :

Les éprouvettes sont conservées à $(18 \pm 1^\circ\text{C})$ et dans une ambiance à $(50 \pm 10 \%)$ d'humidité relative pendant 7_j .

- Essai à 50°C :

Les éprouvettes sont conservées à $(18 \pm 1^\circ\text{C})$ et dans une ambiance à $(50 \pm 10 \%)$ d'humidité relative pendant 6_j . Les éprouvettes sont ensuite conservées à $(50 \pm 1^\circ\text{C})$ et dans une ambiance à $(50 \pm 10 \%)$ d'humidité relative pendant 24h.

b. Conservation avec immersion

- Essai à 18°C :

A partir de $J+8$, les éprouvettes sont immergées dans de l'eau à $(18 \pm 1^\circ\text{C})$ pendant 7_j .

- Essai à 50°C :

A partir de $J+8$, les éprouvettes sont immergées dans de l'eau à $(18 \pm 1^\circ\text{C})$ pendant 6_j . Elles sont ensuite immergées dans de l'eau à $(50 \pm 1^\circ\text{C})$ pendant 24h.

- Masse des éprouvettes :

Quelle que soit la température de l'essai, les éprouvettes sont pesées au gramme près après essuyage rapide. La masse moyenne des «éprouvettes conservées à sec est appelée M_{J+15} et celle des éprouvettes conservées en immersion est appelée M_{J+15}^i .

5.3. Essai de compression simple

Au jour J+15, les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression, qu'elles aient été conservées avec ou sans immersion.

La vitesse du plateau de la presse est réglée à $(1 \pm 0.1 \text{ mm/s})$. la résistance à la compression simple est déterminée à partir de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette d'essai.

6. Expression des résultats

6.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression simple à une température donnée, avec ou sans immersion, est le rapport de la charge maximale à la section circulaire des éprouvettes. Elle est exprimée en MPa et représente la moyenne de 4 ou 5 mesures suivant la dimension D du mélange hydrocarboné soumis à l'essai.

On établit également le rapport de la résistance avec immersion (r) à la résistance sans immersion (R) ; le rapport r/R est exprimée avec deux chiffres significatifs.

6.2. Calcul des teneurs en eau

a) Abréviations

Les masses sont mesurées en grammes, et les teneurs en eau en %.

W : Teneur en eau totale.

W_{J+K} (K= 1 à 15) : Teneur en eau des éprouvettes.

W'_{J+15} : Teneur en eau des éprouvettes conservées en immersion après maturation.

M_0 : Masse sèche des éprouvettes.

M_{J+1} : Masse des éprouvettes au démoulage.

M_{J+8} : Masse des éprouvettes après maturation.

M_{J+15} : Masse des éprouvettes après maturation et conservation à sec.

M'_{J+15} : Masse des éprouvettes après maturation et conservation en immersion.

\bar{M} : Valeur de la moyenne arithmétique.

b) Formules

- W_{J+K} (K= 1 à 15) : Teneur en eau des éprouvettes.

$$W_{J+K} = 100 \times \left(\frac{M_{J+K} - M_0}{M_0} \right)$$

- W'_{J+15} : Teneur en eau des éprouvettes conservées en immersion après maturation.

$$W'_{J+15} = 100 \times \left(\frac{M_{J+15} - M_0}{M_0} \right)$$

- Teneur en eau au démoulage :

$$W_{J+1} = 100 \times \left(\frac{\overline{M}_{J+1} - \overline{M}_0}{\overline{M}_0} \right)$$

- Teneur en eau après 7j de maturation :

$$W_{J+8} = \left(\frac{\overline{M}_{J+8} - \overline{M}_0}{\overline{M}_0} \right) \times 100$$

- Teneur en eau après 7j de maturation et 7j de conservation à sec :

$$W_{J+15} = \left(\frac{\overline{M}_{J+15} - \overline{M}_0}{\overline{M}_0} \right) \times 100$$

- Teneur en eau après 7j de maturation et 7j de conservation en immersion :

$$W_{J+15} = \left(\frac{\overline{M}'_{J+15} - \overline{M}_0}{\overline{M}_0} \right) \times 100$$

6.3. Calcul du pourcentage de vides

a) Abréviation

TL : Teneur en liant (masse de liant résiduel, multipliée par 100, rapportée à la masse de granulats secs).

MV_a : Masse volumique apparente de l'éprouvette par mesures géométriques, en g/cm³.

MV_A : Masse volumique apparente de l'éprouvette par pesée hydrostatique, en g/cm³.

MV_{Ag} : Masse volumique apparente des granulats, en g/cm³.

MVR : Masse volumique réelle du mélange hydrocarboné, en g/cm³.

v (%) : Pourcentage des vides.

v_o (%) : Pourcentage des vides occupés par l'air et le liant.

VL (%) : Pourcentage des vides comblés par le liant.

b) Formules

- Pourcentage de vides :

$$v\% = 100 \times \left(1 - \frac{MVA}{MVR} \right)$$

- Masse volumique apparente du granulat dans l'éprouvette, soit MVA_g :

$$MVA_g = MVA \times \left(1 - \frac{TL}{100 + TL} \right)$$

- Pourcentage des vides occupés par l'air et le liant, soit $v_o\%$:

$$v_o\% = 100 \times \left(\frac{MVR_g - MVA_g}{MVR_g} \right)$$

- Pourcentage des vides des granulats comblés par le liant, soit VL :

$$VL\% = 100 \times \left(\frac{v_o\% - v\%}{v_o\%} \right)$$

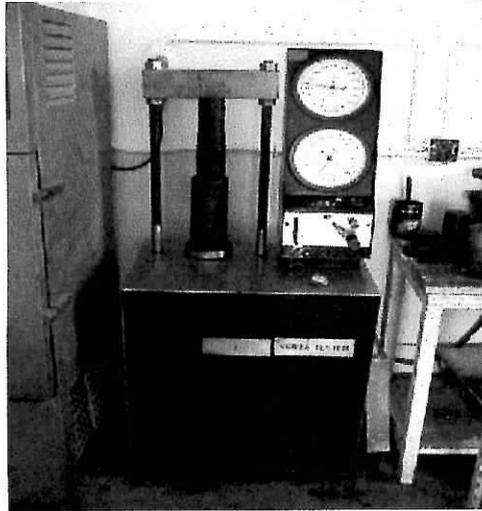


Figure 2 : Presse de compactage, de démoulage et d'écrasement Duriez.



Figure 3 : Moule Duriez.



Figure 4 : Epreuve Duriez.



Figure 5 : Conservateur d'éprouvettes Duriez à 18°C.

Annexe 3 : Essai au Bleu de méthylène

3.1. Objectif de l'essai

Cet essai permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains argileux.

3.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à fixer sur les grains d'argile des molécules de bleu de méthylène et par un test simple, on évalue la quantité de bleu fixée.

3.3. Equipement nécessaire

- Une balance de portée suffisante et d'une précision relative de 0.1%.
- Un chronomètre au 1/10 de seconde.
- Un tamis de maille carrée d'ouverture 5 mm.
- Un bûcher en plastique ou en verre de un (01) litre.
- Un agitateur à ailettes de 70 à 80 mm de diamètre et de vitesse de rotation de 400 à 500 tr/mn minimum.
- Burette de 50 ml, ou une burette automatique graduée au 1/10 ml.
- Papier filtre sans cendre (< 0.010) de 95 g/m² de poids, 0.2 mm d'épaisseur, 75 de vitesse de filtration et 8 µm de rétention.
- Solution de bleu de méthylène de qualité médicinale à (10 ± 0.1) g.
- Baguette de verre de 8 mm de diamètre et 300 mm environ de longueur.
- Eau déminéralisée ou distillée.

3.4. Conduite de l'essai

3.4.1. Préparation de l'échantillon

On prépare 30 g de la fraction granulométrique 0/5 mm du matériau sec (car ce sont principalement les plus fins (< 2 mm) qui contiennent la fraction argileuse). Cette fraction sera trempée dans 200 ml d'eau distillée et le tout est maintenu en agitation permanente au de l'agitateur à ailettes.

3.4.2. Test de la tache

Il consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension de sol jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile et le test de la tache permet de repérer l'instant de cette maturation.

Pour cela, on prélève une goutte de liquide dans le Bêcher contenant le sol imbibé de bleu de méthylène et on dépose celle-ci sur le papier filtre (diamètre de dépôt compris entre 8 et 12 mm). Deux cas sont possibles :

- ❖ La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide incolore : le test est négatif.
- ❖ La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide teintée de bleu de méthylène : le test est positif.

Tableau 1 : Procédure de l'essai de bleu de méthylène.

Cinématique du dosage	Commentaires
1. Ajout de 5 cm ³ de bleu.	Addition du bleu de méthylène par pas grossier (5 cm ³) suivi du test immédiat de la tache.
2. Test immédiat de la tache : - Si test négatif, retour en 1. - Si test positif, aller en 3.	
3. Ajout de 2 cm ³ de bleu.	Au premier test immédiat positif, ajout de bleu par pas fin (2 cm ³) suivi du test immédiat de la tache.
4. Test immédiat de la tache : - Si test négatif, retour en 3. - Si test positif, aller en 5.	
5. Effectuer cinq fois la confirmation du test toutes les minutes pendant : - Si test négatif, retour en 3 - Si test positif, fin du dosage.	Confirmation du test positif pendant cinq minutes.

Valeur de bleu V_{BS} : $V_{BS} = n / M$.

- n : volume (en ml) de solution de bleu utilisée jusqu'à obtention du test positif.

- M : masse sèche de la prise d'essai (en g).

Bibliographie

- [1]- **J.ARRAMBIDE, M.DURIEZ**, Nouveau traité de matériaux de construction, Tome3, Liants et bétons hydrocarbonés, DUNOD 1962.
- [2]- **R.COQUAND**, Routes, EYROLLES 1965.
- [3]- **G.JEUFFROY**, Conception et construction des chaussées, EYROLLES 1985.
- [4]- **J.G.MALLOUK**, Les enrobés bitumineux, MODULO 1982.
- [5]- **Groupe de chercheurs**, Les émulsions de bitume bulletin du laboratoire des Ponts et Chaussées, juin 1974.
- [6]- **Laboratoire Central des Ponts et Chaussées**, Guide technique : emploi des liants bitumineux modifiés, des bitumes spéciaux et des bitumes avec additifs en technique routière, N° 303, III 1999.
- [7]- **Revue générale des routes (n°788)**, Béton bitumineux à froid. Octobre 2000.
- [8]- **Direction des Routes .CTTP**. Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud. Novembre 2000.
- [9]- **Mme. AIT MOKHTAR**, Influence de l'affinité liant hydrocarboné granulat sur les caractéristiques des mélanges hydrocarbonés, Thèse de magister en Génie Civil, ENP 1994.
- [10]- **A. BABA ALI, A.BOUKEMIDJA**, Sable émulsion étude et formulation, Projet de fin d'études en Génie Civil, ENP juillet 2002.
- [11]- **J. STEUTERAERT**, code de bonne pratique pour la formulation, des enrobés bitumineux denses. Centre de recherche routière. CRR 16/87.
- [12]- **Claude REGIS**, cours de routes : assises de chaussées presses de l'ECOLE Nationale des Ponts et Chaussées, 1985.
- [13]- **G.ARQUIE, J.C.ROUDE**, Routes, E.N.T.P.E.
- [14]- Les émulsions de bitume, Généralités et applications, Syndicat des fabricants d'émulsion routière. Paris, 1988.
- [15]- Service d'étude technique des routes et des autoroutes, n°9, Enrobés coulés à froid. Avril 1985.
- [16]- **Revue générale des routes, n°788**, Béton bitumineux à froid. Octobre 2000.