

M0034/04B

REPUBLIQUE ALGERINNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
LABORATOIRE CONSTRUCTION ET ENVIRONNEMENT**

MEMOIRE DE MAGISTER

Présenté par :

Mr. BRARA Ali
Ingénieur d'état en Génie Civil de l'E.N.P.

Thème

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DU
COMPORTEMENT D'UN BETON
BITUMINEUX MODIFIÉ À LA POUDRETTE
DE CAOUTCHOUC**

Soutenu publiquement le 28/04/2004 devant le jury composé de :

Président	: Mr. BALI A.	Professeur, ENP
Rapporteur	: Mme. KETTAB R.	Chargée de cours, ENP
Examineurs	: Mr. SILHADI K.	Maître de conférence, ENP
	: Mme. MORSLI M.	Chargée de cours, ENP
	: Mr. BOUTEMEUR R.	Chargé de cours, ENP
Invités	: Mr. HADDADI S.	Chargé de cours, USTHB
	: Mr. BOUKERROU A.	Chef Laboratoire, CTPP

Laboratoire Construction et Environnement
École Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassan Badi, El Harrach, Alger

تتمحور دراستنا هذه حول تأثير إضافة المسحوق المطاطي إلى الخرسانة الزفتية. المسحوق يضاف مباشرة داخل الخليط

من أجل إنجاز هذه الدراسة استعملنا مواد من محجرتين مختلفتين (رأس جنات و جوبير) من جهة و صنفين من الزفت (50/35 و 100/70) من جهة أخرى

مردود المخلطات تم قياسه باستعمال تجارب مارشال و دوريز إضافة إلى الزحف السكوني وحيد الاتجاه. النتائج المحصل عليها بعد إخضاع المخلطات للتجربة تظهر تحسن ملحوظ مقارنة بالخرسانة العادية هذه النتائج يمكنها أن تساهم في تطوير مناهج قياس الطرق. كلمات المفتاح : خرسانة زفتية ، الزفت ، المقاومة ، الزحف ، الكثافة.

Résumé

Notre étude porte sur l'effet de l'addition de la poudrette de caoutchouc dans un enrobé bitumineux. La poudrette de caoutchouc est incorporée directement dans le mélange granulaire comme ajout (additif) en proportion à la quantité d'agrégats.

Pour effectuer notre étude, nous avons fait varier le type de granulats (ceux de cap djinet et ceux de la carrière Jobert) et le type de bitume (35/50 et 70/100) .

Le comportement du mélange est évalué à l'aide des essais classiques (Marshall et Duriez) et d'un essai spécifique qui est le fluage statique uniaxial.

Les résultats obtenus avec les enrobés testés ont montré un réel avantage par rapport à l'enrobé traditionnel, ces résultats peuvent contribuer à la réduction de l'épaisseur des couches lors de l'application des méthodes de dimensionnement des chaussées.

Mots clés : Béton bitumineux, Bitume, Granulats, Stabilité, Fluage, Compacité

Abstract :

Our study investigates the effects of addition of crumb tyre rubber in asphalt concrete mixtures. The crumb tyre rubber is inserted in the mixture as an aggregate portion.

To realize our study, we employed two types of aggregates (from cap djinet and from jobert), and two types of bitumen (35/50 and 70/100 classes).

The mixture performance is evaluated by classical tests (Marshall and Duriez) and the uniaxial static creep test.

The results obtained with the experimental mixture show advantages compared to the conventional mixture. This results can contribute to the improvement of the pavements dimensioning methods.

Key's words: Bituminous concrete, bitumen, Aggregates, Stability, Creep, Compacity.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Madame R. KETTAB, chargée de cours à l'ENP pour m'avoir proposé le sujet et qui m'a guidé, orienté et encouragé tout le long de la période de préparation de ce mémoire.

Ma reconnaissance va également à Monsieur le Professeur A. BALI pour m'avoir accueilli dans son Laboratoire, et de m'avoir prodigué des conseils et des encouragements .

Je le remercie vivement de me faire honneur de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

Je remercie également Monsieur K. SILHADI, Maître de conférence à l'ENP qui me fait l'honneur de faire partie de ce jury et enrichir ce travail.

J'adresse mes sincères remerciement à Madame M. MORSLI, Chargée de cours à l'ENP qui a bien voulu faire partie de ce jury et enrichir ce travail vu son expérience dans le domaine de la géotechnique routière.

Mes remerciements s'adressent également à monsieur R. BOUTEMEUR, chargé de cours à l'ENP d'avoir accepté de contribuer à l'enrichissement de ce travail, en faisant partie du jury.

J'adresse mes remerciements à Monsieur S.HADDADI, Chargé de cours à L'USTHB d'avoir accepté d'amener sa contribution fructueuse à la discussion des résultats de ce travail et du sujet en général vue ses nombreux travaux effectués sur les enrobés bitumineux.

Je tiens aussi, à remercier Monsieur A., BOUKERROU, chef Laboratoire au CTP pour ses conseils et orientations ; et qui me fait l'honneur de faire partie du jury examinant ce mémoire

Mes remerciements s'adressent au personnel du Laboratoire central de la SONATRO et toute l'équipe de M. BEDRICI et M. DJAADI pour m'avoir permis de réaliser la majeure partie du travail expérimental au sein de leur Laboratoire.

Je remercie aussi le personnel du LCTP et notamment MM BENSAIBI et ATK qui m'ont aidé à réaliser une partie de ce travail

Mes remerciements vont également au personnel du Laboratoire Routes et Aéroports de la faculté Génie Civil de l'USTHB et surtout MM N. LARADI, S. HADDADI et K. BENSEBAA de m'avoir permis de réaliser une partie de ce travail et de m'avoir guidé, orienté et accueilli dans leur laboratoire

Je remercie à l'occasion le Dr. A^{ed} BRARA pour ces conseils, encouragements et recommandations.

Enfin, mes remerciements s'adressent à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

PARTIE A : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I: ETUDE DU COMPORTEMENT DES ENROBES

I.1-GENERALITES SUR LES ENROBES BITUMINEUX.....	03
I.1.1-Définition.....	03
I.1.2-Constituants d'un enrobé bitumineux	03
I.1.2.1 -Les bitumes	03
I.1.2.2-Les granulats.....	03
I.1.2.3-Les fines d'apport.....	06
I.1.2.4 -Les dopes d'adhésivité.....	06
I.1.3-Classification des enrobés bitumineux.....	06
I.1.3.1 -D'après le mode de fabrication	07
I.1.3.2 -D'après la compacité.....	07
I.1.4-Utilisation des enrobés bitumineux en technique routière	08
I.1.5-Qualités exigées d'un enrobé bitumineux.....	09
I.1.5.1-La stabilité	09
I.1.5.2-La flexibilité	09
I.1.5.3-L'insensibilité à l'eau.....	09
 I.2-FORMULATION DES ENROBES BITUMINEUX	 10
I.2.1-Introduction	10
I.2.2-Critères de formulation	10
I.2.3-Méthodologie de formulation d'un béton bitumineux.....	10
I.2.3.1-Composition granulométrique	11
I.2.3.2-Teneur en liant.....	12
I.2.3.3-Caractéristiques de l'enrobé.....	13
 I.3-LES ESSAIS MÉCANIQUE DES ENROBÉS	 16
I.3.1-Essais Classiques.....	17
I.3.1.1-Essai duriez.....	17
I.3.1.2-Essai Marshall.....	17
I.3.2-Essais spécifiques.....	19
I.3.2.1-Essai de fluage statique uniaxial.....	19
I.3.2.2-Essai du module complexe	19
I.3.2.3-Essai de fatigue.....	21
I.3.2.4-Essai d'orniérage	22
I.3.2.5-Essai de fluage dynamique	24
I.3.2.6-Essai de la presse à cisaillement giratoire.....	25
I.3.2.7-Essai de traction directe.....	26

CHAPITRE II : LES LIANTS HYDROCARBONES

II.1-Introduction	27
II.2-LES BITUMES.....	27
II.2.1- Bitumes purs :	27
II.2.2- Bitumes oxydés (soufflés):	27
II.2.3- Bitumes fluidités (cut-backs):	27
II.2.4- Bitumes fluxés :	28
II.2.5- Bitumes composés :	28
II.2.6- bitumes modifiés :	28
II.2.7- bitumes spéciaux :	28
II.3-LES ÉMULSIONS DE BITUME.....	28
II.4-LES GOUDRONS.....	29
II.5-ORIGINE DU BITUME.....	29
II.5.1- bitumes naturels.....	29
II.5.2- Bitumes artificiels.....	29
II.6-FABRICATION DU BITUME.....	30
II.6.1- Distillation atmosphérique :	31
II.6.2- Traitement du résidu atmosphérique :	31
II.7-CLASSIFICATION DES BITUMES	34
II.8-IDENTIFICATION DES BITUMES.....	34
II.8.1- pénétrabilité à l'aiguille	35
II.8.2- température de ramollissement bille et anneau.....	35
II.8.3- Essai de fragilité FRAASS.....	36
II.8.4- Mesure de la densité relative a 25° C :	36
II.8.5- Perte de masse au chauffage	36
II.8.6- Essai de ductilité	36
II.8.7- Point d'éclair- Point de flamme	36
II.8.8- Essais de vieillissement :	37

CHAPITRE III: EMPLOI D'ADDITIFS DANS LES ENROBES HYDROCARBONES

III.1- HISTORIQUE DES ENROBES MODIFIÉS.....	38
III.1.1-Les premiers pas dans les enrobés bitumineux.....	38
III.1.2-Période de l'essor effectif.....	38
III.1.3-Les nouvelles techniques routières avec liants modifiés et additifs.....	38

III.2- L'OBJECTIF RECHERCHÉ.....	39
III.3- EMPLOI D'ADDITIFS DANS LES ENROBÉS BITUMINEUX	40
III.3.1- Les différents additifs	40
III.3.2- Addition de polymère en centrale.....	40
III.3.3- Matières plastiques recyclées	41
III.3.4- les granulats de caoutchouc.....	41
III.3.5- Les fibres.....	42
III.3.5.1-Les Fibres naturelles	42
III.3.5.1-Les Fibres naturelles.....	42
III.3.6- Bitumes et asphaltes naturels.....	42
III.3.7- Les effets de l'adjonction des additifs (déchets recyclés) au béton bitumineux (Mécanisme de la modification)	43
III.3.8- Autres techniques pour modifier un béton bitumineux	44
III.3.8.1- bitumes modifiés	44
III.3.8.2- bitumes spéciaux.....	44

PARTIE B : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV : IDENTIFICATION DES MATERIAUX

IV.1-INTRODUCTION.....	45
IV.2-DÉFINITIONS ET APPELS THÉORIQUES.....	45
IV.2.1- Teneur en liant (Pl)	45
IV.2.2- coefficient correcteur (α)	45
IV.2.3- Surface spécifique conventionnelle (Σ)	46
IV.2.4- Module de richesse (k)	46
IV.3-PRÉSENTATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS.....	46
IV.3.1-Les bitumes.....	46
IV.3.1.1-Prélèvement	46
IV.3.1.2-Essais de caractérisation.....	47
IV.3.2-Les matériaux granulaires	49
IV.3.2.1-Prélèvement	49
IV.3.2.2-Essais de caractérisation.....	49
IV.3.3-L'additif :Poudrette de caoutchouc... ..	58

CHAPITRE V: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

V.1- L'OBJECTIF DU TRAVAIL.....	59
V.2- DESCRIPTION DES ESSAIS CLASSIQUES.....	60

V.3- PREMIÈRE SÉRIE D'ESSAIS.....	65
V.3.1- Résultats de l'étude Marshall.....	65
V.3.2- Résultats de l'étude Duriez.....	68
V.3- DEUXIEME SÉRIE D'ESSAIS.....	74
V.3.1- Résultats de l'étude Marshall.....	74
V.3.2- Résultats de l'étude Duriez.....	77
 CHAPITRE VI: COMPORTEMENT AU FLUAGE STATIQUE	
VI.1- Introduction	83
VI.2- APPAREILLAGE UTILISÉ.....	84
VI.3- CHARGEMENT DE L'ÉPROUVETTE.....	84
VI.4- CONDITIONS PARTICULIÈRES DE L'ESSAI	84
VI.5- MODE OPÉRATOIRE	85
VI.6- VALEURS À DÉTERMINER	85
VI.7- RÉSULTAS DE L'ESSAI DE FLUAGE STATIQUE	88
VI.8- INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS	93
 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	 98

LISTE DES FIGURES

Figure. I.1 : Essai de compression simple du type LCPC.....	17
Figure. I.2 : Essai Marshall.....	18
Figure. I.3 : Essai de fluage statique uniaxial.....	19
Figure I.4 : Éprouvette trapézoïdale pour l'essai du module complexe.....	21
Figure.I.5:Variation de la résistance à la rupture en fonction du nombre de cycles...	22
Figure I.6 : Localisation des pointes de mesurage (orniérage).....	23
Figure. I.7 : Essai de fluage dynamique.....	25
Figure. I.8 : Essai de presse à cisaillement giratoire.....	26
Figure. II.9 : Courbe contrainte-déformation moyenne.....	26
Figure. II.1 : Composition schématique d'un pétrole brut.....	30
Figure. II.2 : Schéma d'une unité de distillation sous vide.....	32
Figure.II.3 : Schéma d'une unité de soufflage.....	33
Figure. II.4: Essai de pénétrabilité à l'aiguille	35
Figure. III.1: Effets de l'adjonction des additifs au béton bitumineux	43
Figure IV.1: Pénétromètre.....	47
Figure. IV.2 :Appareil de mesure du point de ramollissement bille et anneau.....	47
Figure. IV.3: Appareil de mesure du point d'éclair- point de flamme.....	48
Figure. IV.4: Essai d'équivalent de sable.....	50
Figure. IV.5 : Essai de bleu au Méthylène.....	51
Figure. IV.6 : Courbe granulométrique pour les agrégats de Cap djinet.....	52
Figure. IV.7 : Courbe du mélange pour les agrégats de la Cap Djinet.....	52
Figure IV.8: variation de la compacité Marshall en fonction de la teneur en bitume..	53
Figure IV.9: variation du fluage Marshall en fonction de la teneur en bitume.....	54
Figure IV.10: variation de la stabilité Marshall en fonction de la teneur en bitume...	54
Figure. IV.11: Courbe granulométrique pour les agrégats de Carrière Jobert.....	55
Figure. IV.12: Courbe du mélange pour les agrégats de la Carrière Jobert.....	55
Figure IV.13:variation de la compacité Marshall en fonction de la teneur en bitume..	56
Figure IV.14: variation du fluage Marshall en fonction de la teneur en bitume.....	57
Figure IV.15: variation de la stabilité Marshall en fonction de la teneur en bitume...	57
Figure. V.1 : Moules Duriez.....	60
Figure. V.2 : Éprouvettes Duriez.....	60

Figure. V.3 : Moules Marshall.....	61
Figure. V.4 : Éprouvettes Marshall.....	61
Figure. V.5 : Étuve.....	61
Figure. V.6 : Armoire de conservation des éprouvettes Duriez.....	61
Figure. V.7 : Presse de compactage des éprouvettes Marshall.....	62
Figure. V.8 : Presse de compactage des éprouvettes Duriez.....	62
Figure. V.10 : Presse d'écrasement avec éprouvette Marshall en place.....	63
Figure. V.10 : Presse d'écrasement avec éprouvette Duriez en place.....	63
Figure. V.10 : Presse d'écrasement	63
Figure. V.11: bain marie	64
Figure.V.13: Influence de la poudrette de caoutchouc sur La compacité Marshall....	66
Figure.V.14: Influence de la poudrette de caoutchouc sur le fluage Marshall.....	66
Figure.V.15:Influence de la poudrette de caoutchouc sur la stabilité Marshall.....	67
Figure.V.16 :Influence de la poudrette de caoutchouc sur la compacité.....	69
Figure.V.17: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la résistance à sec.....	69
Figure. V.18: Influence de la poudrette sur la résistance après immersion.....	70
Figure.V.19: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la tenue à l'eau.....	71
Figure. V.20: Influence de la poudrette de caoutchouc sur l'affaissement.....	72
Figure. V.21: Influence de la poudrette de caoutchouc sur l'imbibition.....	72
Figure. V.22: Influence de la poudrette de caoutchouc sur le gonflement.....	73
Figure. V.23: Influence de la poudrette de caoutchouc sur La compacité Marshall....	75
Figure. V.24: Influence de la poudrette de caoutchouc sur le fluage Marshall.....	76
Figure. V.25: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la stabilité Marshall.....	76
Figure. V.26: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la compacité.....	78
Figure. V.27: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la résistance à sec.....	79
Figure. V.29: Influence de la poudrette sur la résistance après immersion.....	80
Figure. V.30: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la tenue à l'eau.....	81
Figure. V.31: Influence de la poudrette de caoutchouc sur l'affaissement.....	81
Figure. V.32 : Influence de la poudrette de caoutchouc sur l'imbibition.....	82
Figure. V.33 : Influence de la poudrette de caoutchouc sur le gonflement.....	87
Figure. VI.1 : Contrainte appliquée et composantes de la déformation lors de l'essai de fluage statique.....	86
Figure. VI.2 : Résultats de l'essai du fluage statique.....	93
Figure.VI.3:Influence de la poudrette sur les déformations initiale, totale et finale...	94

Figure.V.4:Influence de la poudrette sur la déformation réversible et irréversible....94

Figure. VI.5 : Influence de la poudrette de caoutchouc sur le module de rigidité
initial et le module de rigidité total.....95

Figure.VI.6 : Influence de la poudrette de caoutchouc sur
Le recouvrement viscoélastique.....95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Caractéristiques exigées pour les granulats roturiers.....	05
Tableau I.2 : Fuseaux de spécification pour les enrobés bitumineux.....	11
Tableau I.3 : Courbes modèles retenues.....	12
Tableau I.4 : Étude de laboratoire à réaliser pour aboutir à une formulation des bétons bitumineux semi-grenus(BBSG).....	14
Tableau I.5: Performances mécaniques exigées des bétons bitumineux semi grenus..	15
Tableau I.6 : Pourcentage des vides à respecter.....	15
Tableau IV.1 : Résultats de l'essai de pénétrabilité à l'aiguille.....	47
Tableau IV.2: Résultats de l'essai de température de ramollissement bille et anneau.....	48
Tableau IV.3 : Résultats de l'essai du point d'éclair - point de flamme.....	48
Tableau IV.4 : Résultats de l'essai du poids spécifique.....	49
Tableau IV.5 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable.....	50
Tableau IV.6 : Résultats de l'essai Los-Angeles	50
Tableau IV.7 : Résultats de l'essai Micro-Deval Humide.....	50
Tableau IV.8 : Résultats de l'essai Au bleu de Méthylène.....	51
Tableau IV.9: résultats de l'analyse chimique des agrégats.....	51
Tableau IV.10: Détermination de la teneur optimale pour les agrégats de Cap Djinet.....	53
Tableau IV.13 : Détermination de la teneur optimale pour les agrégats de la Carrière Jobert.....	56
Tableau IV.14 : Résultats des essais préliminaires pour détermination de la teneur optimale pour les agrégats de Carrière Jobert.....	61
Tableau. V.1 : Résultats de l'étude Marshall avec agrégats de Cap Djinet et bitume 35/50.....	65
Tableau. V.2 : Résultats de l'étude Marshall avec agrégats de la Carrière Jobert et bitume35/50.....	65
Tableau. V.3 : Résultats de l'étude Duriez avec agrégats de Cap Djinet et bitume 35/50.....	68
Tableau V.4 : Résultats de l'étude Duriez avec agrégats de Cap Djinet et bitume 35/50.....	68

Tableau. V.5: Résultats de l'étude Marshall avec agrégats de Cap Djinet et bitume 35/50.....	75
Tableau. V.6: Résultats de l'étude Marshall avec agrégats de la Carrière Jobert et bitume35/50.....	75
Tableau. V.7: Résultats de l'étude Marshall avec agrégats de Cap Djinet et bitume 35/50.....	77
Tableau. V.8: Résultats de l'étude Marshall avec agrégats de la Carrière Jobert et bitume35/50.....	78
Tableau VI.1 : Résultats des essais du fluage statique pour le béton bitumineux avec 0 % d'ajout.....	88
Tableau VI.2 : Résultats des essais du fluage statique pour le béton bitumineux avec 1 % d'ajout.....	89
Tableau VI.3 : Résultats des essais du fluage statique pour le béton bitumineux avec 2 % d'ajout.....	90
Tableau VI.4 : Résultats des essais du fluage statique pour le béton bitumineux avec 3 % d'ajout.....	91
Tableau VI.5 : Résultats des essais du fluage statique pour le béton bitumineux avec 4 % d'ajout.....	92

INTRODUCTION GENERALE

Dans la vie économique d'un pays, la route se présente comme un élément incontournable pour assurer le déplacement des biens et des personnes. Devant l'agressivité du trafic qui continue à croître, les réseaux routiers sont mis davantage à l'épreuve, et on se trouve dans l'obligation d'investir de plus en plus dans leur développement, leur entretien et leur amélioration.

En outre, il apparaît nécessaire d'approfondir les études et recherches menées sur la géotechnique routière et les matériaux routiers notamment le bitume et les enrobés bitumineux. Un effort important se concentre dans la compréhension, aussi bien au laboratoire que sur la route, des performances des enrobés dans les chaussées, et conduit à l'adoption de nouveaux procédés de réalisation des chaussées, assurant un comportement mécanique convenable et durable, et présentant des avantages sur le plan économique.

Depuis plusieurs années, on assiste à un intérêt particulier pour les liants modifiés. Le liant est amélioré par l'ajout de polymères et caoutchouc dans le but de le faire travailler dans des conditions plus sévères et répondre aux exigences auxquelles le liant pur en sa qualité de matériau thermoplastique présentant beaucoup d'inconvénients surtout aux très basses températures (il tend à devenir dur et cassant) et aux très hautes températures (il tend à devenir visqueux voire liquide). En pratique, cette technique est difficile à exploiter à cause de la faisabilité à échelle industrielle (fabrication, stockage transport.....)

Dans le présent travail, on a ajouté des additifs non pas au bitume mais directement dans le squelette granulaire d'un enrobé bitumineux ordinaire destiné à la couche de roulement de la chaussée. L'additif en question provient de la récupération des déchets de caoutchouc et polymères (pneus usagés de véhicules, tapis de voitures, semelles de chaussures...etc.) broyés sous forme de poudrette. Cette dernière a été ajoutée au mélange à différents pourcentages et on a suivi l'évolution des performances mécaniques afin de chercher la teneur optimale en poudrette qui pourrait nous garantir une amélioration de la stabilité, et une réduction de l'épaisseur de la couche.

L'enjeu est important, pas uniquement sur le plan économique mais aussi sur le plan environnemental en ouvrant la voie à l'utilisation d'importantes quantités de caoutchouc usées et stockées dans les hangars.

La présente étude comporte deux grandes parties:

La première est une synthèse bibliographique qui traite des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés utilisés dans la géotechnique routière et elle présente les essais classiques et les essais spécifiques relatifs donnant le comportement de ces différents matériaux vis à vis des différentes sollicitations auxquelles ils sont soumis. On a jugé également intéressant de donner les différentes manières de modification des enrobés bitumineux à savoir l'emploi des bitumes modifiés et des bitumes spéciaux.

La deuxième partie est expérimentale et dans laquelle on a présenté les matériaux utilisés afin d'avoir une vision sur l'impact de l'ajout de la poudre de caoutchouc sur les enrobés en faisant varier la classe du bitume d'une part (35/50 et 70/100) et la nature des granulats d'autre part. Deux types de granulats de provenance du centre du pays ont permis l'élaboration de l'enrobé modifié, ceux de la carrière jobert (Alger) et ceux de cap djinet (Boumerdes).

Les études de formulation des enrobés ainsi que les essais Marshall et Duriez ont été effectués au laboratoire central de la société nationale des grands travaux routiers (SONATRO) et le laboratoire central des travaux publics (LCTP). Un complément d'essais sur le comportement au fluage statique a été réalisé au niveau du laboratoire routes et aéroports de la faculté Génie Civil (USTHB).

CHAPITRE I

ETUDE DU COMPORTEMENT DES BETONS BITUMINEUX

I.1- GENERALITES SUR LES ENROBES BITUMINEUX

I.1.1- Définition :

Un enrobé hydrocarboné est un mélange de granulats de différentes dimensions, d'un liant hydrocarboné (généralement le bitume), et éventuellement des fines d'apport ;

I.1.2- les constituants d'un enrobé bitumineux

I.1.2.1- Le liant hydrocarboné :

Le liant hydrocarboné a pour rôle d'assurer l'enrobage des granulats ainsi que la cohésion entre eux. Les caractéristiques du liant sont déterminées par des essais mécaniques afin de choisir le liant approprié pour chaque utilisation . ces essais sont :

- **L'essai de pénétrabilité à l'aiguille :** pour mesurer la dureté du liant
- **L'essai du point de ramollissement bille et anneau :** pour mesurer le ramollissement du liant (passage de l'état solide à l'état visqueux) .
- **L'essai du point de fragilité FRAAS:** pour mesurer le pouvoir du bitume à travailler à des très basses températures
- **Le point d'éclair et le point de flamme:** pour voir à quelle température le bitume s'enflamme à l'approche d'une flamme ;

I.1.2.2- Les granulats :

Les granulats assurent la solidité du mélange et doivent donc répondre à un certain nombre de caractéristiques physiques et mécaniques :

- **La résistance aux chocs :** destinée à évaluer l'aptitude des gravillons à se fragmenter sous l'action du trafic, la fragilité se mesure en utilisant l'essai Los Angeles (LA).

L'essai Los Angeles permet de mesurer la quantité d'éléments dont la dimension est inférieure à 1,6 millimètres produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angeles.

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

L'essai Micro-Deval en présence d'eau consiste à mesurer la quantité des agrégats de dimensions inférieures à 1,6 millimètres produite par frottement réciproque accéléré par des boules en acier.

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

L'essai permettant de mesurer la résistance au polissage ne s'adresse qu'aux gravillons destinés aux couches de roulement, il s'agit du coefficient de polissage accéléré (CPA).

En faisant varier ces composantes en quantité et en qualité, on peut obtenir une gamme très large de propriétés débouchant sur des applications fort diverses.

Tableau 1.1 : 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
T ₄ <25 [<500 V/j]	A IC LA MDE CPA P ES	30 - 30 25 - 2 % 50	30 60 % 25 20 0,45 (1) 2 % 50
T ₃ 25 à 150 [500 à 3000 V/j]	A IC ou RC LA MDE CPA P ES	30 IC=100 % 25 20 - 2 % 50	25 2 20 15 0,50 2 % 50
T ₂ 25 à 150 [500 à 3000 V/j]	A RC LA MDE CPA P ES	25 2 25 20 - 2 % 50	20 2 20 15 0,50 2 % 50
T ₁ 300 à 750 [6000 à 15000 V/j]	A RC LA MDE CPA P ES	20 2 25 20 - 2 % 50	20 4 20 15 0,50 2 % 50
T ₀ >750 [>15000 V/j]	A RC LA MDE CPA P ES	20 4 25 20 - 2 % 50	20 4 15 15 0,50 2 % 50

(1) : On pourra admettre 0,40 comme minimum absolu lorsque la vitesse est limitée à 60 km/h.

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 granulats
ES: Équivalent de sable

I.1.2.3- 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 de fines d'apport.

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

I.1.2.4- 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 recherchées et particulièrement le rapport immersion-compression.

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

I.1.3- Classification des enrobés hydrocarbonés :

Dans le domaine très vaste des enrobés hydrocarbonés et vues leur composition et destination possibles, on a introduit une classification basée essentiellement sur le mode de fabrication et la compacité.

I.1.3.1- D'après le mode de fabrication.

On distingue :

- **Les enrobés à chaud** : caractérisés par un passage des granulats dans un tambour sécheur pour les chauffer et les sécher. Le liant utilisé peut être un bitume pur, fluxé ou fluidifié, un goudron ou un liant composé, mais le plus souvent un bitume pur.
- **Les enrobés à froid** : préparés à partir de granulats qui ne sont pas passés dans un tambour sécheur. Le liant utilisé peut être un bitume fluxé ou fluidifié, un goudron ou une émulsion.

I.1.3.2- D'après la compacité.

On distingue :

- **Les enrobés denses** : Dans lesquels le pourcentage des vides est inférieur à 10%. à l'intérieur de cette catégorie se placent les bétons bitumineux (ou hydrocarbonés). Les enrobés denses de haute qualité sont caractérisés par des spécifications plus sévères en ce qui concerne la qualité des granulats, la viscosité du liant, la courbe granulométrique, les performances mécaniques et le soin apporté à la fabrication.
- **Les enrobés semi-denses**: dans lesquels le pourcentage des vides est compris entre 10 et 15%.
- **Les enrobés ouverts** : dans lesquels le pourcentage des vides est supérieur à 15 %.

Remarque :

- Dans le cas des enrobés dont le calibre des plus gros éléments du squelette minéral est inférieur à 6,3 mm, on ne prend pas en considération la classification basée sur la compacité. On leur attribue généralement la dénomination d'enrobés fins. S'il s'agit d'enrobés fins présentant des caractéristiques analogues à celles des bétons

bitumineux, on leur attribue le nom de « micro-béton bitumineux » (ou micro-béton hydrocarboné).

- Les enrobés dont le calibre des plus gros éléments du squelette minéral est supérieur à 20 mm sont soit de la grave bitume soit de la grave émulsion.

I.1.4- Utilisation des enrobés bitumineux en technique routière :

Les enrobés bitumineux sont utilisés dans la couche de surface des chaussées, dans les aires de stationnement (construction neuve, renforcement) ou dans les assises (couches de base et couche de fondation).

Dans le cas de leur utilisation en couche de surface et particulièrement en couche de roulement, les enrobés doivent satisfaire les conditions suivantes :

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

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

En ce qui concerne les enrobés bitumineux utilisés en assises de chaussées, les données du problème sont plus simples ; il s'agit essentiellement de concilier la résistance à l'orniérage à celle à la fatigue. C'est dans cet esprit qu'a été mise au point la technique des graves bitumes.

I.1.5- Qualités exigées d'un enrobé.

Les qualités essentielles qu'un enrobé doit avoir sont :

I.1.5.1- La stabilité :

La stabilité d'une couche d'enrobé est la résistance à la déformation permanente de la couche sous l'effet des charges statiques et dynamiques.

Une stabilité insuffisante de la couche face à un trafic important conduit à un fluage avec dépressions, à des ornières et à des ondulations.

La stabilité augmente avec l'angle de frottement interne des granulats et la dureté du liant ; ce qui explique la tendance actuelle pour l'emploi des bitumes durs (35/50) et des granulats durs et anguleux pour la formulation des bétons bitumineux pour chaussées à trafic lourd.

I.1.5.2- La flexibilité :

C'est l'aptitude à admettre sans fissuration les déformations d'ensemble qui peuvent être imposées à la couche d'enrobé par la déflexion des couches inférieures.

L'insuffisance de la flexibilité se traduit par des fissures sur le tapis. La flexibilité dépend en premier lieu de la ductilité du liant qui doit demeurer acceptable aux basses températures et pendant toute la durée de vie de l'enrobé.

La viscoélasticité du liant conduit à un enrobé stable et flexible en restant visqueux en été et pas fragile (cassant) en hiver.

I.1.5.3- L'insensibilité à l'eau :

L'insensibilité à l'eau et l'imperméabilité sont des caractéristiques que doit avoir l'enrobé bitumineux ; pour cela on utilise souvent des dopes pour améliorer l'affinité entre le liant et les granulats et permettre à l'enrobé de mieux résister au désenrobage sous l'action de l'eau.

L'enrobé employé en couches de surface doit posséder des propriétés particulières telles que la résistance aux efforts tangentiels et aux efforts de poinçonnement, ainsi

que la rugosité. Ceci exige donc des granulats qui ne se polissent pas facilement sous l'action de la circulation et qui gardent des arêtes au contact des pneumatiques.

1.2-FORMULATION DU BETON BITUMINEUX

1.2.1-Introduction :

La formulation d'un enrobé bitumineux consiste à déterminer la meilleure composition entre granulats de différentes dimensions et un liant hydrocarboné qui est le bitume dans le but d'obtenir un matériau doué de certaines caractéristiques mécaniques à savoir la rugosité, l'imperméabilité, la résistance à la fatigue, l'orniérage, le fluage...et autres.

1.2.2-Critères de formulation :

Pour choisir une formulation pour un béton bitumineux destiné pour la couche de roulement, il faut prendre en compte les principaux facteurs:

- **Type de la structure:** chaussée souple, semi-rigide ou rigide.
- **Épaisseur de la couche :** Pour le choix d'une formule d'un enrobé bitumineux, l'épaisseur est un critère important qui est dépendant de la compacité ; plus l'épaisseur est grande plus le compactage est inefficace et la compacité insuffisante.
- **Les conditions climatiques :** conditions d'exploitation hivernale, cycles gel-dégel ainsi que les effets de la température pendant les périodes d'été.
- **Le site :** routes de montagne, de Sahara ou des régions boisées sont très différentes ce qui conduit à bien choisir le type et la combinaison des matériaux à utiliser pour chacune d'elles.

1.2.3-Méthodologie pour l'étude d'une formulation :

Pour étudier une formulation d'un béton bitumineux pour une couche de roulement, trois étapes s'avèrent essentielles :
la composition granulométrique, la teneur en liant et les caractéristiques de l'enrobé.

- La composition granulométrique :

Dans l'étude de la formulation d'un enrobé. (squelette minéral lié en général par un liant hydrocarboné), le premier problème qui se pose est celui de la détermination du meilleur squelette minéral, donc de la composition granulométrique des constituants qui sont le sable, les gravillons et éventuellement des fines d'apport la mieux adaptée à l'application considérée..

Pour chaque type de béton bitumineux, la composition granulométrique est définie par le pourcentage de passant aux différents tamis. Des fuseaux de spécification sont mis en place pour délimiter les points de la courbe granulométrique .

Tableau I.2 : Fuseaux de spécification

Tamisat (mm)	BB 0/10		BB 0/14	
	Inférieur	supérieur	inférieur	supérieur
14	-	-	94	100
10	94	100	72	84
6.3	65	75	50	66
4	45	60	40	54
2	30	45	28	40
0.08: couche de roulement	7	10	7	10
0.08 : couche de liaison	6	9	6	9

La méthode la plus couramment utilisée consiste –en partant des données granulométriques des matériaux- à faire passer la courbe du mélange par quelques points obligés, c'est à dire à viser certaines valeurs de refus ou de tamisât à deux ou trois tamis bien choisis, et en général à ajuster cette courbe dans un fuseau de spécifications, ou essayer de la placer dans une certaine partie de ce fuseau. On effectue en suite quelques modifications sur la totalité des fines, en jouant sur les fines ou sur le sable, modifications qui peuvent résulter d'une série préliminaire d'essais mécaniques sur l'enrobé. Elle est basée donc sur des tâtonnements pour l'obtention d'une courbe granulométrique.

L'utilisation des nouveaux moyens de calcul (ordinateurs) permet de déterminer en un temps court une courbe immédiatement fiable. En partant d'une courbe modèle qui correspond dans la théorie à un optimum des propriétés du mélange.

Tableau I.3 : Courbes modèles retenues

Courbe modèle	Forme mathématique
1. Courbe 5/8	$Y=100(x/D)^{5/8}$
2. Fuller	$Y=100(x/D)^{0.5}$
3. Nijboer	$Y=100(x/D)^{0.45}$
4. Talbot	$Y=100(x/D)^n$
5. Furnas	$Y=100(b^n-1)/(b^1-1)$
6. Bolomey	$Y=a+(100-a)(x/D)^{0.5}$
7. Médiane fuseau	Y=PCP moyen

Y : le pourcentage du passant

X : le tamisat

- la teneur en liant:

La teneur en liant d'un mélange bitumineux est donnée à partir de l'étude granulométrique faite au laboratoire. Elle est calculée à l'aide de la formule :

$$PI = k.a.(\Sigma)^{1/5}$$

- ❖ k : module de richesse, il est synonyme de l'épaisseur de la surface du film du liant qui couvre la surface des granulats
- ❖ Σ : surface spécifique conventionnelle en m^2/kg , elle est donnée par :

$$100 \Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f$$

avec :

- G: pourcentage des éléments retenus par le tamis de 6.3 mm
- S: pourcentage des éléments passant au tamis de 6.3 mm et retenus par le tamis de 0.315 mm

- s: pourcentage des éléments passant au tamis de 0.315 et retenus par le tamis de 0.08 mm
- f: pourcentage des éléments passant au tamis de 0.08 mm
- ❖ α : coefficient correcteur de la masse volumique réelle des granulats(MVr) par rapport à MVr= 2.65

$$\alpha = 2.65/MVr$$

N.B : pour déterminer la teneur optimale du liant pour une nouvelle formulation de l'enrobé, il est nécessaire de faire expérimentalement des tâtonnements afin de déduire la valeur du module de richesse vérifiant les valeurs minimales exigées.

- les caractéristiques de l'enrobé :

Pour adopter une formulation pour un enrobé bitumineux avec des constituants nouveaux, des seuils minimaux des performances aussi bien pour les constituants que pour l'enrobé sont exigés. Il est donc nécessaire d'effectuer une étude à caractère général qui fait appel aux essais suivants :

- Essai de compactage à la presse de cisaillement giratoire sur plusieurs variantes et sélectionner les meilleures.
- Essai de compression simple à des températures différentes : 0, 18 et 50 °C sur les formules sélectionnées.
- Essai à l'orniérage à 60 °c sur les formules sélectionnées.
- Essai de traction sur les formules sélectionnées par les trois essais précédents.

S'il s'agit de vérifier une formulation d'enrobé déjà étudié, l'étude du laboratoire sera simplifiée (tableau I.4).

Les enrobés réalisés doivent répondre aux exigences citées dans le tableau (I.5).

Tableau I.4 : étude de laboratoire à réaliser pour aboutir à une formulation des béton bitumineux semi-grenus(BBSG).

Vérification d'une formule déjà étudiée et appliquée	Adaptation d'une formule dans le cas où il y'a changement d'un ou plusieurs constituants	Formule nouvelle
Essai PCG (NFP 98-252) ↓ Essai Duriez à 18 °C (NF P 98-251-1)	Essai PCG sur plusieurs variantes ↓ Une formule sélectionnée ↓ Essai Duriez à 18°C ↓ Essai d'orniérage (NF P 98-253-1) ⁽¹⁾	Essai PCG sur plusieurs variantes ↓ plusieurs formules sélectionnées ↓ Essai Duriez à 18°C ↓ Essai d'orniérage ⁽¹⁾ ↓ Une formule sélectionnée ↓ Essai de caractérisation des performances mécaniques du BBSG ⁽²⁾

(1) Essai à réaliser dans le cadre de trafic important et/ou de sollicitations particulières, par exemple :

- trafic lent canalisé
- forte épaisseur
- utilisation de sable roulé, etc....

(2) Essai à réaliser dans le cas d'utilisation des caractéristiques mécaniques du BBSG pour le dimensionnement des chaussées. Les essais utilisés seront soit:

- l'essai de détermination du module de perte de linéarité(NF P 98-260-1).
- l'essai de module complexe(NF P 261-1).
- l'essai de fatigue(NF P 98-261-1).

Tableau I.5 : performances mécaniques exigées des bétons bitumineux semi-grenus

Essais Duriez à 18°C (NF P 98-251-1) Résistance à la compression à sec R en Mpa : - avec un bitume 180/200 - avec un bitume 80/100 - avec un bitume 60/70 - avec un bitume 40/50 - Rapport r/R	4 5 6 7 0.75	
Essai d'orniérage (NF P 98-253-1) Profondeur d'ornière en pourcentage de l'épaisseur de la dalle, pour une dalle de 10cm d'épaisseur à 30000 cycles et à 60°C avec le bitume prévisible du chantier, estimée au pourcentage de vides PCG (NF P 98-252) - à 60 girations (pour le BBSG 0/10) - à 60 girations pour le BBSG 0/14	10 10	
Essai de détermination du module et de la perte de linéarité (NF P 98-260-1) - avec un bitume 40/50 - avec un bitume 60/70 - avec un bitume 80/100	Module (en MPa) À 10°C et 0.02 s (γ)	Perte de linéarité à 0°C et 30 s (1-γ)
	8000	0.37
	6000 4000	0.30 0.25
Essai du module complexe (NF p98-260-2) Module en MPa du BBSG à la compacité estimée du chantier à 15°C et 10 Hz	5400	
Essai de fatigue (NF p 98-261-1) Déformation relative ϵ_6 à la compacité estimée du chantier à 10^6 cycles pour une température de 10°C et une fréquence de 25Hz	$100 \cdot 10^{-6}$	

Tableau I.6 : pourcentage des vides à respecter

Essais	BBSG0/10		BBSG0 14	
	min	max.	min	max.
Essai Duriez (NF P 98-251-1)				
- Couche de roulement	5	9	5	8
- Couche de liaison	6	10	6	10
Essai de compactage à la presse de cisaillement giratoire (NF P 98-252)				
- à 10 girations	11	-	11	-
- à 60 girations	10	9	-	-
- à 80 girations	-	-	4	8

I.3- LES ESSAIS SUR ENROBÉS BITUMINEUX.

Le mot enrobé bitumineux est suffisamment vague pour englober une grande variété de matériaux dont le comportement varie suivant la sollicitation. C'est pourquoi les propriétés de l'enrobé sont encore mal connues, malgré l'importance des moyens mis en œuvre un peu partout. On sait toutefois que c'est un matériau hétérogène dont le bitume lui confère un caractère visqueux, alors que sa partie minérale (squelette) est responsable de sa résistance. Pour cerner donc les propriétés des enrobés et l'aptitude qu'ils auront à répondre à une fonction donnée, de nombreux laboratoires de recherche ont mis au point des méthodes d'essais dans le souci d'une meilleure connaissance de certaines propriétés, soit pour chercher l'explication des désordres constatés et tenter d'y apporter remède en affinant les règles de formulation, soit pour essayer de prévoir leur comportement à long terme et fournir des données indispensables aux calculs du dimensionnement des chaussées.

On peut distinguer à cet effet deux types d'essais pour caractériser un enrobé en laboratoire :

1- Des essais qui simulent le comportement d'un enrobé lors de la mise en œuvre et le compactage :

- L'essai Marshall
- L'essai Duriez
- La presse à cisaillement giratoire

2- Des essais qui simulent l'enrobé en service :

- Les essais Duriez et Marshall empiriques.
- L'essai d'ornièreur LCPC.
- Les essais de module (intrinsèque).
- Les essais de fatigue (intrinsèque).

Les informations délivrées par ces essais sont différentes et le choix de l'essai à faire dépend des caractéristiques recherchées, tout en prenant en compte les raisons de coût et de durée.

I.3.1- ESSAIS CLASSIQUES

Sont les essais les plus connus et répandus pour les études de formulation des enrobés bitumineux

I.3.1.1- ESSAI DURIEZ [33] :

L'essai Duriez a pour but de déterminer, pour une température et un compactage donnés, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à partir du rapport des résistances à la compression avec et sans immersion des éprouvettes.

Il permet également de déterminer le pourcentage des vides du mélange hydrocarboné dans des conditions de compactage données et d'appréhender une forme de susceptibilité thermique.

L'essai s'effectue sur des éprouvettes cylindriques en les soumettant à la compression simple, à une vitesse de 1 mm/sec. et à la température de 18°C (fig I.1).

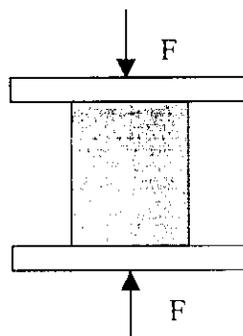


Figure I.1 : Essai de compression simple du type LCPC

La charge à la rupture donne la résistance à la compression de l'enrobé confectionné à chaud ; elle est déterminée après 8 jours de conservation à sec pour la moitié des éprouvettes et avec immersion pour l'autre moitié.

Le rapport résistance après immersion, résistance à sec exprime la tenue à l'eau du mélange hydrocarboné testé. Plus ce rapport est élevé, meilleure est la tenue à l'eau du mélange.

I.3.1.2- ESSAI MARSHALL [32] :

L'essai Marshall est un essai destructif, effectué au laboratoire sur des éprouvettes cylindriques selon un mode opératoire bien précis. Il permet de comparer des

formules diverses de mélange hydrocarboné, et d'évaluer leurs performances à des niveaux de compactage différents. Il permet aussi, dans une certaine mesure, de prévoir si, sous le trafic routier, un mélange hydrocarboné sera stable ou aura tendance à fluer.

La compression est appliquée sur l'éprouvette après une demi-heure d'immersion dans l'eau à 60°C. et à la vitesse de 0.86 mm/sec. Cet essai est applicable à tous les enrobés à chaud ne comportant pas de granulats de dimensions supérieurs à 20 mm.

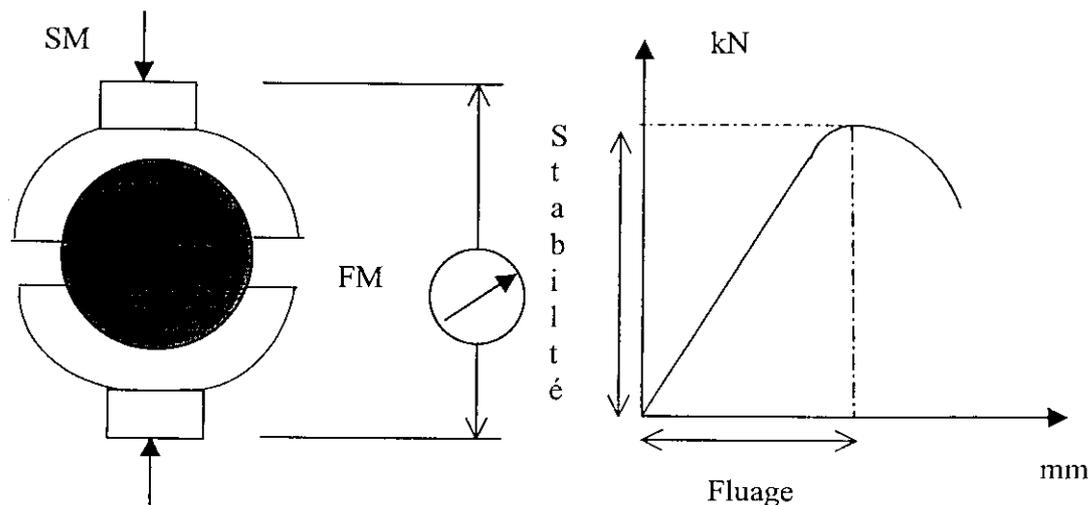


Figure I.2 : Essai Marshall.

L'essai Marshall permet de déterminer les valeurs suivantes :

La stabilité Marshall est la valeur de la charge maximale obtenue pour 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.

La compacité est le rapport des densités apparente et vraie.

I.3.2- ESSAIS SPÉCIFIQUES

Ce sont des essais mécaniques modernes qui tentent de palier les insuffisances de solution des problèmes et combler les vides relevés par les essais classiques. Ils permettent également de déterminer les caractéristiques intrinsèques du comportement du matériau.

I.3.2.1- ESSAI DE FLUAGE STATIQUE UNIAXIAL :

Au cours de l'essai de fluage statique uniaxial, l'éprouvette est soumise à une contrainte axiale statique pendant une période de temps, au cours de laquelle la contrainte est contrôlée et enregistrée. L'éprouvette est soumise à une charge constante pendant une heure de chargement et une heure de déchargement, et on enregistre les déformations de l'éprouvette par rapport à sa hauteur initiale.

La déformation relative égale au rapport $\Delta H/H$ peut être représentée en fonction du temps.

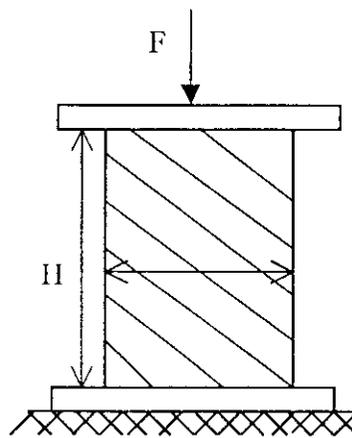


Figure I.3: Essai de fluage statique uniaxial

I.3.2.2- LE MODULE COMPLEXE :

Contrairement aux matériaux purement élastiques, les matériaux bitumineux sont des corps viscoélastiques dont les propriétés mécaniques dépendent de la température et du temps de sollicitation.

Les caractéristiques les plus utilisées pour définir le comportement de tels matériaux est le module complexe.

L'essai de flexion dynamique qui permet de définir le module complexe est effectué sur des éprouvettes trapézoïdales, encastrées à leur base.

La contrainte imposée : $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t)$

La déformation résultante : $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$

Compte tenue du caractère viscoélastique du matériau, la déformation accuse un retard sur la contrainte, retard qui se traduit par un angle de déphasage φ .

La contrainte et la déformation sont reliées par le module complexe E^*

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)}$$

En notation imaginaire, le module s'écrit :

$$E^*(\omega t) = |E^*| e^{i\varphi} = E_1 + E_2$$

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

E_1 : partie réelle du module, en phase avec la contrainte, représente la partie de l'énergie emmagasinée dans le matériau et qui pourra être restituée.

E_2 : partie imaginaire du module, en quadrature avec la contrainte et la déformation, donne une idée de l'énergie perdue par frottement interne au sein du matériau.

φ : l'angle de phase entre la contrainte et la déformation, il donne une idée précise sur la prédominance visqueuse ou élastique du matériau.

$$\varphi = 0 \quad \text{pour un corps purement élastique}$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \quad \text{pour un corps purement visqueux}$$

$|E^*|$: la valeur absolue du module complexe appelée module de rigidité.

Le module de rigidité est une composante très importante dans le calcul de dimensionnement des chaussées.

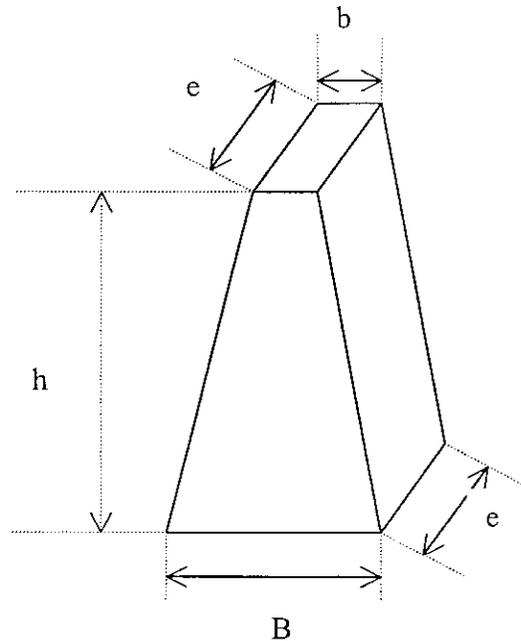


Figure I.4: Éprouvette trapézoïdale pour essai de module complexe

I.3.2.3- ESSAI DE FATIGUE :

Le passage répété de charges de poids lourds sur les chaussées entraîne des dégradations progressives des structures et/ou des matériaux [9]. Le dimensionnement des chaussées est déterminé en partie, en fonction des caractéristiques évaluées en laboratoire par un essai normalisé [9].

On appelle résistance à la fatigue, à N cycles d'un enrobé bitumineux, la valeur de la sollicitation contrainte ou déformation pour laquelle le matériau peut supporter N cycles puis se rompre. Ce nombre de cycles de chargement N entraînant la rupture est souvent appelé durée de vie, la fatigue est donc un endommagement engendré par la répétition des sollicitations.

Les essais de fatigue sur enrobés sont réalisés par flexion sur des éprouvettes trapézoïdales encastrées à leur base en répétant un niveau de contrainte ou de

déformation jusqu'à rupture de l'éprouvette. La température de l'essai est souvent 10°C et la fréquence de 25Hz.

- l'essai peut être effectué en exerçant un effort F_0 en tête de l'éprouvette que l'on maintient constant durant la totalité de l'essai. Dans ce cas, et compte tenu de l'endommagement de l'éprouvette, «le déplacement» de l'éprouvette croît constamment pendant l'essai. On dit que l'essai est effectué à contrainte constante ;
- l'essai peut aussi être effectué en imposant en tête de l'éprouvette un déplacement que l'on maintient tout au long de l'essai. l'effort exercé F décroît alors constamment pendant l'essai. On dit alors que l'essai est effectué à déformation constante.

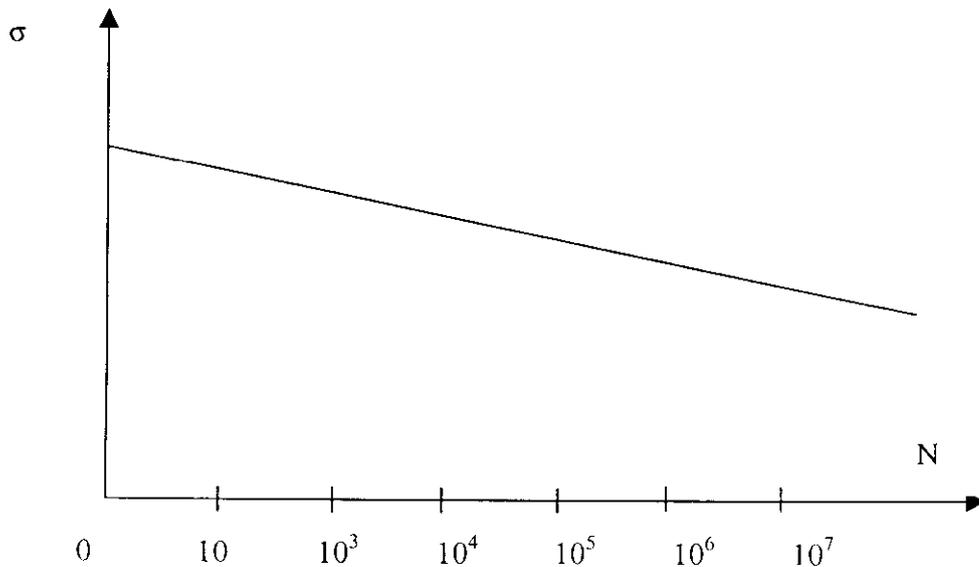


Figure I.5: Variation de la résistance à la rupture en fonction du nombre de cycles

1.3.2.4- ESSAI D'ORNIÉRAGE

L'essai a été conçu pour pouvoir tester en laboratoire le comportement de matériaux bitumineux soumis à la circulation, essentiellement leur résistance vis-à-vis des déformations du type orniérage-fluage.[6]

Le passage répété d'une roue équipée d'un pneumatique soumettant une éprouvette parallélépipédique de matériau hydrocarboné à une charge verticale provoque une diminution relative de l'épaisseur appelée « ornière ».[6]

L'éprouvette est placée dans un moule et est testée dans des conditions isothermes ; la surface de l'éprouvette affleurant la partie supérieure du moule. La charge verticale est maintenue quasi-constante par un dispositif approprié. le pneumatique est animé suivant le grand axe de l'éprouvette d'un mouvement sinusoïdal de fréquence et d'amplitude spécifiques.

Conditions de l'essai

L'essai d'orniérage est réalisé suivant les conditions suivantes :

- course du pneumatique: (410 ± 5) mm
- fréquence du mouvement relatif: (1 ± 0.1) Hz
- Pression du pneumatique: (6 ± 0.1) bars
- charge roulante appliquée: (5000 ± 50) N
- écart type entre l'axe de la trace et l'axe théorique de l'éprouvette inférieur à 5 mm
- Absence d'angle d'envirage.

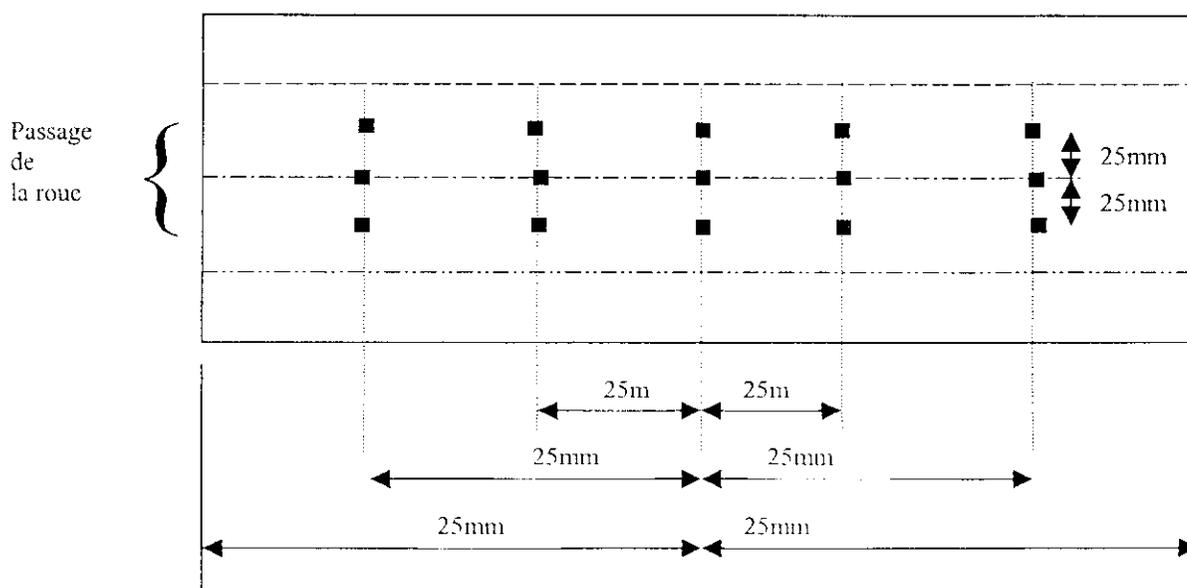


Figure I.6 : localisation des points de mesure

I.3.2.5- FLUAGE DYNAMIQUE :

L'essai de fluage dynamique permet de :

- Établir une loi complète du fluage dynamique d'un enrobé et de prévoir son comportement au sein de la chaussée.
- Faire un essai type pour choisir une formulation optimale du point de vue de l'orniérage.

L'essai de fluage dynamique permet d'étudier, à différentes températures, la vitesse de déformation permanente d'un enrobé bitumineux dont des éprouvettes cylindriques sont soumises à des compressions axiales sinusoïdales d'amplitude et de fréquence données et une pression isotrope donnée.

Principe de l'essai :

Il s'effectue sur des éprouvettes cylindriques de 10 cm de hauteur et 13.7 mm de diamètre placées dans une enceinte isotherme, et soumises à une contrainte verticale sinusoïdale de compression σ_v d'amplitude et fréquence constantes.

Sous l'effet du chargement, une contrainte statique et isotrope σ_h est appliquée et l'échantillon subit une déformation axiale.

La courbe de fluage : $\varepsilon = \Delta H_0 / H_0$ en fonction du nombre de cycles de chargement.

ε : déformation permanente

H_0 : hauteur initiale de l'éprouvette

ΔH_0 : la variation de la hauteur associée à la partie permanente de la déformation.

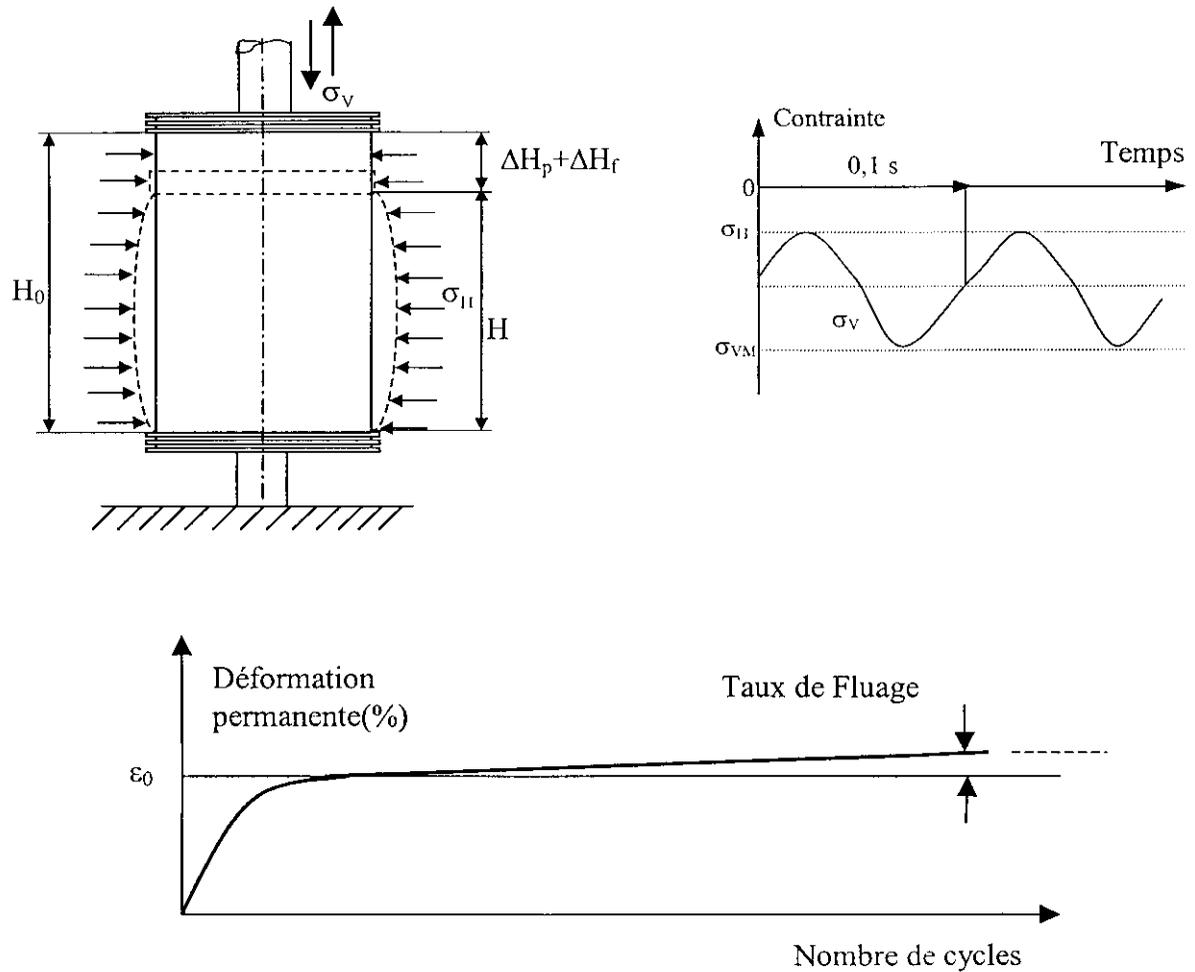


Figure I.7: Essai de fluage dynamique

I.3.2.6- ESSAI DE PRESSE À CISAILLEMENT GIRATOIRE :

L'essai consiste à soumettre des éprouvettes à une action de pétrissage, conjuguée à une faible compression statique simulant l'effet de compacteurs sur chantier.

L'action de compactage est réalisée à température et vitesse de rotation constantes. Elle est suivie par l'enregistrement simultané en fonction du temps, de la hauteur de l'éprouvette et de l'évolution de la force d'inclinaison F nécessaire pour maintenir l'angle ϕ constant. L'essai s'arrête automatiquement après 200 girations.

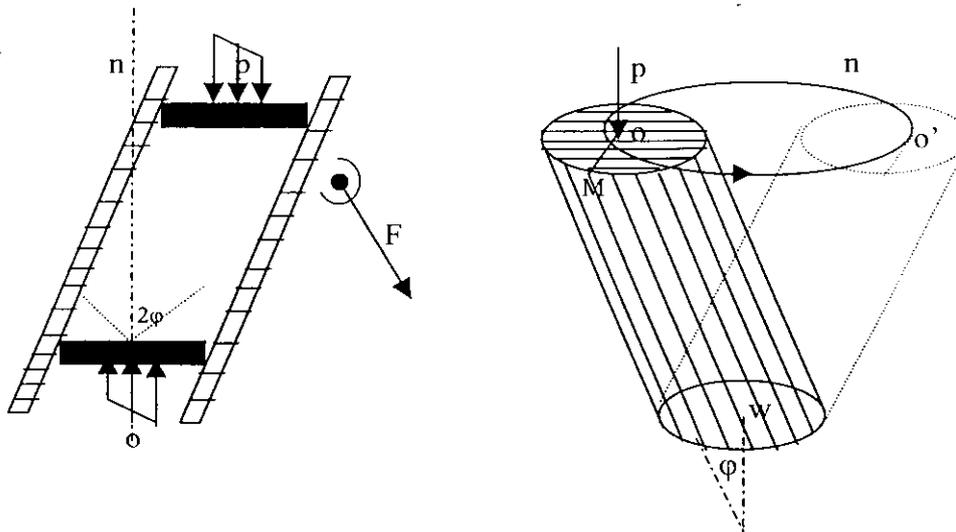


Figure I.8: Essai de presse à cisaillement giratoire

I.3.2.7- L'ESSAI DE TRACTION DIRECTE :

L'objectif principal de l'essai de traction directe est de permettre de comparer des enrobés du point de vue dimensionnement et résistance à la fatigue. L'appareil se compose d'une machine d'essai en compression sur laquelle a été adapté un étrier de traction qui réalise l'inversion du mouvement.

La machine est mue par un moteur asynchrone, muni d'une boîte de vitesse, qui délivre à l'éprouvette un signal de type $\varepsilon(t)=a.t^n$

Cet essai permet d'atteindre une valeur de la résistance à la rupture en traction directe. Il permet en outre de déterminer le module dans le domaine linéaire, en fonction du temps de chargement et à plusieurs températures.

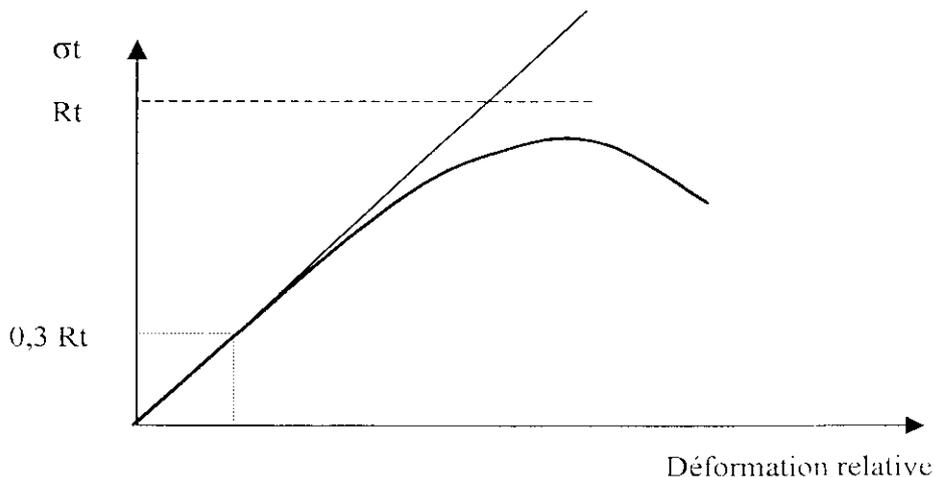


Figure I.9: courbe contrainte-déformation moyenne

II- LES LIANTS HYDROCARBONES

II.1- Introduction :

Les liants hydrocarbonés sont l'ensemble des matières contenant des hydrocarbures et leurs dérivés non métalliques accompagnés de minéraux plus au moins inertes ; ils sont visqueux et colloïdaux. Leur utilisation est très large dans la technique routière notamment pour la construction des couches de roulement, la stabilisation des couches du corps de chaussée.

L'ensemble des liants hydrocarbonés comprend trois groupes principaux :

- Les bitumes et leurs dérivés anhydres
- Les émulsions de bitumes
- Les goudrons

II.2- LES BITUMES

Les bitumes employés pour la construction et l'entretien des chaussées d'une part, et les applications industrielles d'autre part, sont des produits solides, semi-solides, comprenant les liants suivants [1]:

II.2.1- Bitumes purs :

Ils sont ainsi dénommés car obtenus par divers procédés de raffinage à partir de bruts pétroliers; ils ne comportent aucun ajout destiné à en modifier la consistance.

II.2.2- Bitumes oxydés (soufflés):

Ce sont des bitumes dont les propriétés rhéologiques ont été modifiées par réaction avec l'air à température élevée.

II.2.3- Bitumes fluidifiés (cut-backs):

Ce sont des bitumes mélangés avec un diluant pétrolier en vue d'abaisser leur viscosité.

II.2.4- Bitumes fluxés :

Ce sont des bitumes ramollis par l'addition d'huile de fluxage de faible volatilité.

II.2.5- Bitumes composés :

Ce sont des mélanges dans les quels le bitume entre toujours pour plus de 50 % ,et se subdivisent en :

- bitume-goudron : mélange de bitume pur et de goudron de houille.
- bitume-brai : mélange de bitume pur et de brai de houille.
- bitume composé pétrolier

II.2.6- Bitumes modifiés :

Ce sont des bitumes dont on a modifié les propriétés rhéologiques ; cette modification s'est faite par l'emploi d'agents chimiques, ils ne font pas encore l'objet de classification ou de spécifications.

II.2.7- Bitumes spéciaux :

Ce sont des bitumes non classifiés qui répondent à certains usages spécifiques.

II.3- ÉMULSIONS DE BITUME

L'émulsion de bitume est une dispersion du bitume dans l'eau formée par emploi d'une énergie mécanique de cisaillement du liant et d'un agent tensioactif ou émulsifiant. Les liants de base peuvent être des bitumes purs ou modifiés, éventuellement fluidifiés ou fluxés.

II.4-GOUDRONS

Ils ont pour origine la cokéfaction à haute température du charbon, et sont obtenus par reconstitution à partir de brai et de coupes d'huile provenant du traitement du goudron de houille.

On distingue :

- les goudrons purs sans ajout
- les goudrons modifiés comportent des substances le plus souvent macromoléculaires autres que les fines minérales ou les additifs d'adhésivité. Ils comprennent les goudrons vinyles et le goudron-styrène, les premiers ne faisant pas l'objet de spécifications ;
- les goudrons composés comportent plus de 50% de goudron et du bitume pur, et ne font objet ni de classification ni de spécifications.

II.5- ORIGINE DU BITUMES

II.5.1- bitumes naturels

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

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

On peut citer également la Gilsonite (Utah, Colorado) qui est un bitume pur, très dur, utilisé non pas pour la route mais pour les peintures, les accumulateurs, et les carreaux d'asphalte ; il y'a également l'Elaterite, l'Albertite (Canada), infusibles et extrêmement durs.

II.5.2- Bitumes artificiels

Le bitume est la fraction la plus lourde du pétrole brut, constituée de molécules hydrocarbonées les plus longues. La composition schématique d'un pétrole brut peut être ainsi représentée :

Gaz
Carburant
Gas-Oil
Fuels: - domestique - fluide - lourde
Bitume

Figure II.1: composition schématique d'un pétrole brut

Dans cette composition , le pourcentage d'un bitume peut varier dans de très grandes proportions, il peut être :

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

II.6- FABRICATION DU BITUME

Le bitume représente les fractions lourdes des bruts pétroliers. Il s'agit d'un mélange complexe de molécules aliphatiques, naphéniques et aromatiques plus ou moins fonctionnalisées.

Selon leur origine et leur mode de fabrication, les bitumes ont des caractéristiques chimiques, physico-chimiques et rhéologiques différentes.

Une des premières conditions de fabrication d'un bitume est de choisir un brut suffisamment riche en produits lourds asphalténiques. La fabrication des bitumes comporte deux étapes :

- 1- Une distillation atmosphérique au cours de laquelle il y a séparation des fractions légères du brut, qui passent dans le distillat, et d'une fraction lourde qui reste au fond. Le résidu de la distillation, n'est cependant pas encore un bitume.
- 2- Un traitement du résidu atmosphérique pour qu'il acquière les caractéristiques: (pénétrabilité, température bille et anneau...) conformes aux spécifications relatives à un bitume. Il existe trois types de traitement :
 - La distillation sous vide.
 - Le soufflage.
 - L'extraction ou le désasphaltage.

II.6.1- Distillation atmosphérique :

Après décantation et dessalage, le pétrole brut est chauffé et envoyé dans une tour de distillation appelée colonne de fractionnement. Le fond de la colonne est chauffé à une température élevée (350-380°C) qui diminue progressivement de bas en haut de la colonne (110-150°C à la partie supérieure). Les différentes fractions, qui doivent respecter des fourchettes de point d'ébullition, sont soutirées à des points précis de la colonne. Le fond de la colonne est alors recueilli, réchauffé et traité pour qu'il acquière les propriétés requises pour un bitume.

II.6.2- Traitement du résidu atmosphérique :

1- Distillation sous vide :

Ce procédé de fabrication décrit sur la figure II.2 permet d'obtenir des produits lourds sans chauffer démesurément le résidu de distillation atmosphérique.

Un vide, de quelques dizaines de millimètres de mercure, est obtenu à l'aide d'un système d'éjecteurs. L'opération est menée jusqu'à obtention des caractéristiques désirées pour les différents produits de distillation.

La distillation sous vide permet d'éliminer les constituants volatils sans modification importante des structures chimiques. Les propriétés du bitume ainsi fabriqué dépendent alors directement du type de brut utilisé.

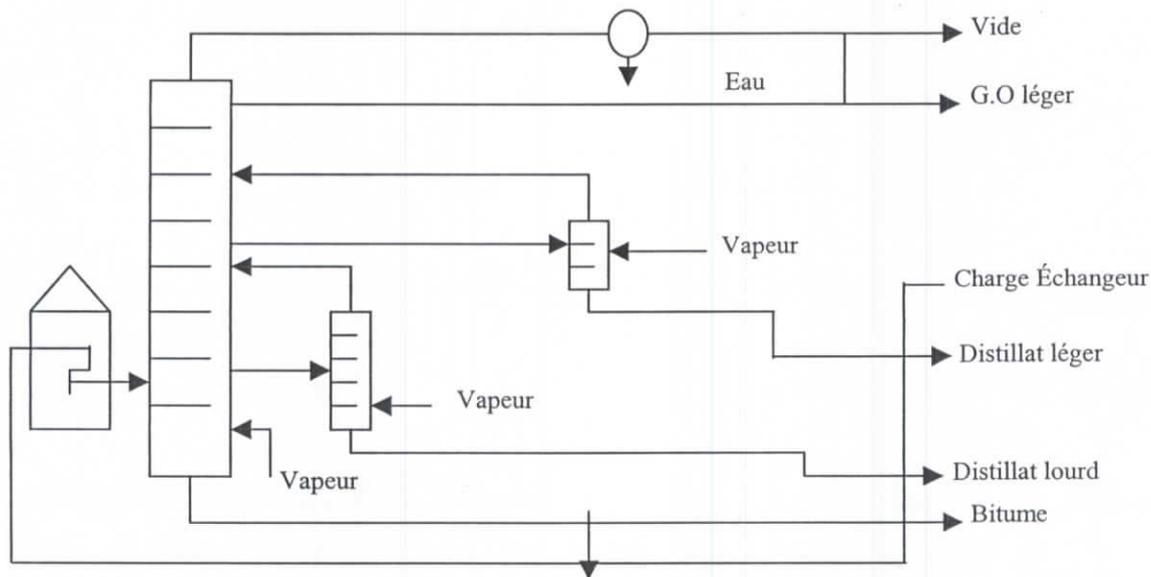


Figure II.2 : Schéma d'une unité de distillation sous vide

2-Soufflage :

Le résidu de distillation atmosphérique, trop mou pour constituer un bitume routier, est durci par oxydation. Dans cette opération qui se fait à haute température (environ 240-250°C), de l'air est introduit à la base de la colonne, à contre-courant de la charge bitumineuse. L'oxygène de l'air provoque une déshydrogénation des molécules carbonées pour former des groupements hydroxyles, carboxyles, acides et esters. Ces groupements fonctionnels se lient entre eux par des liaisons hydrogènes et provoquent un durcissement du bitume.

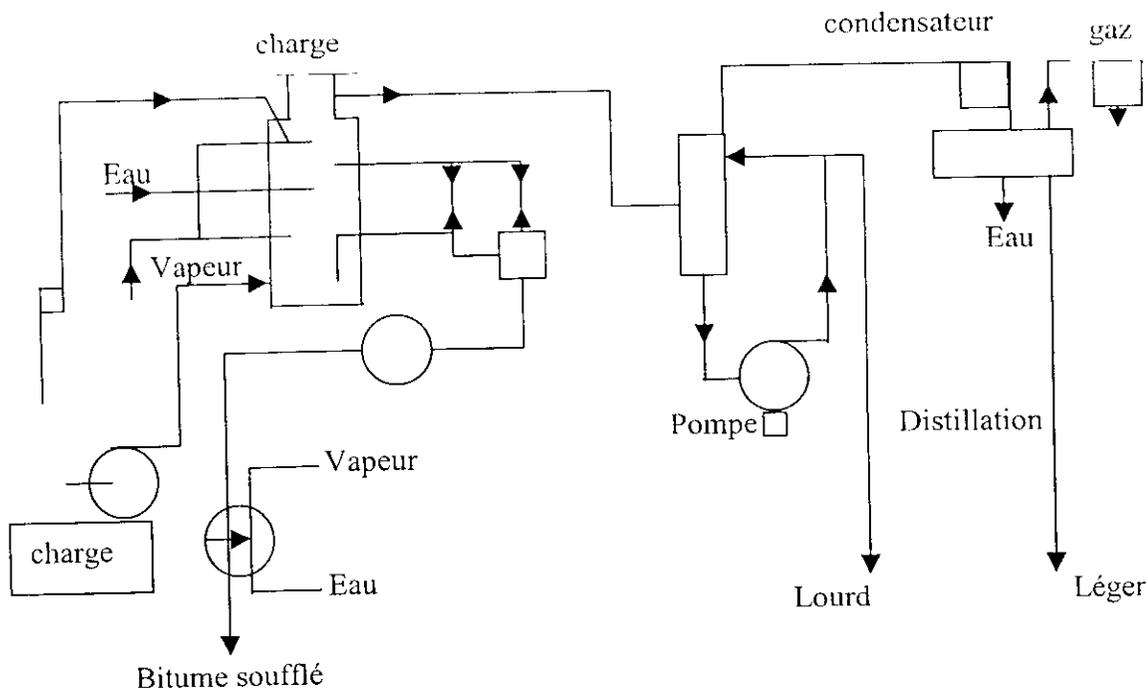


Figure III.3 : Schéma d'une unité de soufflage

Le soufflage d'air, en présence de catalyseurs (FeCl_3 , P_2O_5) permet d'accélérer le procédé et d'améliorer certaines caractéristiques.

Les bitumes soufflés ne sont pas utilisés comme bitumes routiers, mais comme produits d'étanchéité.

Les caractéristiques désirées pour un bitume routier peuvent également être obtenues par semi soufflage. Ce procédé consiste à mélanger une base molle issue d'un résidu sous vide et une base dure obtenue par soufflage.

3-Extraction

Ce procédé est encore appelé « précipitation » ou « désasphaltage ». Il s'agit ici d'une séparation physique des constituants des résidus sans modifications de leur structure chimique.

Le principe de la méthode est fondé sur la différence de solubilité des composés du résidu sous vide vis à vis de certains solvants.

Le désasphaltage au solvant est employé comme complément dans le raffinage des bruts à l'huile.

A partir d'une fraction pétrolière choisie, on obtient par séparation par solvant le bitume désiré.

Les solvants utilisés sont des solvants non polaires de bas poids moléculaire comme le n-propane et le n-butane qui présentent la meilleure sélectivité vis à vis du bitume. Les paramètres qui déterminent le choix du solvant sont :

- La tension de vapeur qui conditionne la solubilité de la fraction lubrifiante.
- La susceptibilité à la température de la densité qui assure le rendement de la précipitation de la fraction bitumineuse.

Il est alors possible d'obtenir des bitumes de caractéristiques différentes en faisant varier la nature du fond de distillation sous vide (degrés d'épuisement) et les conditions de fractionnement de l'unité de désasphaltage, notamment la pression.

II.7- CLASSIFICATION DES BITUMES :

les bitumes sont répartis en cinq classes en fonction de leur pénétrabilité à 25°C [1]:

- Bitume 20-30 : très dur
- Bitume 35-50 : dur
- Bitume 50-70 : semi-dur
- Bitume 70-100 : mou
- Bitume 180-220 : très mou

Il est à noter que les classes les plus utilisées en Algérie sont : 35/50 et 70/100.

II.8- IDENTIFICATION DES BITUMES :

L'identification chimique d'un bitumes passe par la détermination qualitative et quantitative de ses constituants principaux ou groupes génériques (saturés, aromatiques, résines, et asphaltènes). Par ailleurs, il est tout aussi impératif de savoir

apprécier la façon dont ces molécules vont s'associer pour former un édifice spatial tridimensionnel qu'on appelle structure et qui donne au bitume ses propriétés physiques et mécaniques qu'on peut déterminer à l'aide de quelques essais à savoir:

II.8.1- Pénétrabilité à l'aiguille [25]:

La pénétration d'un liant est l'expression de la profondeur à laquelle pénètre une aiguille type, de dimensions déterminées, dans un échantillon de bitume sous des conditions définies de charge, de temps et de température (100 grammes, 5 secondes et 25°C). Cet essai permet de déterminer la classe du bitume testé.

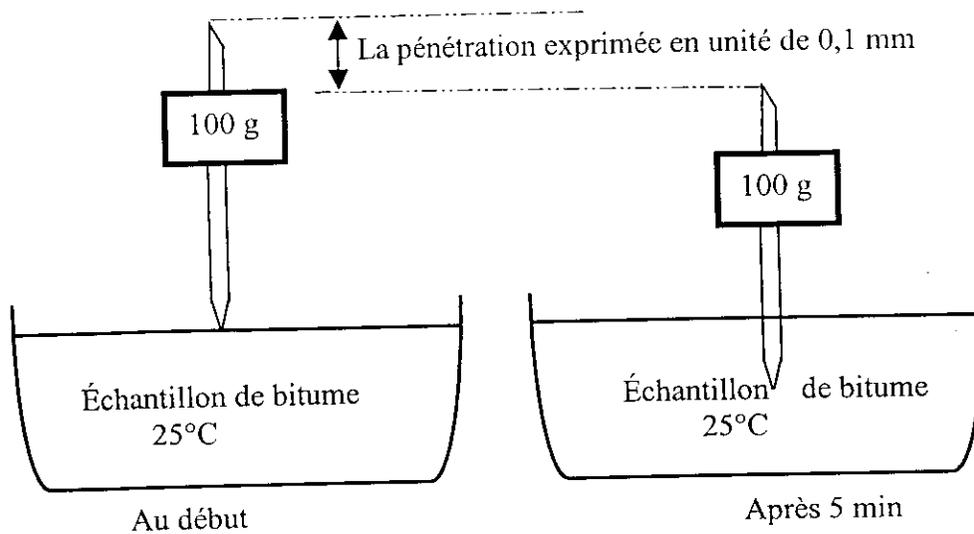


Figure III.4: l'essai de pénétrabilité à l'aiguille

II.8.2- Température de ramollissement bille et anneau [26] :

Le point de ramollissement est la température à laquelle un produit bitumineux atteint un certain degré de ramollissement dans des conditions normalisées.

L'essai s'effectue à l'aide d'une bille en acier, d'une masse déterminée, et qui est placée sur une prise d'essai du produit, contenue dans un anneau de métal de dimensions normalisées. L'ensemble est chauffé à une vitesse constante déterminée. La température à laquelle la prise devient assez molle pour que la bille, ayant pénétré le produit bitumineux, tombe d'enveloppe dans celui-ci, d'une hauteur déterminée, est prise comme le point de ramollissement du produit étudié.

II.8.3- Essai de fragilité FRAASS:

Cet essai, qui ne fait l'objet d'aucune norme, donne la température T_{FR} à laquelle une fissure apparaît dans un film de bitume étalé sur une plaque métallique, refroidie et soumise à la flexion.

Cet essai, le seul utilisé à basse température, se situe dans le domaine solide-fragile.

$$(-30^{\circ} \text{ C} \leq T_{FR} \leq 0^{\circ} \text{ C}).$$

II.8.4- Mesure de la densité relative A 25° C :

La densité relative d'un bitume, qui varie avec la température, est déterminée, à 25° C, par la méthode du pycnomètre, comme étant le rapport de la masse d'un volume donné de bitume à la masse d'un volume égal d'eau.

II.8.5- Perte de masse au chauffage :

L'essai consiste à chauffer, dans une étuve ventilée pendant 5 heures à une température de 163°C, une couche de matériau bitumineux.

On détermine, par cette méthode, l'effet de la chaleur et de l'air sur le bitume en appréciant la réduction de la pénétrabilité et la variation de la masse de l'échantillon.

II.8.6- Essai de ductilité :

La ductilité d'un matériau bitumineux est l'allongement qui le caractérise avant qu'il se rompe, lorsqu'on l'étire, à une vitesse spécifiée et à une température donnée. La vitesse de l'essai est de 5 cm/min \pm 5%.

II.8.7- Point d'éclair- point de flamme :

le point d'éclair du bitume indique la température à laquelle le matériau peut être chauffé en toute sécurité sans danger d'un éclair instantané en présence d'une flamme. Cependant cette température est ordinairement bien en dessous de celle à

laquelle le matériau brûlera. Cette dernière est appelée « point de feu » mais elle est rarement incluse dans les spécifications sur les bitumes.

Le point d'éclair d'un bitume est mesuré à l'aide de l'appareil Cleveland à vase ouvert ; un vase de laiton est partiellement rempli de bitume et est chauffé à un taux déterminé. Une petite flamme est amenée au dessus de la surface de l'échantillon périodiquement, puis on note la température à partir de laquelle il y aura assez de dégagements de vapeurs pour produire un éclair instantané. Cette température sera désignée comme étant le point d'éclair.

II.8.8- Essais de vieillissement :

Les essais de vieillissement sont utilisés pour savoir l'évolution du bitume au cours de son enrobage (mise en œuvre) et une fois dans la chaussée. Deux principaux essais sont utilisés :

- Thin Film Oven Test (Essai d'étuvage en couche mince):

Cet essai consiste à étuver pendant 5 heures à une température de 163°C, un film de liant de 3,2 mm d'épaisseur.

Cette condition de vieillissement correspond en pratique à un an de vieillissement sur la route.

- Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) :

Il consiste à étuver 35 g de bitume contenu dans une fiole cylindrique animée d'un mouvement de rotation autour de son axe horizontal pendant 75 min, à une température de 163°C en présence d'oxygène.

Le bitume incorporé dans un mélange hydrocarboné subit deux types de vieillissement :

- Rapide à la construction
- Lent durant sa vie dans la route.

CHAPITRE III

EMPLOI D'ADDITIFS DANS LES ENROBES BITUMINEUX

III.1- INTRODUCTION

Le bitume, lorsque son grade est bien choisi pour le produit bitumineux concerné (béton 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 des 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 qui exigent un investissement plus durable dans le temps et des couches de plus en plus minces, 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 granularité continue, grenu ou semi-grenu) d'assurer dans tous les cas une résistance à l'orniérage satisfaisante sous trafic très lourd et canaliser pour des températures durablement élevées ;
- Un bitume plus dur s'il apporte à l'enrobé un meilleur comportement à l'orniérage (avantage à hautes températures) accroît à l'inverse le risque 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.

III.2- HISTORIQUE DES ENROBÉS MODIFIÉS.

III.2.1- Les premiers pas dans les enrobés modifiés

Les recherches d'amélioration des propriétés du béton bitumineux, soit par modification de la structure du liant soit par ajout d'additifs sont anciennes [4]. 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.

III.2.2- Période de l'essor effectif.

Vers la fin des années 50, aux États Unis, on relève la réalisation de liants modifiés par les caoutchoucs incorporés sous forme de latex [4].

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 ce n'est qu'en 1972 que la première application a eu lieu sur un pont à dalles orthotropes avec un bitume modifié aux polymères.

III.2.3- Les nouvelles techniques routières avec liant modifié et additifs

Le développement des enrobés par l'utilisation de bitumes modifiés ou par emploi d'additif est intimement lié à la mise en œuvre de nouvelles formules d'enrobés bitumineux de couche de surface de faible épaisseur, offrant de meilleures qualités en terme d'usage et de durabilité. C'est tout un ensemble de techniques de chaussées qui s'industrialisera dans les années 80.

Ce sont ces techniques qui ont conduit à la mise en place des bétons bitumineux minces (BBM) avec une épaisseur de 3 à 4 cm et des bétons bitumineux très minces (BBTM) avec une épaisseur de 2 à 3 cm et même des bétons bitumineux ultra minces (BBUM) avec une épaisseur de 1 à 2 cm.

L'emploi des bitumes modifiés s'est généralisé pour les chaussées fortement circulées et autoroutières; les bitumes purs restent toujours employés pour chaussées à trafic modéré.

Une autre technique est aussi apparue, celle des membranes anti-fissures en couches intermédiaires minces et des 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 les années 80 que seront mis au point les liants de synthèse pigmentables permettant la réalisation de revêtements de chaussées de couleurs

variées, ce qui apporte de nouvelles solutions pour les aménagements urbains et de sécurité.

III.3- EMPLOI D'ADDITIFS DANS LES ENROBES BITUMINEUX

Comme son nom l'indique, 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 caractéristiques séparées de l'ensemble liant et additif ; l'effet de l'additif est apprécié directement sur le mélange bitumineux.

III.3.1- Les différents additifs

Des additifs de différentes natures peuvent être utilisés afin de modifier les caractéristiques des mélanges bitumineux, enrobé ou enduit superficiel ; ils 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,

III.3.2- Addition de polymère en centrale

Ne sont considérés ici que les polymères incompatibles avec les bitumes, c'est à dire ne permettant pas de fabriquer un mélange bitumineux présentant une stabilité suffisante pour son utilisation comme bitume modifié, la fabrication de ce dernier nécessite d'assurer le gonflement des polymères par les maltènes du bitume, Le mélange préalable étant impossible, il reste donc la possibilité d'un ajout direct du polymère dans le malaxeur de la centrale d'enrobage [4].

Il est important de souligner ici que cet ajout ne doit pas être confondu avec la notion des bitumes modifiés, même si le processus de fabrication entraîne la fusion du polymère. En effet, dans ces cas d'addition, les polymères recristallisent pendant la

phase de refroidissement pour former une dispersion, éventuellement un réseau fibreux plus au moins homogène et continu; ces polymères ne se combinent pas, ou très peu, avec certaines fractions de bitume.

Même si on assiste parfois à l'addition des polymères compatibles avec le bitumes (élastomères et plastomères utilisés pour la fabrication des bitumes modifiés) dans la centrale ; Cet ajout ne doit pas être assimilé à la fabrication d'un liant modifié mais plutôt comme l'effet d'un additif. Cela revient au temps insuffisant de mise en contact entre le polymère et le bitume (l'opération de fabrication du bitume modifié nécessite plusieurs heures tandis que le malaxage de l'enrobé se fait en quelques minutes). ceci donne une idée sur la quantité ajoutée qui va être nettement supérieure au pourcentage du polymère dans le bitume modifié.

III.3.3- Matières plastiques recyclées [7] :

En considérant que pour en faire un matériau de chaussée, on ne peut utiliser un matériau noble, des études ont été axées sur des produits inutilisables par ailleurs, parce que constituées de mélanges de plastiques non recyclables tels quels ou de matières polluées.

Il est à signaler que l'idée d'employer des matériaux plastiques recyclées pour accroître la rigidité des mélanges est presque aussi ancienne que le développement de bitumes polymères.

La récupération des déchets en matières plastiques est courante dans plusieurs pays développés; des milliers de tonnes de déchets sont recyclées chaque année. Les matières les plus récupérées sont les déchets de câbles téléphoniques et les polyoléfines

III.3.4- les granulats de caoutchouc

L'utilisation de granulats de caoutchouc recyclé comme additif dans les enrobés bitumineux est une idée explorée depuis une trentaine d'années dans les pays développés, avec comme objectif secondaire éliminer des pneumatiques usagés et donner un aspect environnemental à la démarche.

Ces granulats de caoutchouc sont généralement de dimensions faibles avec un diamètre ne dépassant pas 2mm.

III.3.5- Les fibres

Les fibres sont utilisées comme additif dans les enrobés bitumineux depuis une vingtaine d'années. Après une période d'expérimentation, l'emploi de fibres en construction routière est devenue une technique industrielle dans de nombreux pays développés comme la France, la Suède, la Pologne, le Canada, l'Autriche, l'Allemagne et autres.

Les fibres d'une manière générale peuvent être classées en deux groupes selon leur origine :

- **Naturelles:** Ce sont des matériaux bruts quelconques sous forme de cheveux que l'on obtient directement à partir d'un animal, d'un végétal ou d'un minéral
- **Fabriquées :** Elles peuvent être soit - synthétiques (polyester, polyéthylène, polypropylène, acrylique) ou minérales et métalliques (verre, roche, acier)

Elles sont obtenues par modification des matériaux naturels comme les fibres cellulosiques, fabriquées à partir de verre ou d'acier, ou par synthèse chimique.

III.3.6- Bitumes et asphaltes naturels

Ce sont des matériaux présents dans le sol à l'état natif, qui se distinguent par leur nature :

- **les bitumes naturels :** Ce sont des hydrocarbures lourds contenant en mélange des fines en proportions très variables selon les gisements.

Ex : bitume de Trinidad

- **Les asphaltes naturels :** Ce sont des roches naturellement imprégnées de bitume. Après broyage, la poudre d'asphalte naturelle est principalement utilisée dans la fabrication de formulations variées d'asphalte coulé pour étanchéité et voirie.

Ex : Gilsonite

III.4- Autres techniques pour modifier un béton bitumineux

III.4.1- bitumes modifiés

Les liants modifiés sont 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 [34]. Il s'agit d'un liant préfabriqué soit dans une usine soit par une unité mobile spécialisée. Le liant ainsi modifié peut être caractérisé séparément du mélange bitumineux.

Les différents agents modifiants

- **Polymères thermoplastiques élastomères**

- copolymère styrène- butadiène- styrène (SBS)
- copolymère styrène- isoprène- styrène (SBS)
- styrène- butadiène (SB)
- copolymère statistique styrène- butadiène (SBR)

- **polymères thermoplastiques plastomères**

- copolymère éthylène- acétate de vinyle (EVA)
- copolymère éthylène- acrylate de méthyle (EMA)
- copolymère éthylène- acrylate de butyle (EBA)
- polyisobutylène (PIB)

III.4.2- bitumes spéciaux

On qualifie de bitumes spéciaux, les bitumes issus de procédés particuliers de raffinage et qui, par certaines de leurs caractéristiques, forment une classe relativement nouvelle de produits bitumineux pour lesquels il n'y a pas de spécifications communément admises.

Les différents types de bitumes spéciaux

- les bitumes durs, les bitumes multigrades, les bitumes et liants de synthèse pigmentables et les émulsions spéciales.

III.5- Les effets de l'adjonction des additifs (déchets recyclés) au béton bitumineux (mécanisme de la modification)

L'adjonction d'un additif dans un béton bitumineux peut conduire à trois effets selon, sa nature chimique, sa taille et ses caractéristiques physiques (point de fusion, ténacité, etc...)

- 1- Un effet sur le liant dû à l'augmentation de la viscosité du bitume par dissolution vraie de certaines matières, ou dispersion à l'état fondu.
- 2- Un effet bloquant dû aux grains ramollis provisoirement pendant la mise en œuvre, de taille courte et qui vont être thermoformés lors du compactage pour remplir les vides du squelette granulométrique.
- 3- Un effet d'armature provoqué par les lanières ou les fibres encore suffisamment rigides et suffisamment longues, pour créer des ponts à l'intérieur du squelette granulométrique.

Ces trois effets, seuls ou cumulés, conduisent à un matériau hydrocarboné nettement moins sensible à la température et donc moins sensible aux déformations par fluage.

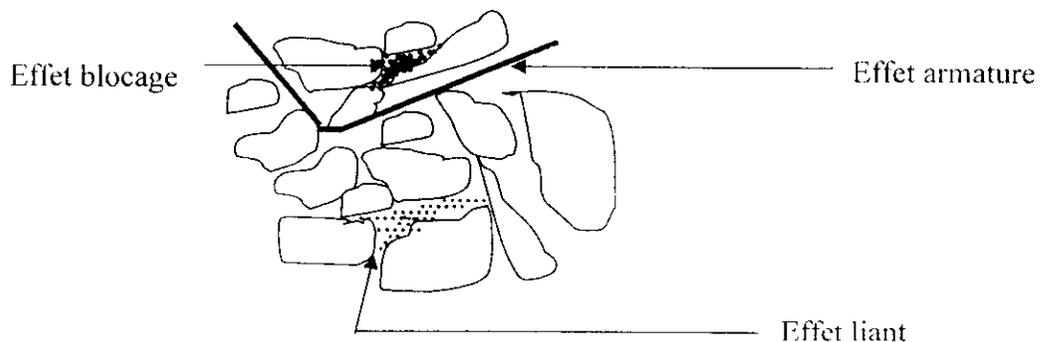


Figure III.1: effets de l'adjonction des additifs au béton bitumineux

IV- IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX

IV.1- INTRODUCTION :

La formulation d'un enrobé bitumineux passe en premier lieu par le choix des matériaux utilisés. Ainsi la technique de formulation d'un enrobé bitumineux consiste, à partir des données qu'on a sur les matériaux, à choisir les proportions des différentes fractions de granulats et de vérifier la teneur en liant adéquate .

Une formulation d'un enrobé bitumineux passe par les étapes suivantes:

- Choisir la granulométrie de l'ossature plus ou moins serrée (continue).
- Rechercher la quantité du liant nécessaire pour enrober les granulats sans qu'il y'ait excès de liant qui pourrait conduire à un enrobé trop visqueux.

IV.2- DÉFINITIONS ET RAPPELS THÉORIQUES :

IV.2.1- Teneur en liant (PI):

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

$$PI = k.\alpha.(\Sigma)^{1/5} \quad \text{avec :}$$

IV.2.2- coefficient correcteur (α) :

C'est un coefficient correcteur de la masse volumique réelle des granulats .

$$\alpha = 2,65/MV_r$$

MV_r : Masse volumique réelle des granulats

IV.2.3- Surface spécifique conventionnelle (Σ):

Elle est en m^2/kg , et dans laquelle interviennent les pourcentages pondéraux des éléments:

$$100 \Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f \quad \text{avec:}$$

- G: éléments supérieurs à 6,3 mm ;
- S: éléments compris entre 6,3 mm et 0,315 mm ;
- s: éléments compris entre 0,315 mm et 0,08 mm ;
- f: éléments inférieurs à 0,08mm ;

IV.2.4- Module de richesse (k):

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

IV.3- PRESENTATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

IV.3.1-LES BITUMES

IV.3.1.1-prélèvement

Deux classes de bitume ont été utilisées à savoir le bitume 35/50 et le bitume 70/100. Leur prélèvement a été effectué respectivement à partir du laboratoire central de la Société Nationale des grands Travaux Routiers (SONATRO), et de l'Entreprise des Liants Routiers d' Alger (ELIROA).

IV.3.1.2-Essais de caractérisation :

Les essais d'identification des bitumes utilisés pour les différentes formulations sont :

- Essai de pénétrabilité à l'aiguille : [25]

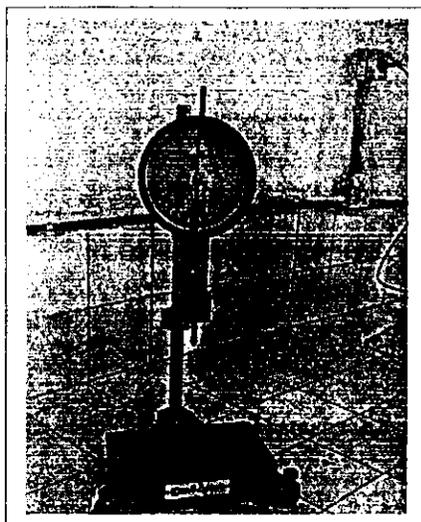


Figure IV-1 : Pénétromètre

Tableau IV-1 : résultats de l'essai de pénétrabilité à l'aiguille

Classe du bitume	Pénétrabilité à l'aiguille (1/10 mm)
35/50	42
70/100	85

- Essai du point de ramollissement (bille et anneau) : [26]

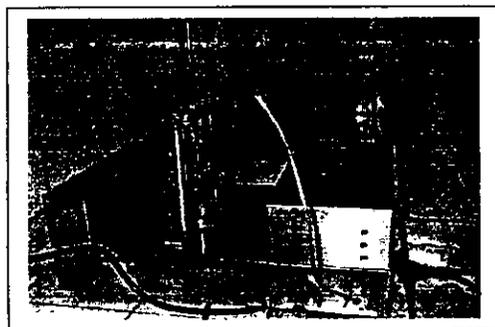


Figure IV-2 : Appareil de mesure du point de ramollissement bille et anneau

Tableau IV-2 : résultats de l'essai du point de ramollissement bille et anneau

Classe du bitume	Température de ramollissement (°C)
35/50	58
70/100	55

- Essai du point d'éclair et du point de flamme :



Figure IV-3 : Appareil de mesure de point d'éclair et point de flamme

Tableau IV-3 : résultats de l'essai du point d'éclair et point de flamme.

Classe du bitume	Point d'éclair (°C)	Point de flamme (°C)
35/50	268	314
70/100	260	333

Conclusion: les résultats des essais de caractérisation des bitumes confirment bien les classes des bitumes utilisés à savoir le 35/50 et le 70/100.

IV.3.2-les matériaux granulaires

IV.3.2.1-prélèvement

Pour effectuer cette étude deux types de granulats ont été utilisés, l'un en provenance de la carrière de Cap Djinet (Boumerdes) et l'autre en provenance de la Carrière Jobert (Alger). Leur prélèvement a été fait à partir du poste d'enrobage de la Société Nationale des grands Travaux Routiers (SONATRO) à Oued-Smar pour le premier et à partir du chantier de l'Entreprise Nationale des grands Ouvrages d'Art (ENGOA) à El-Mohammadia.

IV.3.2.2-Essais de caractérisation

Pour identifier les granulats utilisés et s'assurer qu'ils répondent aux recommandations et spécifications pour leur utilisation en technique routière, on a effectué les essais suivants :

- **Poids spécifique : [19]**

Tableau IV-4 : résultats de l'essai du poids spécifique

Fraction	Agrégats de cap Djinet	Agrégats de la Carrière Jobert
0/3	2.50	2.75
3/8	2.68	2.70
8/15	2.60	2.68

- Équivalent de sable (ES) : [21]

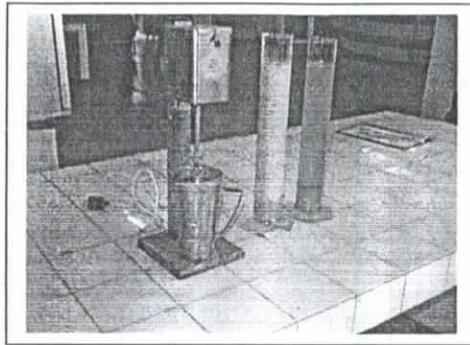


Figure IV.4: Essai d'équivalent de sable

Tableau IV-5 : résultats de l'essai d'équivalent de sable.

Fraction	Agrégats de cap djinet	Agrégats de la carrière jobert
0/3	55.61	63.21

- Essai Los Angeles : [22]

Tableau IV-6 : résultats de l'essai Los Angeles.

Fraction	Agrégats de cap djinet)	Agrégats de la carrière jobert
3/8	20.00	18.61
8/15	16.18	19.42

- Essai Micro-Deval Humide :[23]

Tableau IV-7: résultats de l'essai Micro-Deval Humide.

Fraction	Agrégats de cap djinet	Agrégats de la carrière jobert
3/8	21.83	15.82
8/15	19.26	17.61

- Valeur au bleu de méthylène : [24]

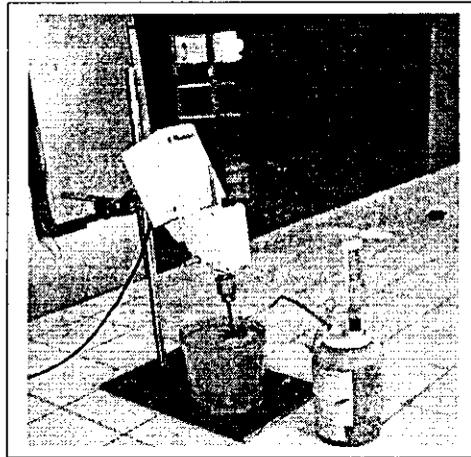


Figure IV.5: Essai au bleu de Méthylène

Tableau IV-8 : résultats de l'essai de bleu de méthylène.

Fraction	Agrégats de cap djinet	Agrégats de la carrière jobert
0/3	0.55	0.17

- Analyse chimique :

Tableau IV-9: résultats de l'analyse chimique des agrégats.

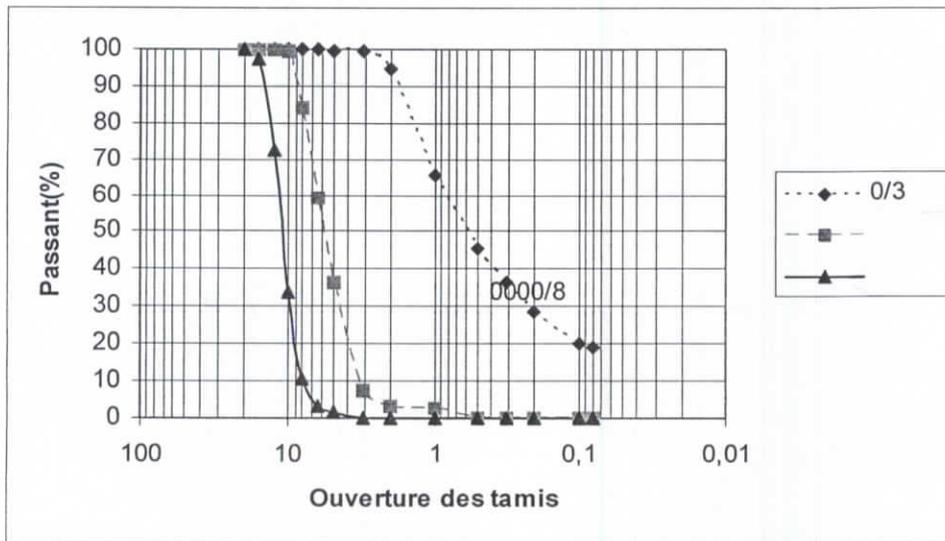
Échantillon	Jobert	Cap Djinet
Insolubles (SiO_2 + Silicates)	4.37 %	70.12 %
Oxyde de fer et d'aluminium (Fe_2O_3 + Al_2O_3)	1.32 %	20.40 %
Gyps ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$)	Traces	Traces
Chlorures (NaCl)	0.17 %	0.12 %
Carbonates (CaCO_3)	94.01 %	6.83 %
Anhydrite carbonique CO_2	4.136 %	3.00 %
Perte au feu PF	4.163 %	4.85 %
Eau de constitution	0.27 %	1.85 %

Commentaire : L'analyse chimique confirme la nature minéralogique des granulats utilisées (calcaires pour la carrière Jobert et basalte pour la carrière de Cap Djinet)

▪ Analyse granulométrique [18]:

L'Analyse granulométrique nous permet de déterminer les dimensions, ainsi que la distribution des différents grains. et cela à l'aide d'une série de tamis utilisée pour chaque fraction granulaire.

1- Agrégats de cap djinet :



- Formule retenue :

- Sable 0/3: 36%
- Gravillon 3/8: 28%
- Gravier 8/15: 36%

Surface spécifique est de 11.02 m²/kg

Pour déterminer la teneur optimale en liant, on effectue des essais Marshall pour des enrobés non modifiés confectionnés avec les différentes teneurs en bitume :

Tableau IV-10: Détermination de la teneur optimale en bitume: Agrégats de Cap
Djinet

Teneur en bitume : %	Module de richesse : k
5.57	3.45
5.82	3.60
6.06	3.75
6.30	3.90

Résultats des essais préliminaires pour déterminer la teneur optimale en bitume :

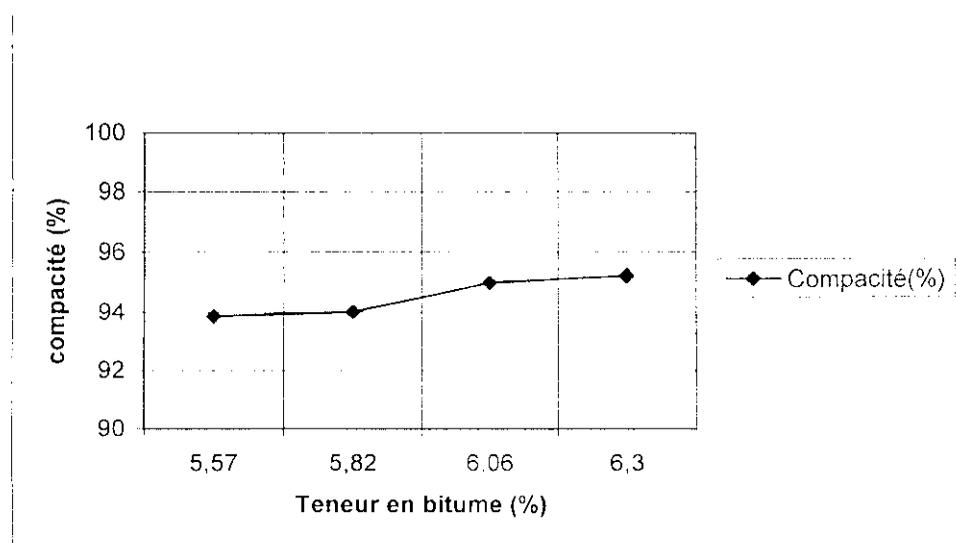


Figure IV.8: variation de la compacité Marshall en fonction de la teneur en bitume

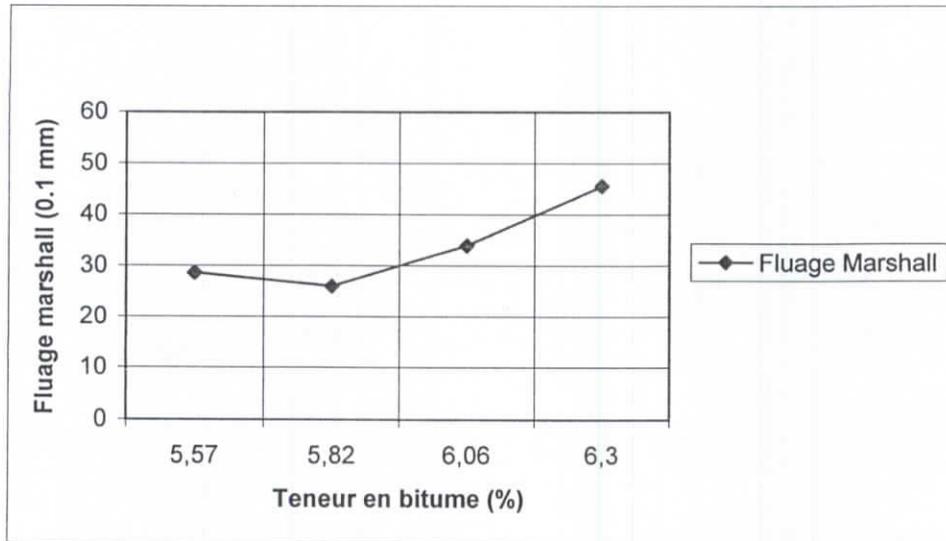


Figure IV.9: variation du fluage Marshall en fonction de la teneur en bitume

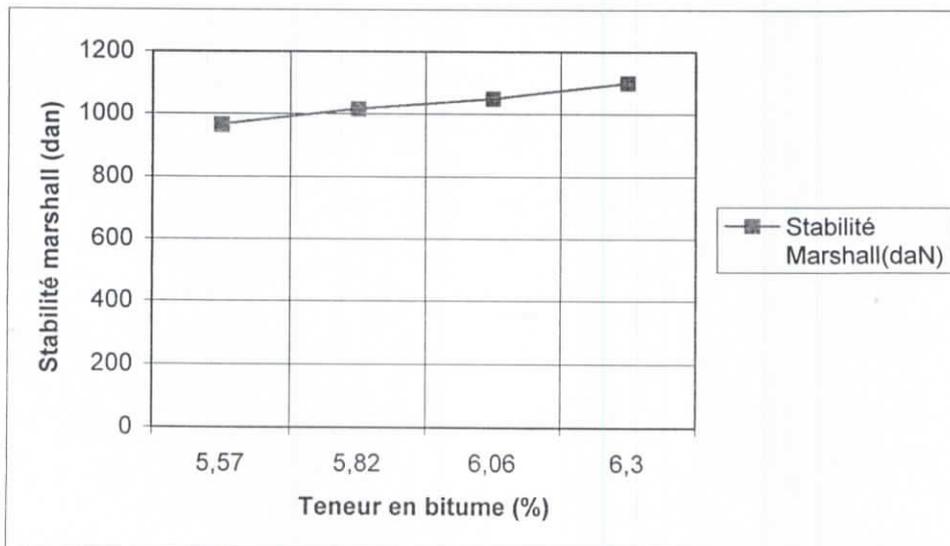


Figure IV.10: variation de la stabilité Marshall en fonction de la teneur en bitume

- La stabilité Marshall est maximale pour une teneur en bitume de 6.30 %
- Le fluage Marshall est minimal pour une teneur en bitume de 5.82 %
- la compacité est maximale pour une teneur en bitume de 6.30%

on prendra une teneur optimale en bitume de 6.14 %

2- Agrégats de la Carrière Jobert :

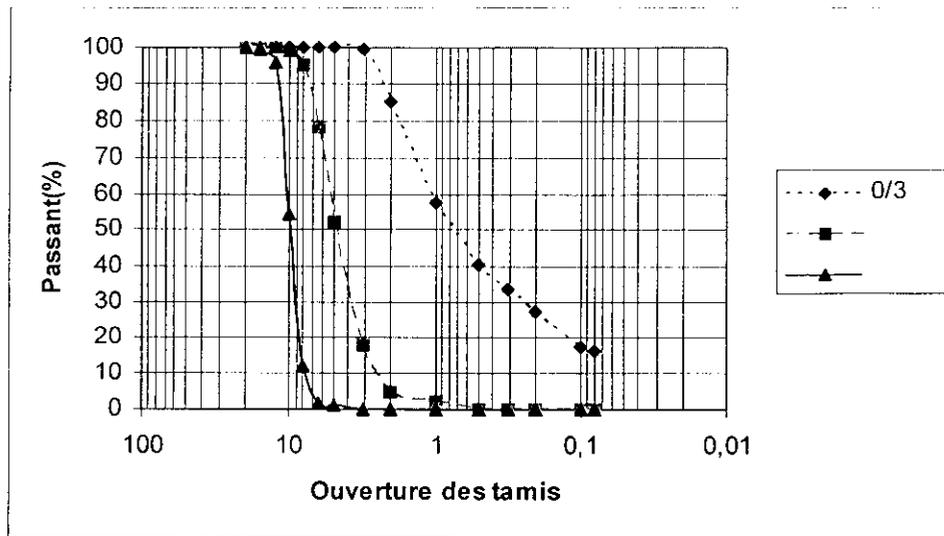


Figure IV-11: Courbe granulométrique pour les agrégats de la Carrière Jobert

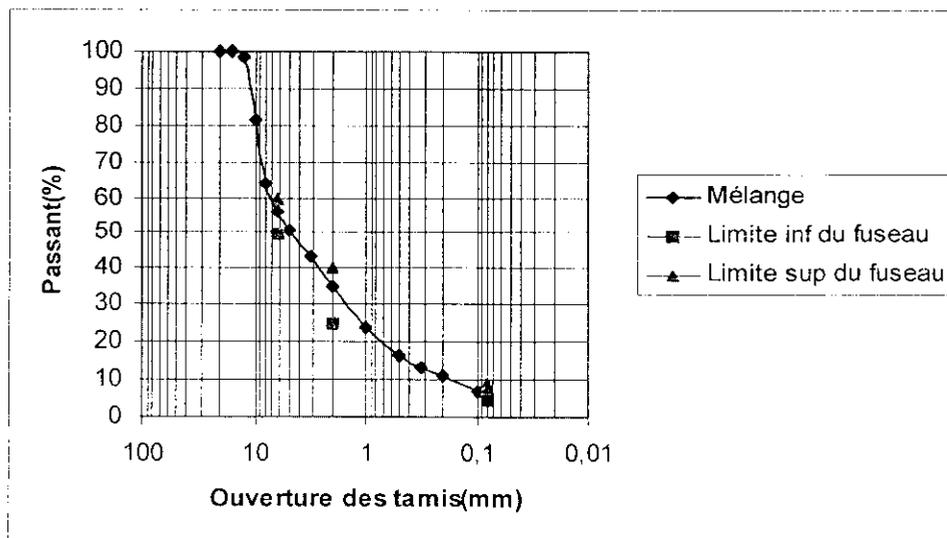


Figure IV.12: Courbe du Mélange pour les agrégats de la Carrière Jobert

- Formule retenue :

Sable 0/3: 40%

Gravillon 3/8: 20%

Gravier 8/15: 40%

- Surface spécifique est de $10.69 \text{ m}^2/\text{kg}$

De même, on détermine la teneur optimale en liant en effectuant des essais Marshall pour des enrobés confectionnés avec différentes teneur en bitume :

Tableau IV-11: Détermination de la teneur optimale en bitume : agrégats de la carrière Jobert

Teneur en bitume : %	Module de richesse : k
5.54	3.45
5.78	3.60
6.02	3.75
6.28	3.90

Résultats des essais préliminaires pour déterminer la teneur optimale en bitume :

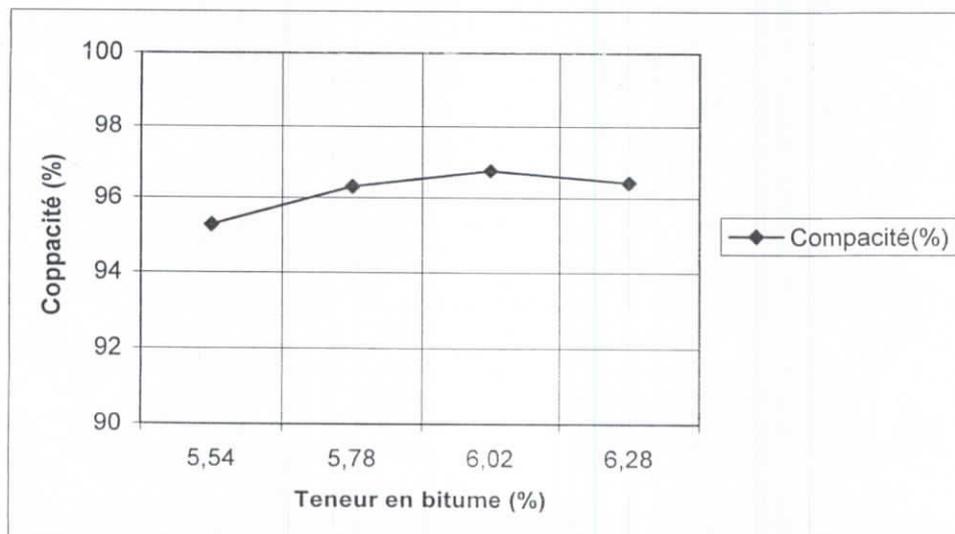


Figure IV.13: variation de la compacité Marshall en fonction de la teneur en bitume

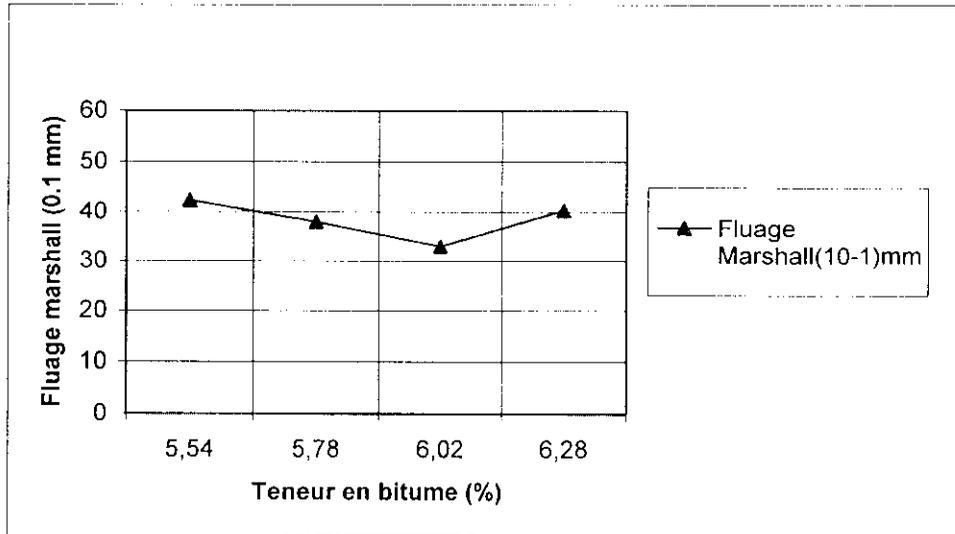


Figure IV.14: variation du fluage Marshall en fonction de la teneur en bitume

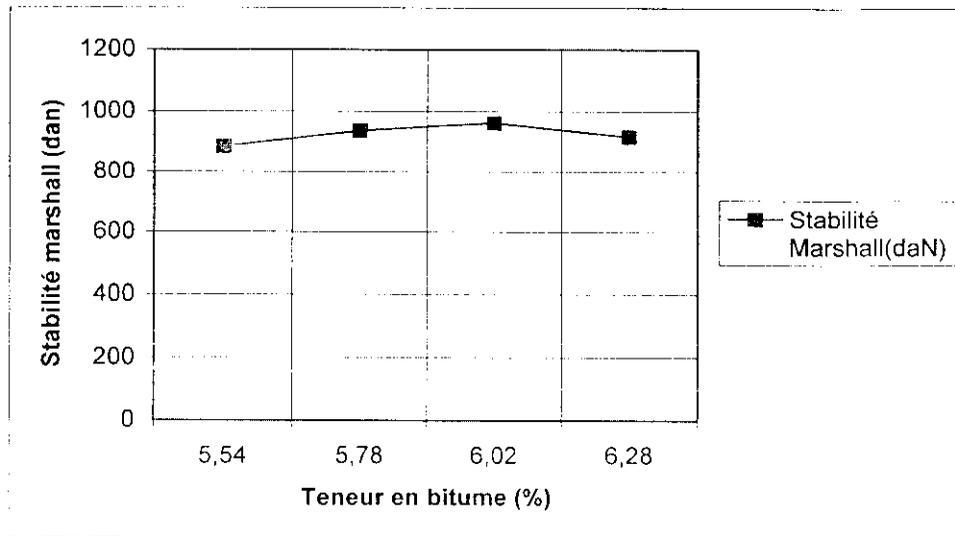


Figure IV.15: variation de la stabilité Marshall en fonction de la teneur en bitume

- La stabilité Marshall est maximale pour une teneur en bitume de 6.02 %
- La stabilité Marshall est maximale pour une teneur en bitume de 6.02 %
- La stabilité Marshall est maximale pour une teneur en bitume de 6.02 %

On prendra une teneur optimale en bitume de 6.02 %

IV.3.3- L'ADDITIF (POUDRETTE DE CAOUTCHOUC) :

L'additif en question est une poudrette de caoutchouc qui est fournie par la Société d'Application d'Élastomère (SAEL) sise dans la zone industrielle de Oued-Smar (Alger). Cette poudrette, utilisée comme ajout dans le squelette solide du béton bitumineux, est un déchet qui provient du broyage de chutes du caoutchouc utilisé dans la fabrication de tapis de voitures. Ces chutes sont réduites en poudrette de taille égale à 2 mm maximum ; la densité est de 0.8.

V.1- L'OBJECTIF DU TRAVAIL :

L'objectif essentiel de ce présent travail est d'essayer d'améliorer les performances mécaniques d'un béton bitumineux par ajout de différentes quantités de poudrette de caoutchouc ; on fait varier la nature minéralogique des granulats ainsi que la classe du liant. Le choix des matériaux a porté sur les plus utilisés en Algérie à savoir les bitumes durs ainsi que les types de granulats existant au niveau des carrières exploitées dans la région du centre du pays.

Après avoir fait les essais d'identification des constituants, nous avons procédé à la formulation de l'enrobé et sa correction par ajout de poudrette de caoutchouc sur la formulation de base. La teneur en poudrette varie de 0 % à 4 % avec un pas de 1 %.

Pour tester les différentes formulations, des éprouvettes Marshall et Duriez ont été confectionnées au laboratoire dans le but de voir l'impact de la poudrette de caoutchouc incorporée directement dans le squelette granulaire; et d'étudier son influence sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé en les comparant à celles de l'enrobé de base.

C'est dans le but d'avoir une vision un peu large sur cette amélioration qu'on a jugé utile de varier la classe du bitume ;

En partant des données et connaissances théoriques préalables, en introduisant directement la poudrette dans le mélange, une partie sera fusionnée dans le bitume et l'autre jouera le rôle des fillers.

On cherche aussi à confirmer l'effet de la poudrette de caoutchouc sur l'amélioration de l'adhésivité du couple liant- granulats pour une roche acide (basalte de Cap Djinet) donnant habituellement des résultats moyens voire faibles.

Dans tout le travail on a axé notre étude sur les caractéristiques mécaniques à savoir : la compacité, la résistance mécanique, la tenue à l'eau et le fluage.

V.2- DESCRIPTION DES ESSAIS :

La partie expérimentale de ce travail a été réalisée dans sa majeure partie au sein du laboratoire central de la société nationale des grands travaux routiers (SONATRO).

Quelques essais notamment l'identification chimique ainsi que les essais préliminaires ont été effectués au niveau du laboratoire central des travaux publics (LCTP).

L'essai de fluage statique a été réalisé au laboratoire routes et aérodromes de la faculté Génie Civil de l'université des Sciences et Technologies Houari Boumediene (USTHB).

Les matériaux et les moules utilisés pour le confectionnement des éprouvettes Marshall et Duriez sont chauffés dans l'étuve aux températures suivantes :

- 160 °C avec l'emploi du bitume 35/50.
- 140 °C avec l'emploi du bitume 70/100.



Figure V.1: Moules Duriez

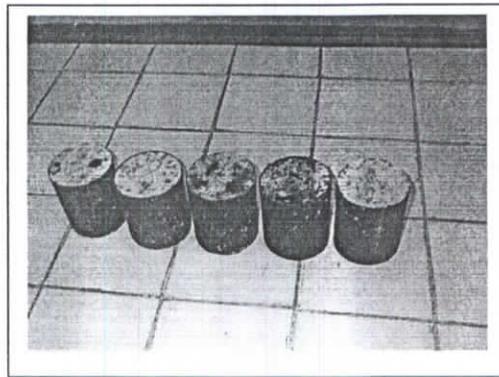


Figure V.2: Éprouvettes duriez

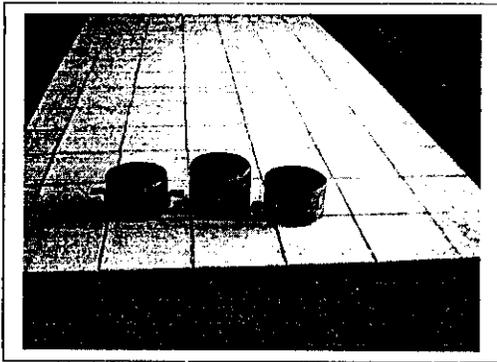


Figure V.3: Moules Marshall

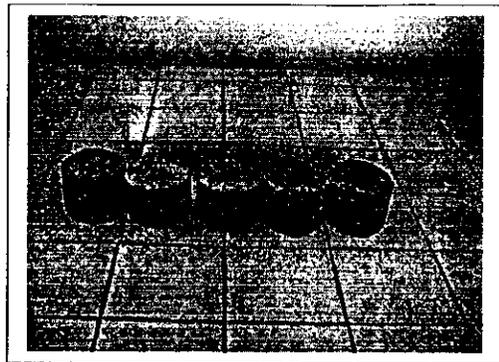


Figure V.4: Éprouvettes Marshall

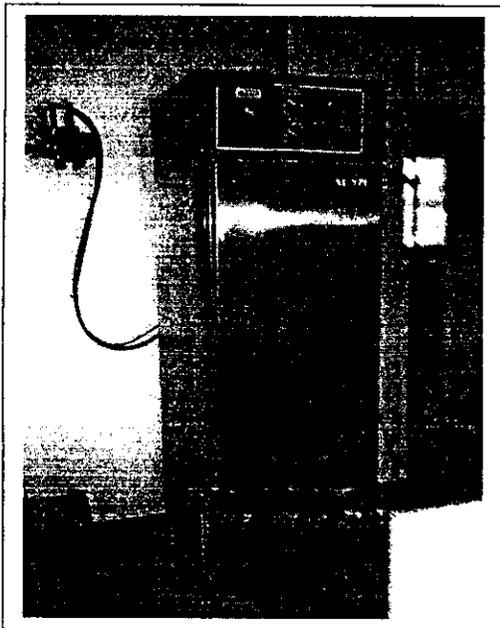


Figure V.5: Armoire de conservation des éprouvettes Duriez (à 18°C pendant 7 jours) avec et sans immersion

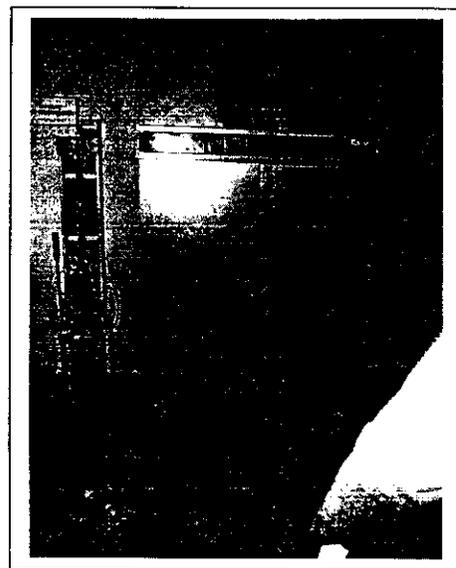


Figure V.6: Étuve

Pour une formulation donnée :

- 5 éprouvettes Marshall dont 4 destinées à l'écrasement et la 5^{ème} pour mesurer la masse volumique apparente.
- 7 éprouvettes Duriez dont 3 éprouvettes conservées dans l'eau à 18°C pendant 7 jours pour les soumettre à l'essai de compression simple avec immersion, 3 sont conservées à sec et à 18°C pour les soumettre à l'essai de compression simple sans immersion et la 7^{ème} éprouvette est laissée pour mesurer la masse volumique apparente.

Le compactage des éprouvettes Marshall se fait à l'aide de la dame Marshall en appliquant 50 coups sur chaque face de l'éprouvette.

Le compactage des éprouvettes Duriez se, fait par un autre mode de compactage en appliquant sur l'éprouvette confectionnée dans le moule une pression de 60 KN pendant 5 minutes.

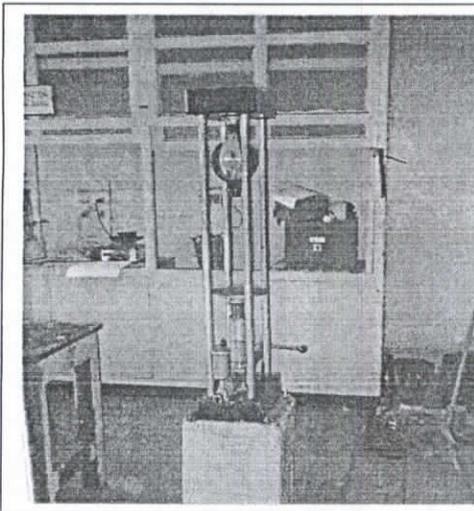


Figure V.7: Presse de demoulage des éprouvettes Duriez

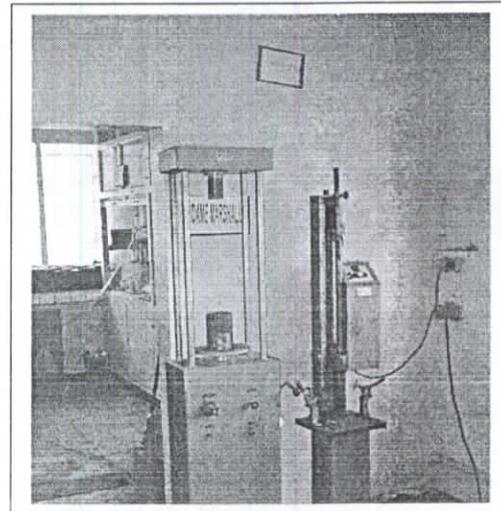


Figure V.8: Presse de compactage des éprouvettes Marshall

Les éprouvettes Marshall subissent une contrainte diamétrale lors de l'essai de rupture tandis que les éprouvettes Duriez subissent un essai de compression simple.

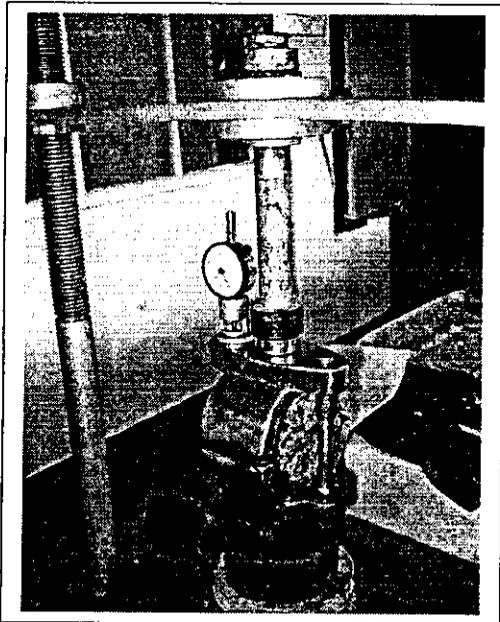


Figure V.9: Presse d'écrasement avec éprouvette Marshall en place



Figure V.10: Presse d'écrasement avec éprouvette duriez en place

Lors de l'écrasement, la machine (presse) est réglée à une vitesse de 0.86 mm/sec pour l'essai Marshall et à 1 mm/sec pour l'essai Duriez.



Figure V.11: Presse d'écrasement

Le fluage Marshall est mesuré par des comparateurs fixés sur la mâchoire d'écrasement, il est exprimé par la différence entre les diamètres avant et après essai.

L'affaissement des éprouvettes Duriez est mesuré également par des comparateurs fixés sur la mâchoire d'écrasement, il est exprimé par la différence des hauteurs avant et après essai.

La compacité des éprouvettes est calculée par le rapport de densité réelle et densité apparente

Les éprouvettes Marshall sont mises dans le bain Marie à la température de 60°C pendant 30 minutes ; et elles sont soumises à l'écrasement juste après leur sortie du bain.

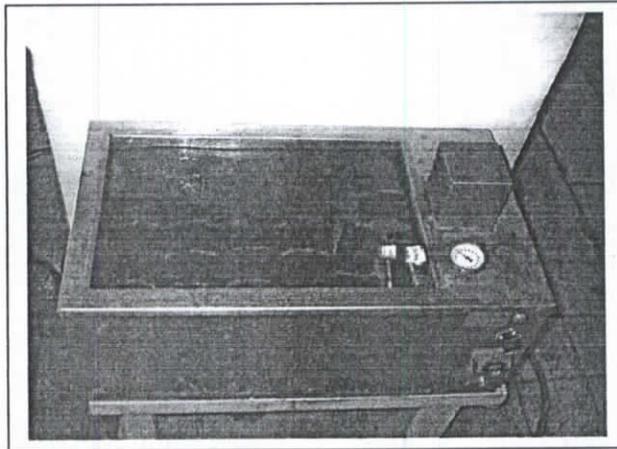


Figure V.12: Bain Marie pour conservation des éprouvettes Marshall

V.3- PREMIÈRE SÉRIE D'ESSAIS :

Dans cette première série d'essais le liant utilisé est le bitume 35/50, et on a fait varier la nature minéralogique des granulats.

V.3.1- Résultats de l'étude Marshall :

L'étude MARSHALL nous donne l'évolution de la stabilité, du Fluage et de la Compacité en fonction de la teneur en poudre de caoutchouc .

Tableau V.1: Résultats de l'étude Marshall :Agrégats de Cap Djinet

Teneur en Poudre (%)	0	1	2	3	4
Compacité (%)	95,67	97,24	97,28	93,46	91,26
Fluage Marshall (0,1 mm)	53,5	43,27	38,5	48,25	56,75
Stabilité Marshall (kg)	900	962,5	992	931	816,16

Tableau V.2: Résultats de l'étude Marshall: Agrégats de la Carrière Jobert

Teneur en Poudre (%)	0	1	2	3	4
Compacité (%)	92,83	96,65	95,83	95,45	93,16
Fluage Marshall (0,1 mm)	43,2	36,2	37,6	40,6	55,2
Stabilité Marshall (kg)	1034,18	1077,84	1054,44	1005,3	619,33

Influence de la poudrette de caoutchouc sur la Compacité :

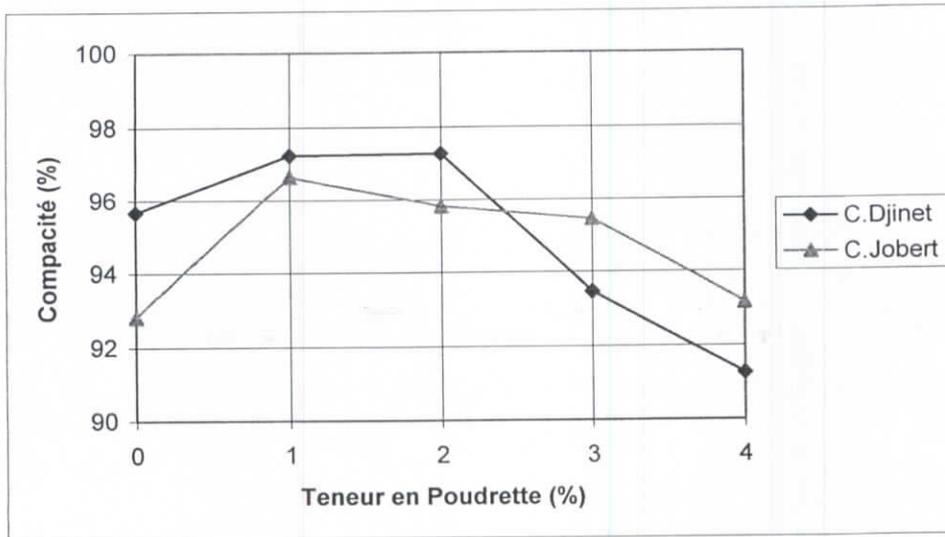


Figure V.13: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la Compacité

La compacité des enrobés bitumineux confectionnés avec des granulats basaltiques et calcaires à base du bitume 35/50 atteint un optimum pour une teneur entre 1 % et 2 % en poudrette de caoutchouc, et puis commence à chuter rapidement dès qu'on dépasse cette teneur.

Influence de la poudrette de caoutchouc sur le fluage Marshall:

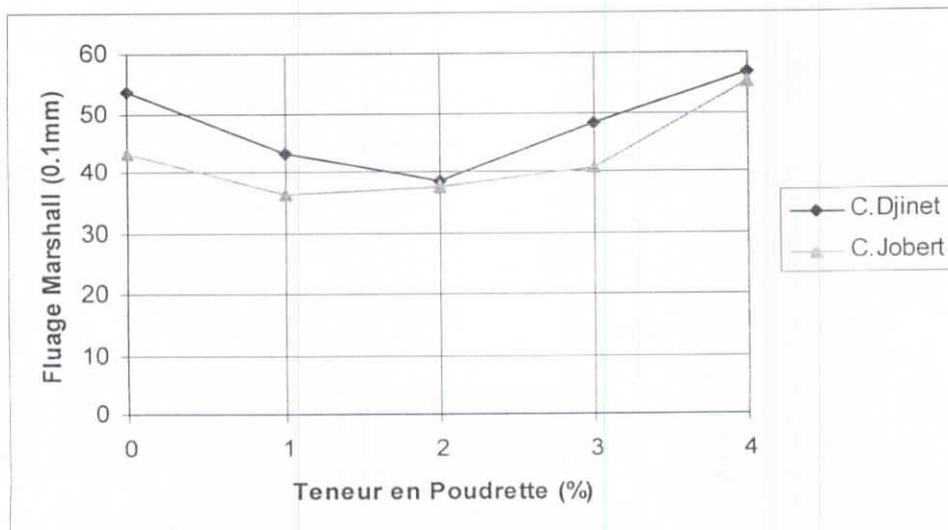


Figure V.14: Influence de la poudrette de caoutchouc sur le fluage Marshall

Le Fluage MARSHALL présente un minimum à une teneur en poudrette de caoutchouc de 2 %, mais pour les grandes teneurs en poudrette, le fluage augmente et dépasse même celui du béton bitumineux de référence.

Influence de la poudrette de caoutchouc sur la stabilité Marshall:

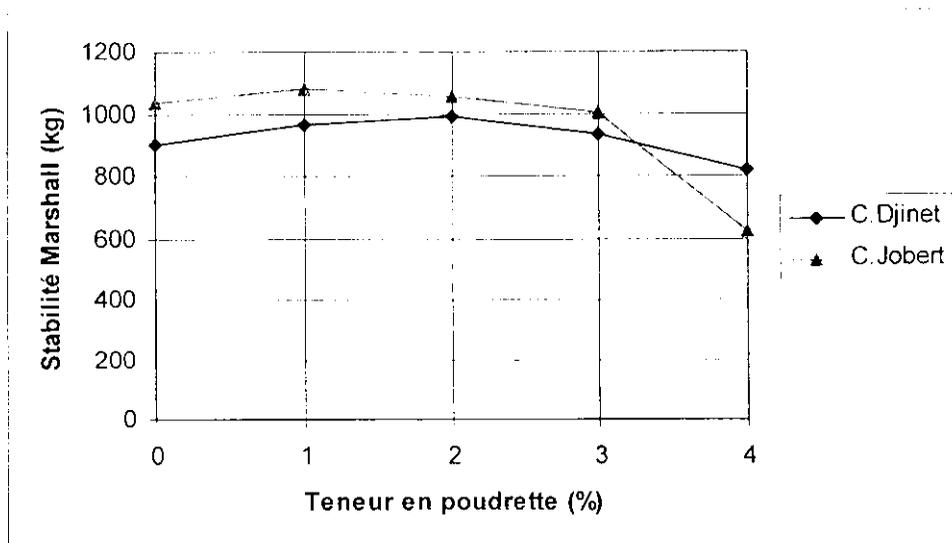


Figure V.15: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la stabilité Marshall

La stabilité MARSHALL présente aussi un optimum à 2% de teneur en poudrette de caoutchouc pour les enrobés bitumineux avec des agrégats de Cap Djinet, et 1% de teneur en poudrette pour les bétons bitumineux avec des agrégats de la carrière Jobert.

Les figures (13, 14 et 15) nous montrent que l'ajout de la poudrette de caoutchouc dans la formulation du mélange bitumineux donne des résultats intéressants dans l'évolution des performances mécaniques testées à l'aide de l'essai MARSHALL, à savoir la compacité, le fluage et la stabilité.

L'analyse des résultats de l'étude Marshall pour les bétons bitumineux modifiés confectionnés avec des granulats provenant de la carrière Jobert et de la carrière de Cap Djinet montrent que la poudrette de caoutchouc incorporée dans le mélange hydrocarboné améliore les caractéristiques de ce mélange (compacité, fluage et stabilité).

V.3.2- Résultats de l'étude Duriez :

L'étude DURIEZ nous donne l'évolution de la résistance à la compression simple avec et sans immersion, ainsi que la compacité en fonction de la teneur en poudre de caoutchouc .

Tableau V.3: Résultats de l'étude Duriez Agrégats de cap djinet

Teneur en poudre (%)	0	1	2	3	4
Compacité (%)	94,01	95,15	93,56	93,43	92,64
Résistance à sec :R (kg/cm ²)	82,9	85,21	92,1	80,08	76,92
Résistance après immersion :r (kg/cm ²)	64,66	85,65	79,71	76,59	74,44
r/R	0,77	0,77	0,86	0,95	0,96
Affaissement (%)	5,02	3,54	3,89	4,12	4,68
Imbibition après 8 jours (%)	1,65	1,41	1,23	1,12	1,09
gonflement après 8 jours (%)	0,81	0,7	0,42	0,37	0,38

Tableau V.4: Résultats de l'étude Duriez : Agrégats de la carrière jobert

Teneur en poudre (%)	0	1	2	3	4
Compacité (%)	96,01	96,59	96,08	95,12	94,38
Résistance à sec : R (kg/cm ²)	86,44	92,97	90,39	81,18	78,32
Résistance après immersion: r (kg/cm ²)	74,95	78,33	81,35	79,48	77,53
r/R	0,84	0,86	0,9	0,98	0,99
Affaissement (%)	5,47	3,14	3,48	4,09	4,67
imbibition après 8 jours (%)	1,48	1,39	1,01	1,05	1,02
gonflement après 8 jours (%)	0,74	0,71	0,36	0,3	0,21

Influence de la poudrette de caoutchouc sur la compacité :

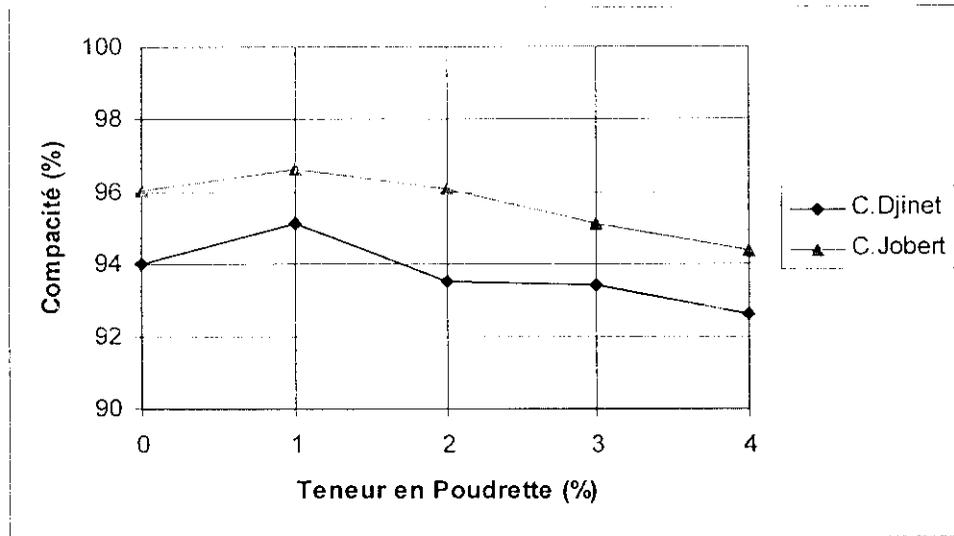


Figure V.16: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la compacité

La figure (16) montre que la compacité des différents bétons bitumineux testés avec l'essai Duriez (qui a un mode de compactage différent de celui de l'essai Marshall) est améliorée pour une teneur en poudrette de caoutchouc de 1%, mais les compacités enregistrées chutent pour les autres teneurs (2, 3 et 4 %) .

Influence de la poudrette de caoutchouc sur la résistance à sec :

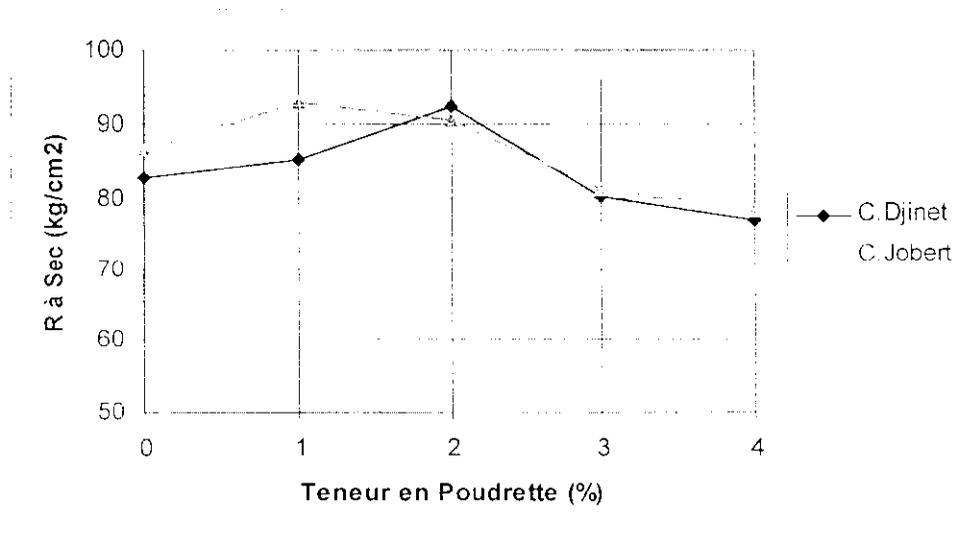


Figure V.17: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la résistance à sec

La résistance à la compression simple à sec R croît avec l'augmentation de la teneur en poudrette jusqu'à une teneur de 2 % en poudrette de caoutchouc pour les agrégats de Cap Djinet et 1% pour les agrégats de la carrière Jobert; après cette teneur, la résistance décroît et les résistances mécaniques à 3 et 4 % sont inférieures à celles avec 0 % de poudrette, ce qui traduit le rôle inverse qu'a joué la poudrette de caoutchouc lorsqu'elle est incorporée avec excès.

Influence de la poudrette de caoutchouc sur la résistance après immersion :

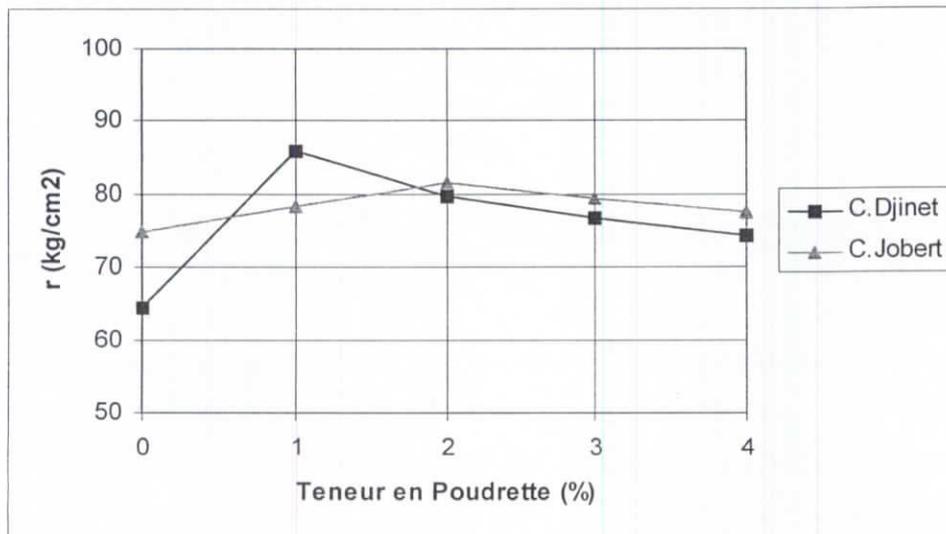


Figure V.18: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la résistance après immersion

La résistance à la compression simple après 7 jours d'immersion dans l'eau à 18°C présente une meilleure performance à 1 % de teneur en poudrette pour les agrégats de Cap Djinet et 2% pour les agrégats de jobert,

Pour les teneurs supérieures, la résistance commence à décroître tout en restant supérieure à celle du béton bitumineux de référence.

Cette amélioration peut être expliquée par le rôle de la poudrette de caoutchouc limitant l'effet de l'eau dans le désenrobage entre les grains et le liant.

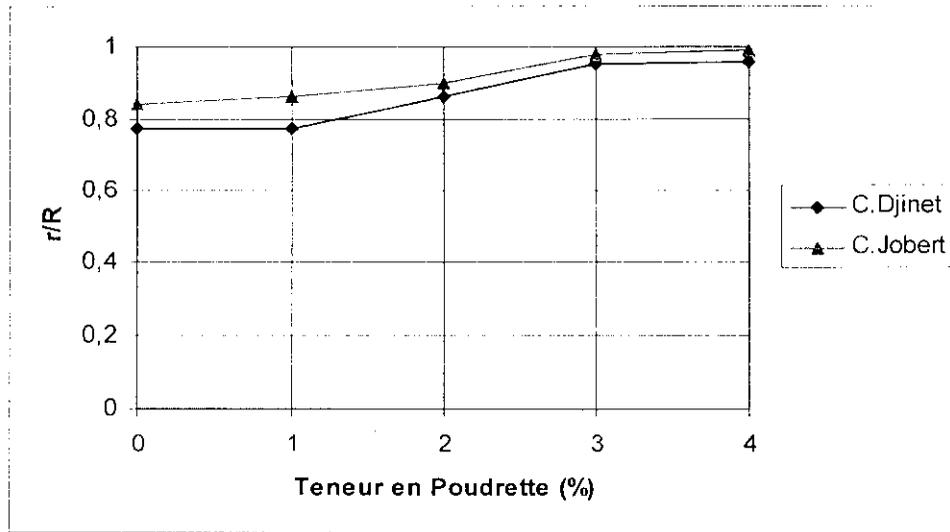
Influence de la poudrette de caoutchouc sur la tenue à l'eau (rapport r/R) :

Figure V.19: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la tenue à l'eau (rapport r/R)

La figure (19), confirme les résultats des courbes de résistance et montre une augmentation continue de la tenue à l'eau des mélanges bitumineux modifiés avec le caoutchouc, cette tenue à l'eau est excellente et avoisine la valeur de 1 pour des teneurs élevées (3 % et 4 %), la poudrette de caoutchouc limite l'effet de l'eau dans le désenrobage entre le liant et les grains, elle est semblable à celui des dopes d'adhésivité qui sont utilisées généralement dans les formulations des bétons bitumineux pour assurer une meilleure adhésivité du mélange.

Influence de la poudrette de caoutchouc sur l'affaissement :

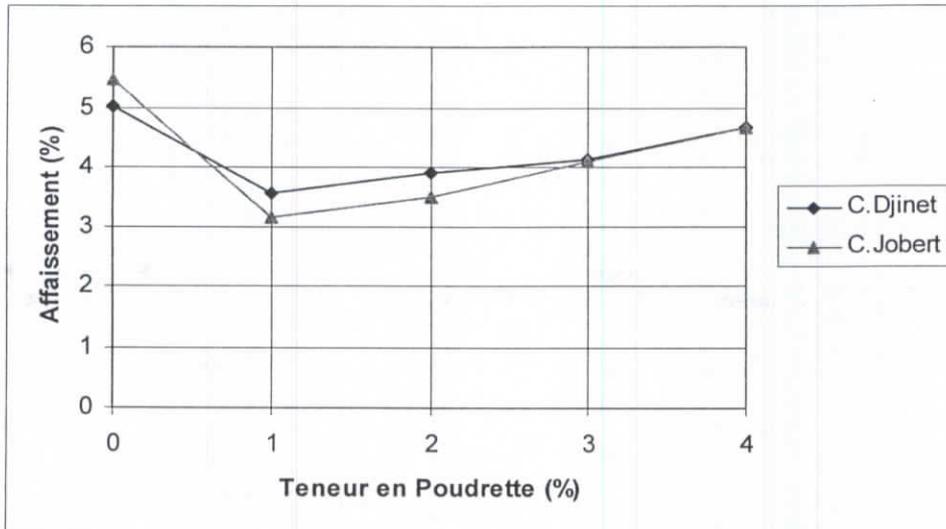


Figure V.20: Influence de la poudrette de caoutchouc sur l'affaissement

La figure (20) illustre que l'affaissement des éprouvettes Duriez est diminué, et il est moindre pour 1 % de poudrette de caoutchouc ou on enregistre un gain de 30 %.

Influence de la poudrette de caoutchouc sur l'imbibition

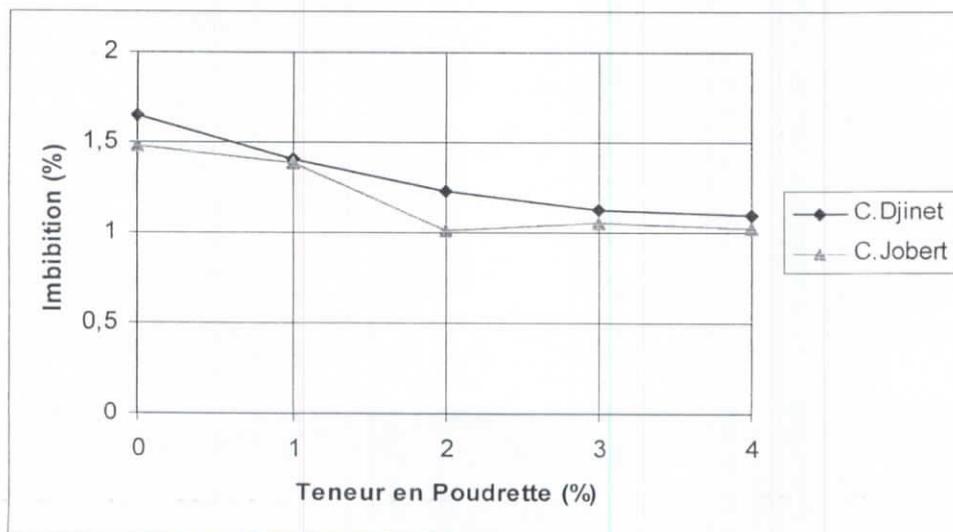


Figure V.21: Influence de la poudrette de caoutchouc sur l'imbibition

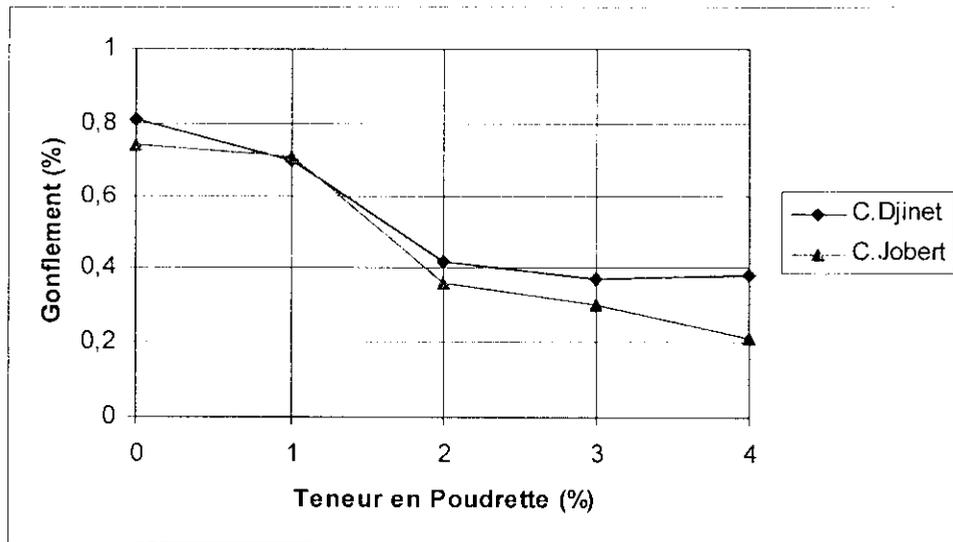
Influence de la poudrette de caoutchouc sur le gonflement :

Figure V.22: Influence de la poudrette de caoutchouc sur le gonflement

Les figures (21 et 22) présentent une nette amélioration pour le gonflement et l'imbibition après conservation dans l'eau pendant 7 jours à une température de 18°C. ce qui peut se traduire par la tenue de la couche de roulement aux effets des pluies pendant les périodes hivernales.

Les résultats de l'étude Duriez montrent et confirment que l'apport de la poudrette de caoutchouc est apprécié sur les différentes caractéristiques du béton bitumineux confectionné soit avec des granulats calcaires, ou avec des granulats basaltiques.

On peut remarquer également l'importante augmentation de la résistance à la compression après immersion (conservation dans l'eau pendant 7 jours à 18 °C) devant une augmentation moins importante des résistances à la compression à sec (conservation sans immersion à 18 °C)

La tenue à l'eau exprimée par le rapport r/R (résistance à la compression avec et sans immersion) est croissante avec la teneur en poudrette de caoutchouc, ce rapport tend vers 1 avec des teneurs élevées, d'ou un rôle similaire aux dopes d'adhésivité.

L'affaissement mesuré lors de l'écrasement des éprouvettes Duriez est diminué avec l'augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc.

Le gonflement exprimé par l'augmentation relative du volume de l'éprouvette Duriez après conservation dans l'eau pendant 7 jours diminue sensiblement avec l'augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc.

L'imbibition, exprimée par l'augmentation relative du poids de l'éprouvette Duriez après conservation dans l'eau pendant 7 jours, diminue également avec l'augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc.

V.4- DEUXIÈME SÉRIE D'ESSAIS :

Dans cette deuxième série d'essais, On introduit une autre classe du bitume qui est le 70/100 et cela dans le but de vérifier les résultats de l'étude précédente mais surtout comprendre la mode de modification du béton bitumineux par la poudre de caoutchouc, on essayera de voir si notre ajout va se contenter de jouer le seul rôle de fillers ou bien il se fusionne et joue le rôle du liant

V.4.1- Résultats de l'étude Marshall :

Tableau V.5: Résultats de l'étude Marshall: Agrégats de cap djinet

Teneur en Poudre (%)	0	1	2	3	4
Compacité (%)	90,96	94,35	89,49,54	92,32	90,9
Fluage Marshall (0,1 mm)	65	65	57	50	66
Stabilité Marshall (kg)	400	423,6	499	613,2	600

Tableau V.6: Résultats de l'étude Marshall: Agrégats de la carrière jobert

Teneur en Poudrette (%)	0	1	2	3	4
Compacité (%)	94.75	95.62	96.72	92.06	90.57
Fluage Marshall (0,1 mm)	55.88	41.91	43.18	63.5	68.58
Stabilité Marshall (kg)	365.4	385.8	452.8	669	609.3

Influence de la poudrette de caoutchouc sur la Compacité :

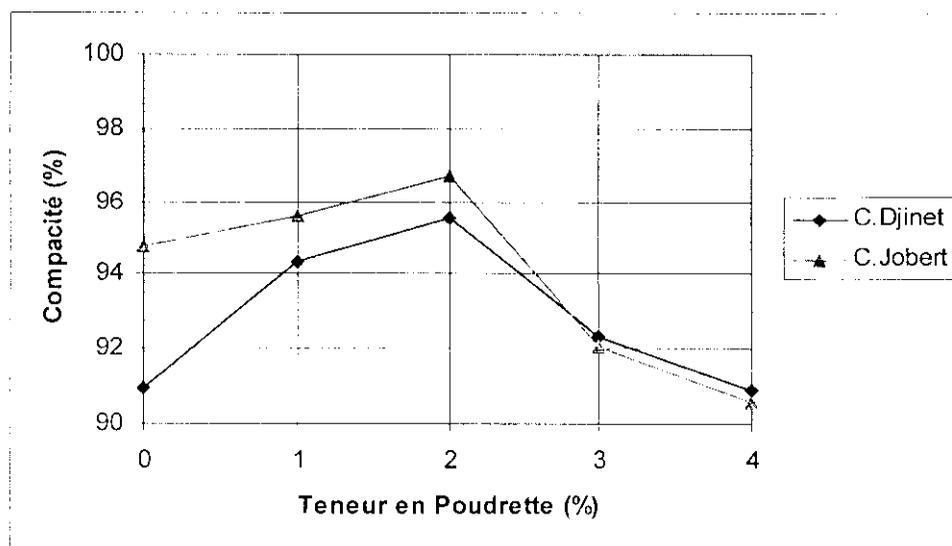


Figure V.23: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la Compacité

La figure 23 montre que la compacité de l'enrobé bitumineux confectionné à base du bitume 70/100 à pour optimum 2% aussi bien pour les agrégats de cap Djinet que pour ceux de Jobert

Influence de la poudrette de caoutchouc sur le fluage Marshall :

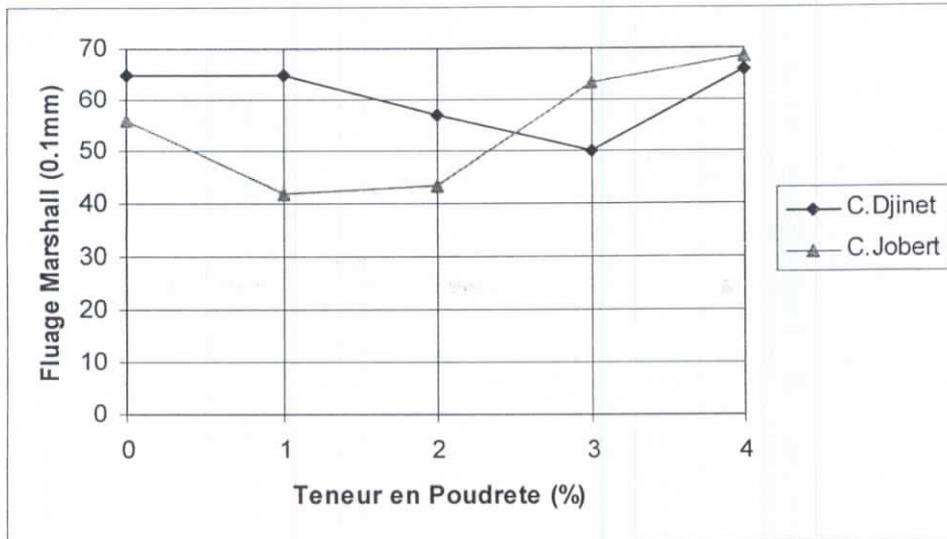


Figure V.24: Influence de la poudrette de caoutchouc sur le fluage Marshall

Le fluage Marshall mesurée pour les enrobé bitumineux à base du bitume 70/100 à pour optimum entre 1 et 2% pour les agrégats de Jobert mais il est de 3% pour les agrégats des Cap Djinet

Influence de la poudrette de caoutchouc sur la stabilité Marshall :

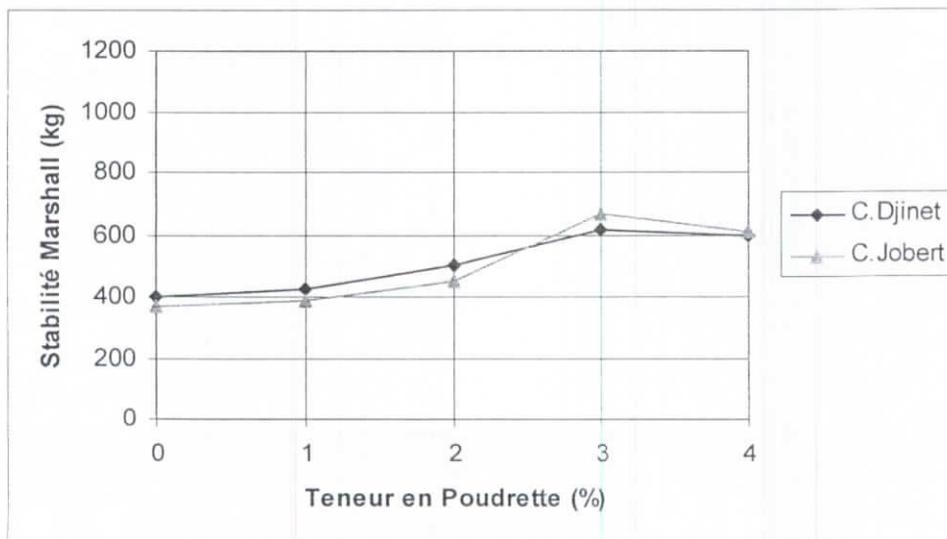


Figure V.25: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la stabilité Marshall

La stabilité Marshall n'est pas maximale pour les teneur de 1 et 2% mais elle continue à croître jusqu'à 3%.

Des figures (23, 24 et 25), On peut constater que les performances des mélanges bitumineux confectionnés avec ajout de poudrette de caoutchouc sont meilleures pour des teneurs de 3 %. Cette teneur n'est pas la même que celle des bétons bitumineux confectionnés à base du bitume 35/50. On remarque de plus que la stabilité Marshall continue à croître après la teneur optimale enregistrée avec l'emploi du bitume 35/50 qui est entre 1 % et 2 % et elle donne de meilleurs résultats à 3 % de teneur en poudrette.

Ces résultats obtenus avec emploi du bitume de la classe 70/100 montrent que la poudrette de caoutchouc ne joue pas uniquement le rôle de fillers mais joue également le rôle de liant

V.4.2- Résultats de l'étude Duriez :

Tableau V.7: Résultats de l'étude Duriez :agrégats de cap djinet

Teneur en poudrette (%)	0	1	2	3	4
Compacité (%)	96,01	96,59	96,08	95,12	94,38
Résistance à sec :R (kg/cm ²)	86,44	92,97	90,39	81,18	78,32
Résistance après immersion r : (kg/cm ²)	74,95	78,33	81,35	79,48	77,53
r/R	0,84	0,86	0,9	0,98	0,99
Affaissement (%)	5,47	3,14	3,48	4,09	4,67
Imbibition après 8 jours (%)	1,48	1,39	1,01	1,05	1,02
Gonflement après 8 jours (%)	0,74	0,71	0,36	0,3	0,21

Tableau V.8: Résultats de l'étude Duriez : agrégats de carrière jobert :

Teneur en Poudrette (%)	0	1	2	3	4
Compacité (%)	93.68	93.43	92.88	92.13	91.03
Résistance à sec :R (kg/cm ²)	30.75	35.33	51.54	54.02	51.37
Résistance après immersion r : (kg/cm ²)	19.55	30.34	39.48	41.98	36.99
r/R	0.64	0.86	0.77	0.77	0.72
Affaissement (%)	4.74	4.65	4.36	4	4.02
Imbibition après 8 jours (%)	2.14	2	1.78	1.88	1.72
Gonflement après 8 jours (%)	1.08	1.03	1.02	0.95	1.0

Influence de la poudrette de caoutchouc sur Compacité :

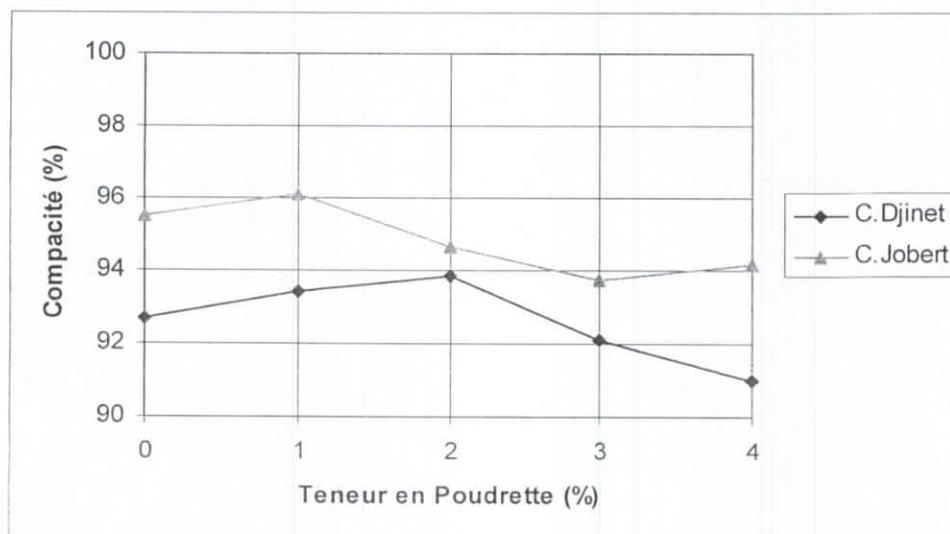


Figure V.26: Influence de la poudrette de caoutchouc sur Compacité

Influence de la poudrette de caoutchouc sur la résistance à sec :

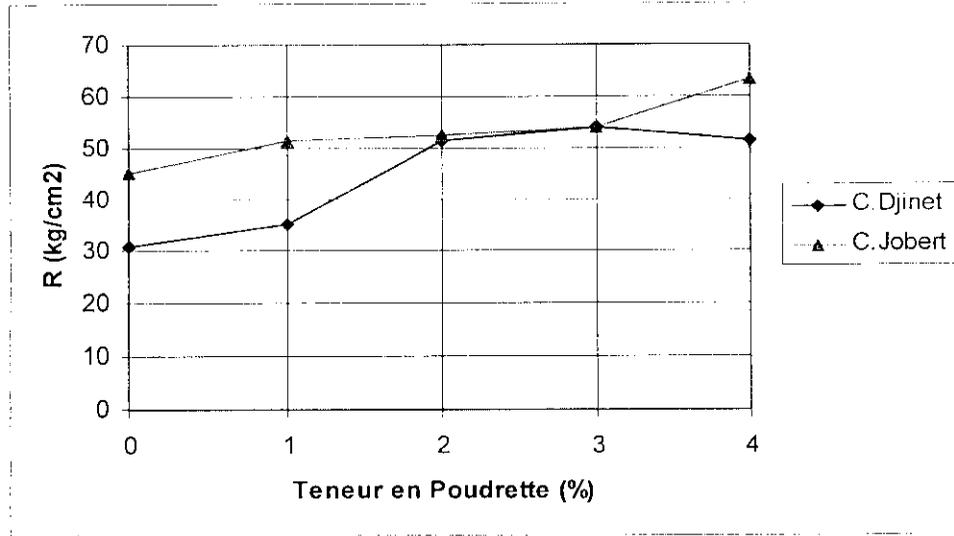


Figure V.27: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la résistance à sec

Influence de la poudrette de caoutchouc sur la résistance après immersion:

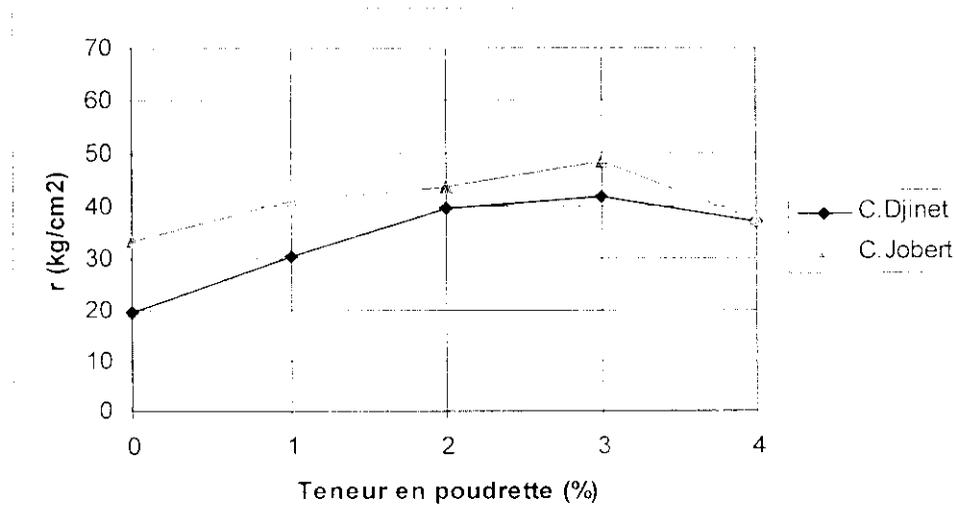


Figure V.28: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la résistance après immersion:

Des figures (27, 28), On peut constater que l'incorporation de 3 % de poudrette de caoutchouc dans le mélange bitumineux à base du bitume de classe 70/100 donne une nette amélioration des résistances de ces mélanges. Ces résultats montrent clairement que la poudrette de caoutchouc joue à la fois le rôle de fillers et de liant.

Influence de la poudrette de caoutchouc sur la tenue à l'eau (rapport r/R):

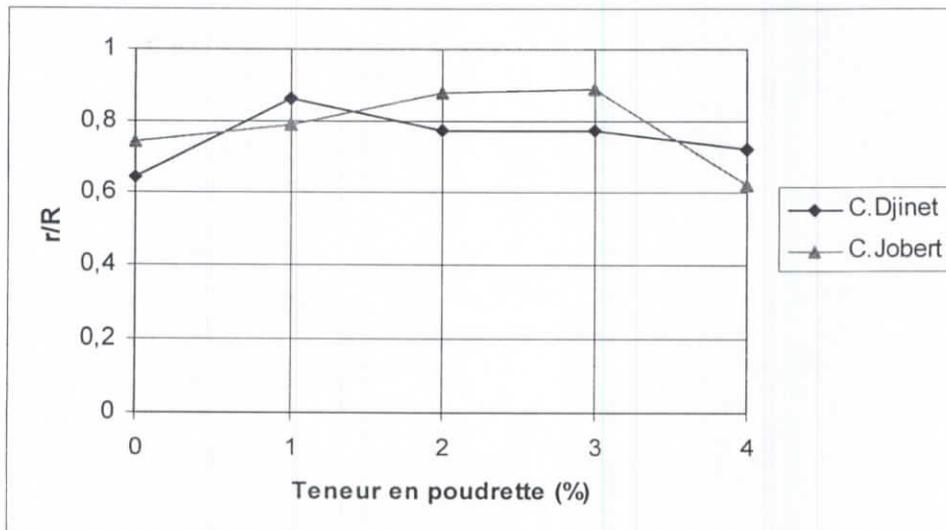


Figure V.29: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la tenue à l'eau (rapport r/R)

Le rapport r/R est amélioré pour les bétons bitumineux modifiés et il dépasse 0,7 voire 0,8 pour la teneur de 1 %

Influence de la poudre de caoutchouc sur l'affaissement:

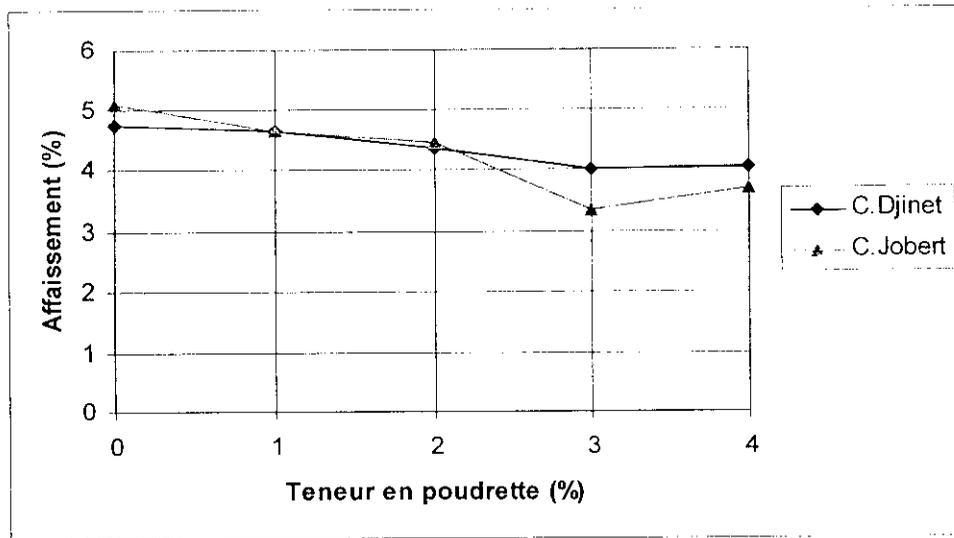


Figure V.30: Influence de la poudre de caoutchouc sur l'affaissement

Influence de la poudre de caoutchouc sur l'imbibition :

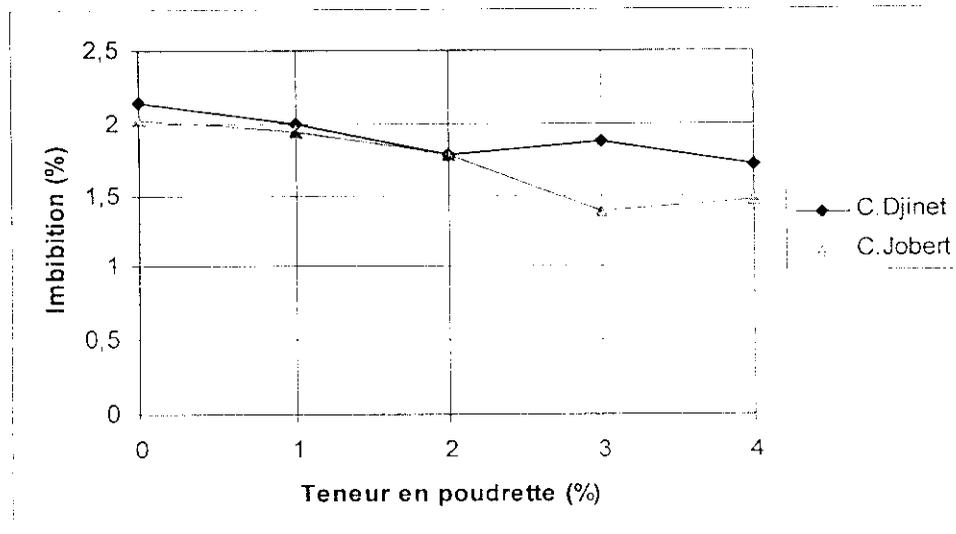


Figure V.31: Influence de la poudre de caoutchouc sur l'imbibition

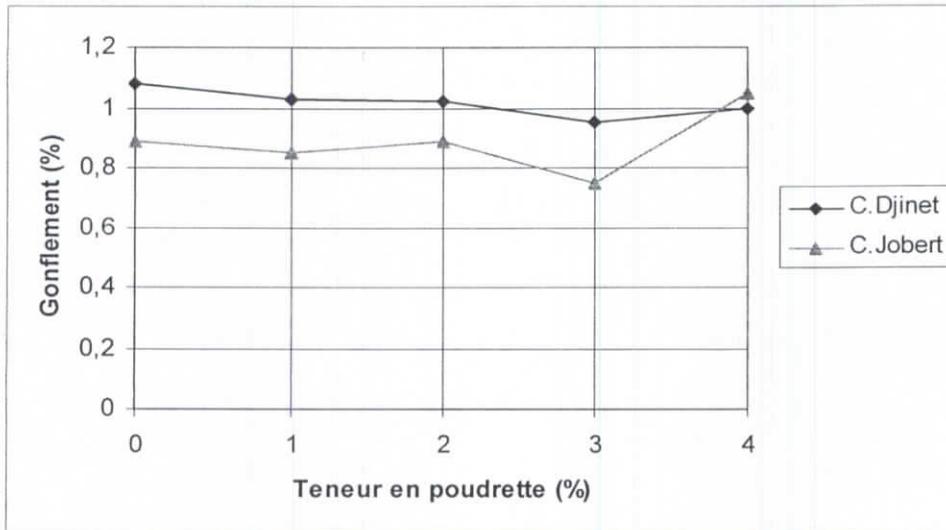
Influence de la poudrette de caoutchouc sur le gonflement:

Figure V.32: Influence de la poudrette de caoutchouc sur le gonflement

Les figures (30, 31 et 32) illustrent l'apport de la poudrette de caoutchouc sur l'affaissement lors de l'écrasement des éprouvettes Duriez avec l'essai de compression simple LCPC ainsi que l'effet de cette poudrette sur le gonflement et l'imbibition de ces éprouvettes après 7 jours de conservation dans l'eau à la température de 18°C.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec incorporation de 3 % de poudrette dans le mélange.

CHAPITRE VI

**COPMPORTEMENT AU
FLUAGE STATIQUE**

VI- COMPORTEMENT AU FLUAGE STATIQUE :

VI.1- Introduction :

Après étude des performances mécaniques des enrobés bitumineux à l'aide des essais classiques Marshall et Duriez, ou on a testé des formulations corrigées par différents pourcentages de poudrette de caoutchouc, nous avons jugé utile de compléter notre travail par un essai de simulation qui décrit un phénomène très important dans l'étude des matériaux qui est le fluage.

Le développement de la déformation permanente sous des charges répétées correspond à un phénomène de fluage (la durée d'application des charges est un paramètre plus important que leur nombre et leur fréquence).

Plusieurs laboratoires dans le monde adoptent et ont mis en pratique l'essai de fluage statique uniaxial et l'utilisent aussi pour la vérification des résultats de l'essai Marshall. Cet essai permet d'évaluer la résistance d'un béton bitumineux à la déformation viscoélastique. L'essai de fluage statique est aussi utilisé pour l'évaluation de la déformation viscoplastique [6] .

Pour réaliser cet essai de fluage statique uniaxial, nous avons utilisé des granulats de la carrière Jobert avec du bitume 35/50, ce qui correspond à la formulation qui a donné les meilleures performances dans l'étude Marshall et Duriez.

Les échantillons testés sont des éprouvettes du type Marshall conservées dans l'étuve à la température de l'essai qui est de 60°C pendant 4 heures, temps considéré suffisant pour que la température arrive jusqu'au noyau de l'éprouvette.

VI.2- APPAREILLAGE UTILISÉ

L'appareil utilisé pour le fluage statique a été élaboré et développé au laboratoire des Routes et Aéroports de la faculté de Génie Civil de l'USTHB.

Il s'agit d'un appareil normalement utilisé pour mesurer la consolidation des sols et il a été conçu par la société de fabrication du matériel d'essai CONTROLS [37]. Ce type d'oedomètre a été utilisé pour caractériser le fluage des enrobés bitumineux avec quelques modifications et le fluage des texols [38].

VI.3- CHARGEMENT DE L'ÉPROUVETTE

L'éprouvette est chargée par des poids au moyen d'un système de levier. La charge se transmet à l'éprouvette grâce à un vérin à vis incorporé au portique de chargement, l'une des extrémités de ce vérin a la forme d'une demi sphère destinée à épouser un évidement à la surface d'un disque posé sur une plaque métallique perforée au dessus de l'éprouvette. L'autre extrémité actionne la tige d'un comparateur et permet la mise à zéro de ce dernier.

VI.4- CONDITIONS PARTICULIÈRES DE L'ESSAI :

Les conditions particulières de l'essai sont établies selon la norme anglaise BS 598. Ces conditions sont ainsi confirmées par Ugé et Vande Loo, Zawadzki et Hushek et Pigois [6], [10].

L'enregistrement de la déformation initiale après 15 secondes est choisi arbitrairement. C'est à peu près le temps moyen d'arrêt de bus dans une station.

Les conditions de l'essai sont :

- Mélange testé : béton bitumineux 0/15
- Température de l'essai : 60 °C (l'essai se fait également à 45°C et à 20 °C).
- Contrainte de compression appliquée : 0,14 MPa
- Type d'éprouvettes utilisées : des éprouvettes Marshall.

- Écart d'épaisseur toléré suivant plusieurs génératrices : 0,1 mm.
- Temps de conservation de l'éprouvette : 4heures à la température d'essai.
- Intervalle de lecture : chaque 15 secondes pendant première minute, puis chaque minute pendant les dix minutes suivantes, puis toutes les dix minutes jusqu'à 1 heure.
- Temps de chargement : 1 heure
- Temps de déchargement : 1heure

VI.5- MODE OPÉRATOIRE :

- Après l'avoir conservée pendant 4 heures, nous plaçons l'éprouvette entre les deux plaques métalliques dans le bain marie porté préalablement à la même température et nous faisons en sorte qu'elle soit totalement immergée.
- Nous appliquons une contrainte de compression σ_0 pendant 1 heure et mesurons la déformation axiale.
- Nous déchargeons ensuite tout en mesurant le retour des déformations.

VI.6- VALEURS À DÉTERMINER :

Les valeurs à déterminer sont la contrainte appliquée ainsi que les composantes de la déformation mesurées durant l'essai. Elles sont représentées sur la figure suivante :

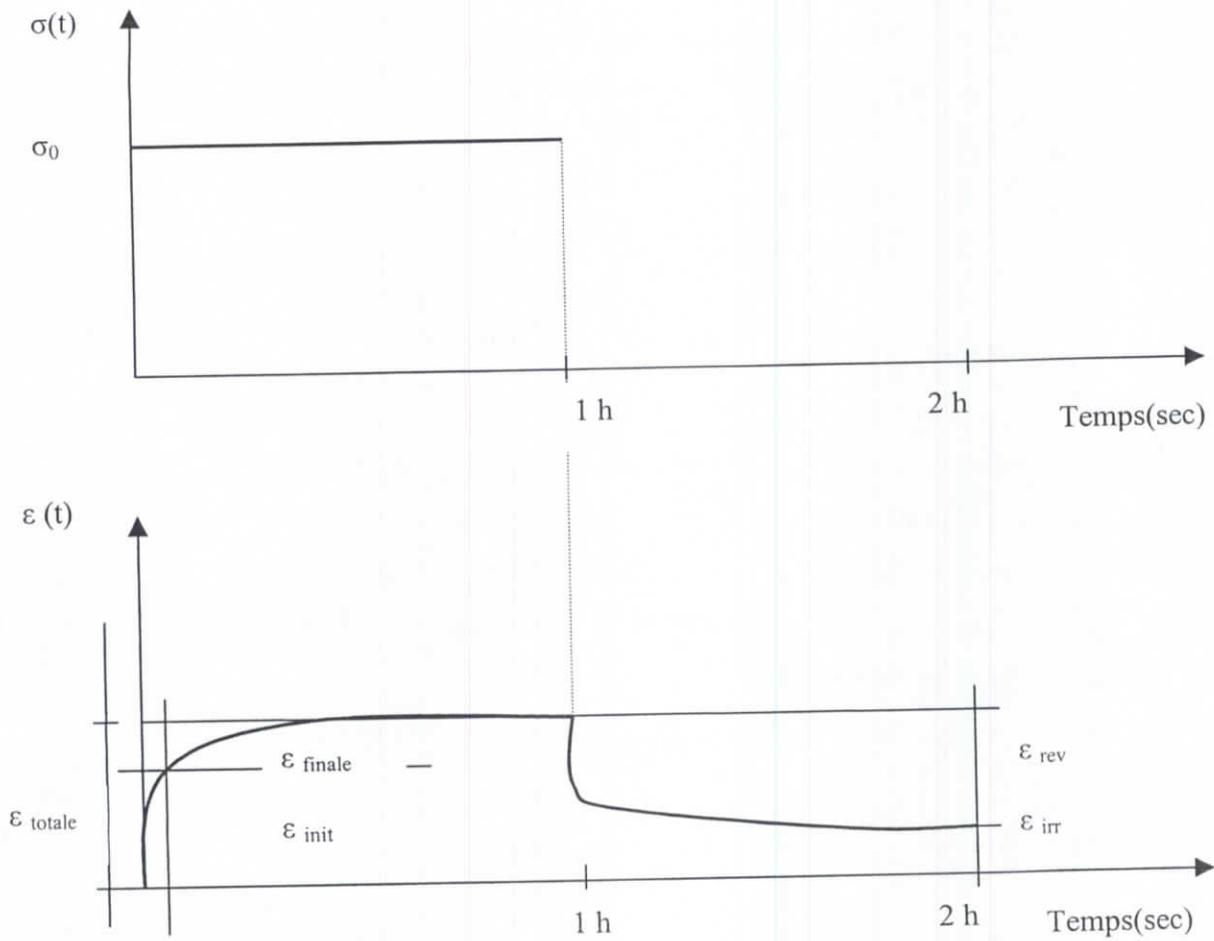


Figure VI.1: Contrainte appliquée et composantes de la déformation lors de l'essai de fluage statique (chargement et déchargement)

σ_0 : Contrainte

ϵ_{Totale} : Déformation totale enregistrée après 1 heure de chargement

ϵ_{init} : Déformation initiale enregistrée après 15 secondes de chargement

ϵ_{finale} : Déformation finale complémentaire

ϵ_{irr} : Déformation irréversible ou permanente

ϵ_{rev} : Déformation réversible

Les déformations pendant l'essai sont calculées par :

$$\varepsilon(t,T) = \frac{\Delta h}{h_0} * 1000$$

avec :

$\varepsilon(t,T)$: déformation axiale de l'éprouvette durant le temps de chargement (t) en secondes à la température (T) en °C.

h_0 : hauteur initiale de l'éprouvette.

$\Delta h/h_0$: déformation axiale (changement de distance entre les surfaces chargées).

Le module de rigidité en fluage statique est donné par :

$$S_M(t,T) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t,T)}$$

avec :

- $S_M(t, T)$: module de rigidité du mélange sous charge statique durant le temps de chargement (t) en secondes à la température T en °C.

- Le quotient de la déformation réversible après 1 heure de déchargement et la déformation totale après 1 heure de chargement (valeur de recouvrement viscoélastique (RVE), a été calculée et ceci pour distinguer une différence entre les mélanges :

$$RVE = \frac{\varepsilon_{rev}}{\varepsilon_{tot}} * 100 \quad [\text{en } \%]$$

Le sens de la déformation initiale et de la déformation finale pour la résistance aux déformations permanentes peut être clairement apprécié si ces deux déformations sont comparées à la déformation totale. pour cela les déformations initiales et finales comme pourcentages de la déformations totale ont été calculées.

VI.7- RÉSULTAS DE L'ESSAI DE FLUAGE STATIQUE :

Tableau VI.1: Fluage du béton bitumineux avec 0% d'ajout, hauteur initiale=6,67 cm

Temps : t (secondes)	Déplacement (mm)	Déformation (%)	Temps : (t+3600) (secondes)	Déplacement (mm)	Déformation (%)
0	0	0	0	0,504	0
15	0,681	10,210	15	0,486	7,286
30	0,696	10,345	30	0,480	7,196
45	0,703	10,540	45	0,475	7,124
60	0,708	10,615	60	0,472	7,076
120	0,721	10,809	120	0,466	6,986
180	0,726	10,885	180	0,462	6,926
240	0,729	10,929	240	0,459	6,882
300	0,732	10,974	300	0,457	6,852
360	0,734	11,004	360	0,456	6,836
420	0,736	11,034	420	0,454	6,806
480	0,738	11,064	480	0,453	6,781
540	0,739	11,079	540	0,452	6,766
600	0,741	11,109	600	0,451	6,716
1200	0,749	11,229	1200	0,444	6,657
1800	0,755	11,319	1800	0,441	6,612
2400	0,757	11,349	2400	0,440	6,597
3000	0,759	11,379	3000	0,437	6,552
3600	0,761	11,409	3600	0,434	6,507

Tableau VI.2: Fluage du béton bitumineux avec 1% d'ajout, hauteur initiale=6,65 cm

Temps : t (secondes)	Déplacement (mm)	Déformation (%)	Temps : (t+3600) (secondes)	Déplacement (mm)	Déformation (%)
0	0	0	0	0,361	5,428
15	0,565	8,496	15	0,350	5,263
30	0,577	8,677	30	0,347	5,218
45	0,583	8,767	45	0,345	5,188
60	0,585	8,797	60	0,344	5,173
120	0,590	8,872	120	0,341	5,128
180	0,596	8,962	180	0,338	5,083
240	0,598	8,992	240	0,337	5,067
300	0,600	9,022	300	0,337	5,067
360	0,602	9,052	360	0,336	5,052
420	0,604	9,083	420	0,335	5,037
480	0,605	9,097	480	0,335	5,037
540	0,606	9,113	540	0,334	5,022
600	0,607	9,128	600	0,333	5,007
1200	0,614	9,233	1200	0,322	4,842
1800	0,619	9,308	1800	0,329	4,947
2400	0,621	9,338	2400	0,328	4,932
3000	0,623	9,368	3000	0,326	4,902
3600	0,623	9,368	3600	0,325	4,887

Tableau VI.3: Fluage du béton bitumineux avec 2% d'ajout, hauteur initiale=6,65 cm

Temps : t (secondes)	Déplacement (mm)	Déformation (%)	Temps : (t+3600) (secondes)	Déplacement (mm)	Déformation (%)
0	0	0	0	0,240	3,609
15	0,388	5,083	15	0,232	3,488
30	0,408	6,135	30	0,225	3,383
45	0,417	6,271	45	0,218	3,278
60	0,423	6,361	60	0,215	3,233
120	0,436	6,556	120	0,210	3,158
180	0,440	6,616	180	0,205	3,083
240	0,445	6,692	240	0,201	3,022
300	0,448	6,737	300	0,198	2,977
360	0,450	6,767	360	0,195	2,932
420	0,452	6,797	420	0,191	2,872
480	0,453	6,812	480	0,190	2,857
540	0,454	6,827	540	0,188	2,827
600	0,455	6,842	600	0,187	2,812
1200	0,462	6,947	1200	0,177	2,662
1800	0,466	7,007	1800	0,171	2,571
2400	0,468	7,037	2400	0,168	2,523
3000	0,470	7,067	3000	0,165	2,481
3600	0,472	7,098	3600	0,164	2,406

Tableau VI.4: Fluage du béton bitumineux avec 3% d'ajout, hauteur initiale=6,75 cm

Temps : t (secondes)	Déplacement (mm)	Déformation (%)	Temps : (t+3600) (secondes)	Déplacement (mm)	Déformation (%)
0	0	0	0	0,581	8,607
15	0,650	9,629	15	0,568	8,415
30	0,693	10,266	30	0,565	8,370
45	0,715	10,593	45	0,563	8,341
60	0,730	10,815	60	0,562	8,326
120	0,765	11,333	120	0,560	8,296
180	0,775	11,481	180	0,558	8,266
240	0,782	11,585	240	0,557	8,252
300	0,789	11,688	300	0,556	8,237
360	0,793	11,748	360	0,556	8,237
420	0,797	11,807	420	0,555	8,222
480	0,800	11,852	480	0,555	8,222
540	0,802	11,881	540	0,554	8,207
600	0,804	11,911	600	0,554	8,207
1200	0,814	12,059	1200	0,541	8,015
1800	0,818	12,185	1800	0,549	8,133
2400	0,822	12,177	2400	0,548	8,188
3000	0,824	12,207	3000	0,548	8,118
3600	0,825	12,222	3600	0,548	8,118

Tableau VI.5: Fluage du béton bitumineux avec 4% d'ajout, hauteur initiale=6,73 cm

Temps : t (secondes)	Déplacement (mm)	Déformation (%)	Temps : (t+3600) (secondes)	Déplacement (mm)	Déformation (%)
0	0	0	0	0,700	10,401
15	0,717	10,654	15	0,680	10,104
30	0,753	11,887	30	0,664	9,866
45	0,769	11,426	45	0,665	9,881
60	0,781	11,605	60	0,650	9,658
120	0,809	12,021	120	0,635	9,435
180	0,826	12,273	180	0,624	9,272
240	0,833	12,377	240	0,619	9,198
300	0,842	12,511	300	0,617	9,168
360	0,848	12,600	360	0,613	9,108
420	0,855	12,704	420	0,610	9,064
480	0,860	12,778	480	0,600	8,915
540	0,867	12,883	540	0,599	8,900
600	0,871	12,942	600	0,598	8,885
1200	0,901	13,388	1200	0,573	8,514
1800	0,912	13,551	1800	0,572	8,499
2400	0,920	13,670	2400	0,563	8,365
3000	0,925	13,744	3000	0,557	8,276
3600	0,929	13,803	3600	0,552	8,202

VI.8- INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS :

Les résultats de l'essai du Fluage statique à 60°C du béton bitumineux avec agrégats calcaires et bitume 35/50 à différentes teneurs en poudre de caoutchouc montrent qu'il y'a eu une nette diminution des déformations pour les bétons bitumineux avec 1 % et 2 % de poudre, mais pour les bétons bitumineux avec 3 % et 4 % de poudre de caoutchouc, les déformations sont plus importantes et elles sont supérieures à celles du béton bitumineux témoin (Figure VI.2).

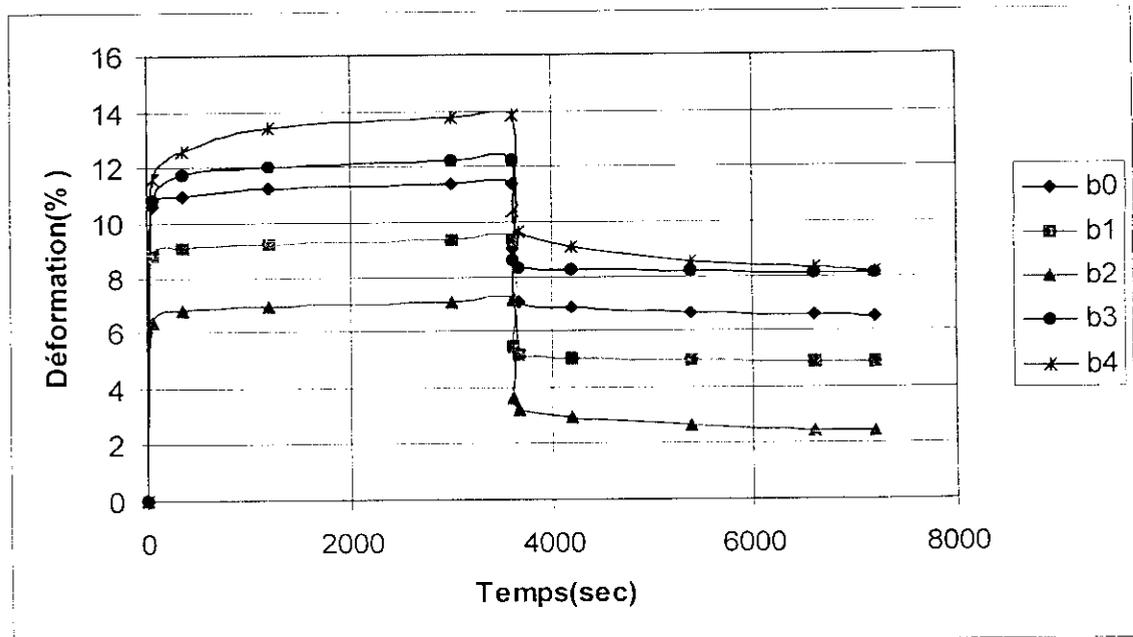


Figure VI.2: Résultats du Fluage Statique

b_i : béton bitumineux à i % d'ajout de poudre de caoutchouc

Influence de la poudrette de caoutchouc sur la déformation initiale, la déformation totale et la déformation finale :

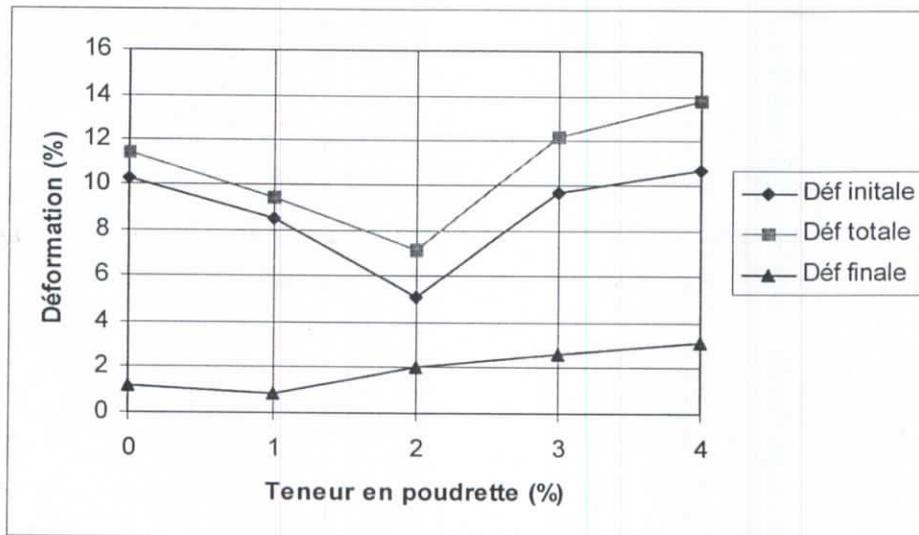


Figure VI.3: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la déformation initiale, la déformation totale et la déformation finale

Influence de la poudrette de caoutchouc sur la déformation réversible et la déformation irréversible :

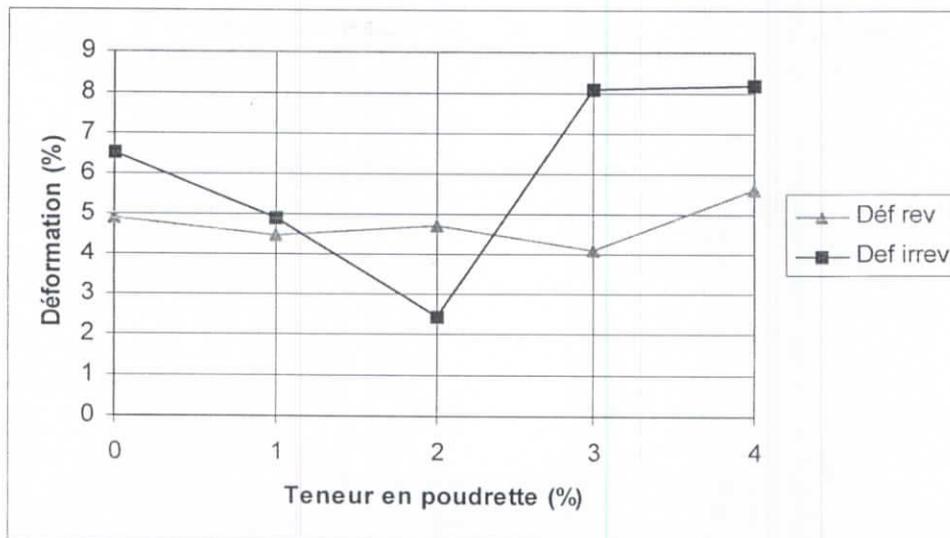


Figure VI.4: Influence de la poudrette de caoutchouc sur la déformation réversible et la déformation irréversible

Influence de la poudrette de caoutchouc sur le module de rigidité initial et le module de rigidité total:

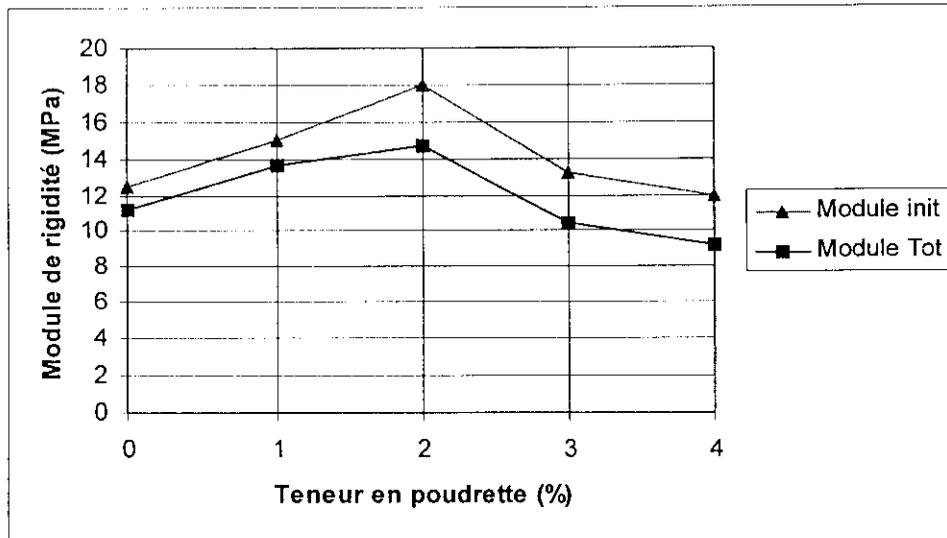


Figure VI.5: Influence de la poudrette de caoutchouc sur le module de rigidité initial et le module de rigidité total

Influence de la poudrette de caoutchouc sur le recouvrement viscoélastique :

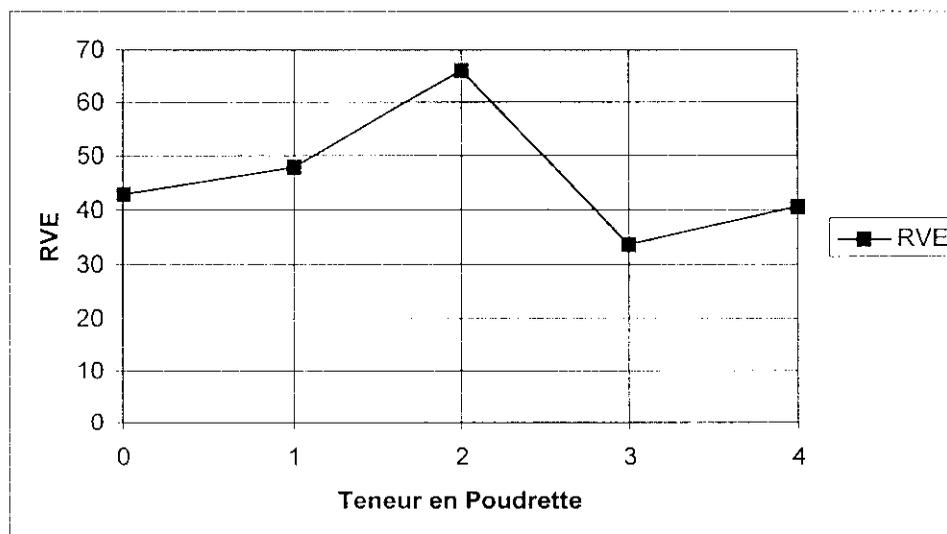


Figure VI.6: Influence de la poudrette de caoutchouc sur le recouvrement viscoélastique

À partir des figures qui illustrent les résultats des essais de fluage statique sur les enrobés bitumineux avec différentes teneurs en poudre de caoutchouc, on peut donner les observations suivantes :

- La déformation totale enregistrée après 1 heure de chargement est moins importante pour les bétons bitumineux avec 1 et 2 % d'ajout, elle a la même allure que la déformation initiale.
- La déformation initiale enregistrée après 15 secondes de chargement diminue pour les bétons bitumineux jusqu'à 2 % de poudre de caoutchouc puis augmente.
- La déformation finale, qui est la déformation complémentaire entre la déformation initiale et la déformation totale enregistrée après une heure de chargement, est minimale pour une teneur en poudre de 1 %.
- pour les bétons bitumineux à différentes teneurs en poudre de caoutchouc, on remarque un léger gain dans les déformations réversibles enregistrées, mais au niveau des déformations irréversibles, qui sont plus importantes, on note une diminution considérable avec le béton bitumineux avec 1 % et meilleure pour 2 % de poudre, mais après la teneur de 2 % (3 et 4 %) les déformations irréversibles deviennent plus importantes que celles du béton bitumineux témoin.
- Pour les teneurs en poudre de caoutchouc de 3 % et 4 %, on constate une augmentation des déformations qui est peut être considérée comme un surdosage en poudre de caoutchouc.
- Pour une teneur en poudre de caoutchouc comprise entre 1% et 2 % le béton bitumineux présente une nette amélioration du module de rigidité au niveau de toutes les étapes de chargement (initial et final).
- Le module de rigidité le plus élevé est celui du mélange bitumineux avec une teneur en poudre de caoutchouc de 2 %.
- Les bétons bitumineux avec un surdosage en poudre de caoutchouc sont moins résistants à l'action des chargements de longues durées.
- Le recouvrement viscoélastique (RVE) qui est le quotient de la déformation réversible après 1 heure de déchargement sur la déformation totale après 1 heure de chargement a été calculé et ceci pour distinguer une différence entre les mélanges bitumineux confectionnés avec différentes teneurs en poudre de caoutchouc. Cette quantité est maximale pour une teneur en poudre de caoutchouc de 2 % et même pour 1 % on a enregistré une augmentation par rapport au béton

CONCLUSION ET PERSPECTIVES:

Ce travail portant sur l'impact de la poudrette de caoutchouc sur le comportement des bétons bitumineux a été réalisé dans le cadre des activités du Laboratoire Construction et Environnement dans le but d'illustrer à partir d'une étude théorique et expérimentale, l'apport possible d'une modification des bétons bitumineux par l'introduction d'additifs en caoutchouc dans leurs squelettes granulaires, sur certaines caractéristiques mécaniques ou propriétés de mélanges bitumineux.

Cette modification ne peut pas être jugée sur la base de seuls critères techniques, mais il faut également tenir compte de l'aspect environnemental.

L'amélioration d'un enrobé bitumineux par rapport aux caractéristiques offertes par un enrobé ordinaire permet d'accroître à la fois le niveau et la durabilité des performances du mélange. Le jugement sur l'intérêt de l'amélioration apportée devrait être formulé sur la base d'une analyse technico-économique. Cette analyse suppose elle même que l'on dispose de données suffisantes sur le comportement dans le temps des matériaux de chaussées.

Si, la modification du béton bitumineux par l'ajout d'additifs bien choisis permet le plus souvent d'améliorer les caractéristiques et les propriétés des mélanges, et si l'amélioration croit en général avec le degré de modification, l'excès peut parfois ou souvent conduire à l'inverse c'est à dire en donnant un béton bitumineux de mauvais comportements.

Une analyse globale des résultats obtenus du travail expérimental mené en laboratoire nous conduit à tirer les conclusions suivantes :

- L'introduction de 1 à 2% de poudrette de caoutchouc dans les mélanges bitumineux à base du bitume 35/50 et 3% de cette même poudrette dans les mélanges bitumineux à base du bitume 70/100 offre une amélioration sur l'ensemble des caractéristiques et propriétés de l'enrobé ;
- Au delà de ces pourcentages, la poudrette de caoutchouc mène à une chute des caractéristiques de l'enrobé ce qui permet de dire que l'excès de la quantité ajoutée peut conduire à l'inverse du but recherché.

- les résultats affirment que la poudrette de caoutchouc joue un rôle de fillers dans le squelette granulaire en s'infiltrant dans les vides entre les granulats ; elle contribue donc à une amélioration de la compacité de 1,68% pour les agrégats de cap djinet et 4,11% pour les agrégats de jobert.
- la poudrette de caoutchouc joue également un rôle de liant par fusion avec le bitume ce qui peut être expliqué par la différence enregistrée dans les optimums lors de l'utilisation de différentes classes du bitume (entre 1 et 2% dans le cas d'utilisation du bitume 35/50 et 3% dans le cas du bitume 70/100).
- On a constaté lors de la confection des éprouvettes que la maniabilité ou la mise en œuvre du mélange diminue avec l'augmentation du pourcentage de la poudrette avec la formation des phases liant- polymère.
- On enregistre également un gain de la résistance mécanique pour une teneur entre 1% et 2% dans l'ensemble des formulations à base du bitume 35/50 (10,22% pour agrégats de cap djinet et 4,22% pour les agrégats de jobert) et pour 3% de poudrette avec du bitume 70/100 (53% pour les agrégats de cap djinet et 83% pour les agrégats de jobert).
- Pour le fluage Marshall, les teneurs de 1% et 2% ont donné de bons résultats(dans le cas du bitume 35/50 il passe de 53,5 à 38,5 soit 28,5% pour les agrégats de cap djinet et de 43,2 (0,1 mm) à 36.2 (0,1 mm) soit 16,2% pour les agrégats de jobert, avec le bitume 70/100 le fluage est réduit de 30%.
- La tenue à l'eau de l'enrobé exprimée par le r/R dans l'étude Duriez croît avec l'augmentation de la teneur en poudrette ou il passe de 0,84 à 0,99 (tend vers 1) pour les agrégats de jobert mais également pour les agrégats de cap djinet connus pour leur mauvaise adhésivité ou le rapport r/R passe de 0,77 à 0,96.
- Pour le comportement au fluage statique du mélange bitumineux avec 2% d'ajout on a enregistré une déformation totale de 7,098 % contre 11,409% pour l'enrobé de référence soit un gain de 60,73%, le gain dans la déformation irréversible est de 61,54% et est de l'ordre de 35% pour le module de rigidité total.

Des travaux complémentaires dans le même sens peuvent contribuer à l'enrichissement de la démarche, pour confirmer et élargir les recherches mises en place dans le domaine de la géotechnique routière :

- Mettre en place des moyens qui permettent d'étudier les différentes sollicitations, et considérer en détail l'influence des différents paramètres qui régissent les différentes propriétés des mélanges bitumineux.
- Réaliser des planches d'essais afin de pouvoir suivre l'évolution de l'enrobé sur la chaussée et avoir une idée sur le comportement de l'enrobé sur site et face à des sollicitations auxquelles il est soumis dans le temps. Ceci permet d'avoir une complémentarité entre les essais réalisés au laboratoire et in-situ.
- Rassembler le mode de modification par ajout et par modification du bitume dans le but de comparer les résultats et faciliter la mise en œuvre qui est difficile dans le deuxième cas.
- varier la nature de l'additif pour tirer des conclusions sur l'effet de chacun sur l'amélioration de l'adhésivité dans l'enrobé.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]. AFNOR, Enrobés hydrocarbonés, Recueil normes Bâtiment et travaux publics, Septembre 2000.

[2]. AFNOR, Essais relatifs aux chaussées, Recueil normes Bâtiment et travaux publics, Septembre 2000.

[3]. ARRAMBIDE J. & DURIEZ M : Nouveau traité de matériaux de construction, Tome 3 : Liants et Bétons hydrocarbonés, 2^{ème} édition, Dunod, Paris 1962.

[4]. ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE (AIPCR) & COMITE TECHNIQUE DES ROUTES(C8) : Emploi des liants modifiés, des bitumes spéciaux et des bitumes avec additifs en techniques routières :Guide technique, Septembre 1999.

[5]. BAAJ H : Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés, Thèse de doctorat INSA Lyon 2002.

[6]. BENSEBAA K : Étude rhéologique des liants modifiés, impact du vieillissement intégrant la démarche, haute qualité environnementale. Thèse de magister, IGC/USTHB 2003.

[7]. BENSE P : Enrobés Armés par déchets de matière plastiques, Bulletin de liaison des laboratoire des ponts et chaussées N°128, Novembre- Décembre 1983.

[8]. BODIN D, CHABOT A , de la ROCHE C, PIAU J M et CABOT G P: Essais de fatigue sur enrobés bitumineux et perspectives de modélisation par la mécanique de l'endommagement, Congrès Français de Mécanique, Nancy, 3-7 Septembre 2001.

[9]. BODIN D, CHABOT A , de la ROCHE C et CABOT G P: Endommagement par fatigue des matériaux, recherche de lois d'évolution de l'endommagement, laboratoire central des ponts et chaussées & Laboratoire de Génie Civil de Nantes-Sait Nazaire, Mécanique 2002.

[10]. COQUAND R : Routes : circulation- tracé- construction, Tome 2 : construction et entretien-7^{ème} édition Eyrolles, Paris 1980.

[11]. HADDADI S, Contribution à l'étude des matériaux traités aux liants hydrocarbonés : influence des paramètres de composition, Thèse de magister, IGC/USTHB 1995.

[12]. JEUFFROY J et SAUTEREY R: Cours de routes : Couche de roulement, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées 1985.

[13]. JEUFFROY G: Conception et construction des chaussées, Tome 2 : les matériaux, les matériels et les techniques d'exécution des travaux, 4^{ème} édition Eyrolles, Paris 1985.

- [14]. KAMEL H ; Étude de l'action des bitumes modifiés sur le comportement des enrobés, Thèse de Magister, IGC/USTHB 2001.
- [15]. KOLBANOVSKAJA A.S., MIHAJLOV V.V ; Les bitumes routiers, Transport, Moscou, 1973.
- [16] L.C.P.C. « Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire, projet de mode opératoire », Paris, France 1981.
- [17] L.C.P.C. « Essai à l'orniéreur, projet de mode opératoire », Paris, France 1981.
- [18]. LESSAGE J, Recherche par ordinateur de formules granulométriques d'enrobés bitumineux, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°87, Janvier-Février 1977.
- [19] LINDER R. « Application de l'essai de traction directe aux enrobés bitumineux, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Spécial N° V, Paris-France, 1977.
- [20]. MINISTERE DES TRANSPORTS, Mémento des spécifications françaises-Chaussées, Février 1984.
- [21]. MOMM I and SALINI R : Study of recycled tyre rubber in asphalt concrete mixtures, Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de Santa Catarina 2000.
- [22]. NORME FRANÇAISE, Granulats-Analyse granulométrique par tamisage, NFP18-560, Octobre 1978.
- [23]. NORME FRANÇAISE, Granulats-mesure des masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption, et teneur en eau des gravillons et cailloux. Décembre 1979.
- [24]. NORME FRANÇAISE, Enrobés hydrocarbonés ; Couche de roulement et couche de liaison : Béton bitumineux semi-grenus (BBSG), Définition, classification Caractéristique- Fabrication- Mise en œuvre, NF P 98-130, Novembre 1999.
- [25]. NORME FRANÇAISE, Équivalent de sable, NF P18-598, Octobre 1991.
- [26]. NORME FRANÇAISE, Granulats-Essai Los Angeles, NF P18-573, Octobre 1978.
- [27]. NORME FRANÇAISE, Granulats- Essai d'usure Micro- Deval Humide, NF P18-572, Octobre 1978.
- [28]. NORME EUROPÉENNE, NORME FRANÇAISE, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie 9 : Qualification des fines-Essai au Bleu de Méthylène, NF EN 933-9 Août 1999.
- [29]. NORME FRANÇAISE, Pétroles et dérivés- Produits bitumineux- Pénétrabilité à l'aiguille, NF T 66-004,

- [30]. NORME FRANÇAISE, Détermination de la température de ramollissement des produits bitumineux, Méthode « Bille et Anneau », NFT66-008,
- [31]. NORMALISATION FRANÇAISE, Granulats : Définition, conformité, spécifications, XP P18-540, Octobre 1997.
- [32]. NORME FRANÇAISE, Essais Marshall, projet de mode opératoire, Paris-France 1973.
- [33]. NORME FRANÇAISE, Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés, Partie 1 : Essai Duriez sur mélanges hydrocarbonés à chaud, NFP 98-251-1, juillet 1991.
- [34]. NORME FRANÇAISE, Enrobés hydrocarbonés : Terminologie : composants et composition des mélanges-mise en œuvre- Produits-Techniques et procédés, NF P 98-149, juin 2000.
- [35]. NORME FRANÇAISE, Détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés: Partie 1 : Essai par flexion à amplitude de flèche constante, NF P 98-261-1, Décembre 1993.
- [36]. NORME FRANÇAISE, Mesure des caractéristiques rhéologiques des mélanges hydrocarbonés, Partie 2 : Détermination du module complexe par flexion sinusoïdale, NF P 98 260-2, Septembre 1992.
- [37]. OULD-HENIA M & SOUAMI S: Amélioration des performances d'un béton bitumineux, Projet de fin d'études, ENP 1999.
- [38]. RAMOND G et SUSH C : Bitumes et bitumes modifiés, « Bitumes et enrobés bitumineux », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°168, juillet- août 1990.
- [39]. REGIS C : Cours de routes : Assises de chaussées, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées 1985.
- [40]. ROUTE ACTUALITE : Futur des industries européenne des enrobés et du bitumes, 2nd Euraspalt & Eurobitume Congress, Barcelona 2000.
- [41]. SOCIÉTÉ DES BITUMES SHELL, Bitumes, Technique et utilisation, Paris 1991.
- [42]. SPILLEMAECKER P.M., Étude des propriétés des enrobés drainant, Revue générale des routes et aérodromes, n°654, juillet 1989.

