

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



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire de fin d'études

**En vue de l'obtention du Diplôme
d'INGENIORAT D'ETAT
EN GENIE CIVIL**

Thème

*Modélisation du Comportement
d'un Sable Bitume
à base de Sable de Dune*

Réalisé par :

Hamami Ameer el Amine.

Proposé par :

Mme R. Kettab

Promotion Juin 2004

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Je dédie ce travail :

- * A la mémoire de mon père, que Dieu lui accorde sa miséricorde et lui réserve une place dans son vaste paradis.
- * A ma chère mère qui m'a donné le meilleur d'elle-même pour mon éducation mais aussi pour son précieux soutien durant toute ma vie, que Dieu la récompense.
- * A mes frères Adel, Mohamed El Badr et Imad Eddine Billel, qui restent pour moi les meilleurs frères au monde.
- * A ma cousine Karima qui m'a choyé et épaulé, qui reste la sœur que j'ai toujours voulu avoir.
- * A mes cousins Hcicen et Houcine qui sont les meilleurs cousins que l'on souhaite avoir.
- * A mes grands parents, mes tantes, mes oncles, et toute ma famille.
- * A Melle Aitoumeziane Imane, que Dieu me la garde et la récompense de m'avoir donné le meilleur d'elle.

Remerciements

- * Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage de surmonter les moments les plus difficiles de ma vie et la volonté de mener à terme ce travail.
- * Je remercie ma promotrice et tante Mme R. Kettab de m'avoir suivi, dirigé, et soutenu tout au long de ce travail. Son aide et ses conseils m'ont été très précieux.
- * Je remercie les membres du jury d'avoir bien voulu examiner et juger ce travail.
- * Je remercie le personnel du LCTP Hussein Dey, et plus particulièrement Mr M. Bensaïbi et Mr K. Ait Kait, pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée.
- * Je remercie également Mr Djadi, Mr Y. Mitiche et Salim de la SONATRO de m'avoir aidé à réaliser une partie de mes essais.
- * Je remercie Mme S. Oughanem du CTPP, ainsi que tout le personnel qui m'ont apporté leur aide.
- * Je remercie Mr A. Brara du CNERIB pour l'aide qu'il m'a apportée.
- * Je remercie Mr Benchekroun Yacine, ami et collègue pour toutes les épreuves que nous avons passé ensemble.
- * Mes plus vifs remerciements vont à ma chère maman, pour m'avoir soutenu, et pour avoir contribué à la correction de forme de ce document.
- * Je remercie également Mme Aitoumeziane pour son aide ainsi que toutes ses filles, et plus particulièrement Mlle Aitoumeziane Imane pour son soutien, sa disponibilité et sa contribution quant à la réalisation et à la finalisation de ce travail.
- * Je remercie également ma cousine Nadia, et son père Ami Ali d'avoir participé à la finalisation de ce travail.
- * Je remercie toute personne ayant, à divers titres, contribué à faire avancer ce travail.

:____U

.Hubbard Field Duriez

Fluage statique NAT

U:____U

, Fluage statique,NAT

Résumé : le présent travail consiste à confectionner un sable bitume à partir d'une formulation optimale à base de sable de dune et de sable concassé, procéder aux essais mécaniques Duriez et Hubbard Field, comparer et confirmer les résultats obtenus avec ceux déjà existants. Puis procéder aux essais de comportement, NAT et fluage statique pour aboutir aux courbes et modules propres à notre sable enrobé menant à la modélisation de son comportement mécanique, pour enfin lui attribuer la loi ou le modèle rhéologique les mieux adaptés.

Mots clés : Sable bitume, Sable de dune, Modèles rhéologiques, Modélisation, Comportement mécanique, NAT, fluage statique, loi de comportement.

Abstract : This work consists of making up a sand asphalt from an optimum formulation based on the dune sand and breaked sand, proceeding in mechanical tests which are DURIEZ and HUBAR FIELD, comparing and confirming the obtained results with others which exist before. After that, proceeding to some comportment tests, NAT and Creep Test, to lead to curves and modules which characterise our sand asphalt and for making a modelization of its mechanics comportment, in order to apply on it the best adapted rheological model or low.

Keywords : Sand bitumen, Dune sand, rheological models, modelization, mechanics comportment, NAT, creep test, Comportment low.

Sommaire

« Introduction Générale »

1

PARTIE THEORIQUE

Chapitre I : « Techniques de sable traité aux liants hydrocarboné »

I.1. Introduction	2
I.2. Matériaux composant le sable bitume	2
I.2.1. Les sables	2
I.2.2. Les bitumes	3
I.3. Définition du sable bitume	3
I.4. Classification / Seuil des matériaux	4
I.4.1. La granulométrie	5
I.4.2. La propreté	5
I.5. Les sables traités au bitume pour couches de roulement	5
I.5.1. Le sablage	6
I.5.2. Constituants d'un enrobé 0/D	6
I.5.3. Matériau principal	6
I.6. Les sables enrobés à chaud (micro-enrobé)	7
I.6.1. Qualités des constituants	8
I.6.2. Performances recommandées	10
I.7. Les enrobés fins (micro-bétons)	11
I.7.1. Domaine d'emploi	11
I.7.2. Qualités des constituants	11
I.7.3. Performances recommandées	12
I.7.4. Les améliorations envisageables lorsque le niveau de performances visé n'est pas atteint.....	13
I.8. Formulation du sable bitume.....	15
I.8.1. Détermination de la teneur en liant.....	15
I.8.2. Calcul de la compacité des éprouvettes.....	16
I.8.3. Notion de stabilité.....	17
I.9. Conclusion.....	18

Chapitre II : « Comportement du sable bitume »

II.1. Introduction.....	19
II.2. Rhéologie.....	19
II.3. Comportement viscoélastique.....	19
II.3.1. Comportement solide et liquide.....	19
II.3.2. Comportement linéaire : principe de superposition de Boltzmann.....	20
II.3.3. Fonction de fluage et de relaxation.....	20

II.4. Modèles viscoélastiques élémentaires.....	22
II.4.1. Solide élastique parfait.....	22
II.4.2. Liquide visqueux newtonien.....	24
II.4.3. Lois d'association en série et en parallèle.....	25
II.4.4. Solide de Kelvin – Voigt	26
II.4.5. Liquide de Maxwell.....	28
II.5. Modèle Viscoélastique général.....	30
II.5.1. Modèle de Kelvin – Voigt généralisé.....	30
II.5.2. Modèle de Maxwell généralisé.....	33
II.6. Essais de comportement.....	37
II.6.1. Essai de traction indirecte répétée au NAT (Nottingham Asphalt Tester).....	37
II.6.2. Essai de fluage statique uniaxial.....	39
II.6.3. Essai de fluage dynamique.....	40
II.7. Conclusion.....	41

Chapitre III : « Etude Bibliographique »

III.1. Introduction.....	42
III.2. Présentation des matériaux utilisés.....	42
III.2.1. Sable de dune de Hassi Berkine.....	42
III.2.2. Sable concassé (Haoud el Hamra).....	43
III.2.3. Les fines d'ajout.....	44
III.2.4. Les liants	45
III.3. Série d'essai (traitement à chaud).....	45
III.3.1. Influence de la teneur en bitume sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	45
III.3.2. Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	46
III.4. Conclusion.....	48

PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre IV : « Formulation et essais mécaniques sur sable bitume»

IV.1. Introduction.....	49
IV.2. Essais de laboratoire.....	49
IV.2.1. Identification des sables.....	49
IV.2.2. Identification des liants.....	49
IV.2.3. Essais mécaniques.....	49
IV.3. Présentation des matériaux utilisés.....	50
IV.3.1. Les sables.....	50
IV.3.2. Les liants.....	55
IV.3.3. Bitume 40/50 modifié avec le SELENE 120.....	58
IV.3.4. Les fillers calcaires.....	58

IV.4. Formulation du sable bitume.....	59
IV.4.1. Formulations utilisées	59
IV.4.2. Fuseau granulaire pour micro-enrobé.....	59
IV.5. Résultats des essais mécaniques	60
IV.5.1. Première série d'essais (65% SD + 35% SC + Bitume 40/50)	60
1. Gâchée confectionnée avec les sables de Biskra	60
2. Gâchée confectionnée avec les sables de Ouergla	61
IV.5.2. Deuxième série d'essais (65% SD + (21-22%) SC + (13-14%) de fillers calcaires + Bitume 40/50)	62
1. Gâchée confectionnée avec les sables de Biskra + fillers calcaires	62
2. Gâchée confectionnée avec les sables de Ouergla + fillers calcaires	62
IV.5.3. Troisième série d'essais (65% SD + 35% SC + Bitume 40/50 modifié au SELENE 120)	63
1. Gâchée confectionnée avec les sables de Biskra (bitume modifié)	63
2. Gâchée confectionnée avec les sables de Ouergla (bitume modifié)	64
IV.6. Conclusion	64

Chapitre V : « Modélisation du comportement du sable bitume »

V.1. Introduction	65
V.2. Essais de comportement effectués	65
V.2.1. Module de rigidité mesuré au Nottingham Asphalt Tester (NAT)	65
V.2.2. Essai de résistance à la traction indirecte	67
V.2.3. Essai de fluage statique	70
V.3. Modélisation du comportement	73
V.3.1. Analyse des courbes	73
V.3.2. Elasticité instantanée E_0	74
V.3.3. Modules de viscosité	74
V.3.4. Application du modèle de Kelvin-Voigt généralisé	76
V.4. Conclusion	79

« Conclusion Générale »

81

« Références Bibliographiques »

« Annexes »

Liste des figures

N°	Titre	Page
I.1	Fuseau granulométrique utilisé pour les micro-enrobés	8
I.2	Fuseau granulométrique conseillé pour les micro-bétons	12
II.1	Fonction de fluage	21
II.2	Fonction de relaxation	21
II.3	Fonction fluage du solide de Hooke	23
II.4	Solide de Hooke	23
II.5	Fonction fluage du liquide visqueux newtonien	25
II.6	Liquide visqueux newtonien	25
II.7	Association en parallèle	26
II.8	Association en série	26
II.9	Solide de Kelvin Voigt	26
II.10	Comparaison entre les fonctions fluage du solide de Hooke et celui de Kelvin Vogit	28
II.11	Liquide de Maxwell	28
II.12	Fonction fluage du liquide de Maxwell	29
II.13	Modèle de Kelvin Voigt généralisé	31
II.14	Fonction fluage du solide de Kelvin Voigt généralisé	31
II.15	Cas particulier du modèle de Kelvin Voigt généralisé η_0 infinie	32
II.16	Graphe de la déformation subie par le solide de Kelvin Voigt généralisé	33
II.17	Modèle de Maxwell généralisé	34
II.18	Fonction relaxation du le modèle de Maxwell généralisé	35
II.19	Modèles équivalents désignant un comportement liquide sans élasticité instantanée	36
II.20	Déformation d'une éprouvette – Essai de traction indirecte NAT –	37
II.21	Evolution de l'effort de déformation en fonction du temps	37
II.22	Matériel utilisé dans l'essai de traction indirecte répétée au NAT	38
II.23	Dispositif de montage de l'éprouvette	39
II.24	Capteurs de déformation	39
II.25	Schéma du principe du fluage statique uniaxial.	40
II.26	Schéma du principe du fluage dynamique	40
III.1	Composition granulométrique du sable de dune de Hassi Berkine	43
III.2	Composition granulométrique du sable concassé de Haoud el Hamra	44
III.3	Influence de la teneur en bitume 40/50 sur la stabilité Hubbard Field (100% sable de dune)	46
III.4	Influence de la teneur en bitume 40/50 sur la compacité (100% sable de dune)	46
III.5	Influence de la teneur sable concassé sur la stabilité Hubbard Field	47
III.6	Influence de la teneur sable concassé sur la compacité	48
IV.1	Composition granulométrique du sable de dune de Ouergla	51
IV.2	Composition granulométrique du sable concassé 0/3 – Ouergla	52
IV.3	Composition granulométrique du sable de dune de Biskra	54
IV.4	Composition granulométrique du sable concassé 0/3 de la carrière Lamouri Biskra	55
IV.5	Influence du dosage du bitume en SELENE sur la pénétrabilité	56
IV.6	Influence du dosage du bitume en SELENE sur le point de ramollissement	57
IV.8	Fuseau granulaire pour le mélange de sables de Biskra	60

Liste des figures

N°	Titre	Page
IV.9	Fuseau granulaire pour le mélange de sables de Ouergla	60
V.1	Courbes de calcul du module de déformation E_1	65
V.2	Courbes de calcul du module de déformation E_2	66
V.3	Variation de la forme de l'éprouvette au cours de l'essai de traction indirecte	68
V.4	Courbe contrainte déformation pour la détermination du module de déformation	69
V.5	Matériel utilisé dans l'essai de fluage statique	70
V.6	Courbe du fluage statique (65% SD + 35% SC + bitume 40/50)	71
V.7	Courbe du fluage statique (65% SD + 35% SC + bitume 40/50 modifié au SLENE 120)	73
V.8	Approximation de la branche linéaire de la courbe de fluage (65% SD + 35% SC + bitume 40/50)	74
V.9	Approximation de la branche linéaire de la courbe de fluage (65% SD + 35% SC + bitume 40/50 modifié au SELENE 120)	75
V.10	Modèle de Kelvin Voigt généralisé appliqué à notre sable bitume	76
V.11	Détermination du coefficient E_e^0 (65% SD + 35% SC + bitume 40/50)	77
V.12	Détermination du coefficient E_e^0 (65% SD + 35% SC + bitume 40/50 modifié au SELENE 120)	78

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
I.1	Catégories de sables	5
III.1	Analyse chimique du sable de dune de Hassi Berkine	42
III.2	Composition granulométrique du sable de dune de Hassi Berkine	42
III.3	Analyse chimique du sable concassé de Haoud el Hamra	43
III.4	Composition granulométrique du sable concassé de Haoud el Hamra	44
III.5	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le sable de dune de Hassi Berkine (bitume 40/50)	45
III.6	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec ajout de sable concassé (bitume 40/50)	47
IV.1	Analyse chimique du sable de dune de Ouergla	50
IV.2	Composition granulométrique du sable de dune de Ouergla	50
IV.3	Analyse chimique du sable 0/3 concassé de Ouergla	51
IV.4	Composition granulométrique du sable 0/3 concassé de Ouergla	52
IV.5	Analyse chimique du sable de dune de Biskra	53
IV.6	Composition granulométrique du sable de dune de Biskra	53
IV.7	Analyse chimique du sable de dune 0/3 concassé de Biskra	54
IV.8	Composition granulométrique du sable 0/3 concassé de Biskra	55
IV.9	Analyse chimique des fillers calcaires	58
V.1	Résultats de l'essai au NAT de la première formule	66
V.2	Résultats de l'essai au NAT de la deuxième formule	67
V.3	Résultats de l'essai de fluage statique sur la 1 ^{ère} gâchée	70
V.4	Résultats de l'essai de fluage statique sur la 2 ^{ème} gâchée	72
V.5	Résultats du calcul du coefficient η_1	79

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Pour des raisons d'ordre pratique, la technique du sable bitume en couche de roulement s'est imposée au cours des années 50. En effet, certaines régions du monde, les zones désertiques par exemple, manquent de granulats routiers autochtones ce qui a permis de réfléchir à des matériaux de substitution locaux tel que le sable du désert. Son utilisation en technique routière a des incidences non négligeables du point de vue économique tels que les coûts du transport. Le recours à cette technique s'avère très intéressant pour les routes à faible ou moyen trafic.

Nombreuses formules ont été développées pour la technique du sable bitume en utilisant différents paramètres : diverses origines de sable, granulométrie variée, performance inégale. Ces multitudes de paramètres limitent l'application du sable bitume aux couches de fondations sauf pour les routes à faible trafic.

Il en découle que le domaine d'application du sable bitume semble restreint.

Il n'existe pas actuellement de spécifications précises sur ce produit, compte tenu du manque d'expérience. Il est cependant caractérisé par :

- un pourcentage de vides après compactage assez élevé, qui laisse peser une incertitude sur sa stabilité à long terme ;
- la nécessité d'incorporer des fines d'apport lorsque les fines naturelles du sable n'atteignent pas un pourcentage de l'ordre de 5% du mélange. La meilleure solution pour atteindre cet objectif consiste à incorporer au sable naturel un sable concassé ou broyé en raison de 10 à 15% du mélange, qui apporte, outre les fines nécessaires, une certaine angularité et une correction granulométrique favorable à la stabilité ;
- Le choix d'un bitume dur (40/50) en raison de 6 à 7 % reste essentiel pour l'obtention d'une rigidité et d'une stabilité mécanique convenable.

Notre travail consiste à formuler un sable bitume à partir de sables de dunes auxquels on ajoute du sable concassé et des fillers calcaires. Pour cela, nous nous sommes référés à une étude effectuée au préalable.

Sur l'enrobé, ainsi composé, nous avons d'abord effectué des essais mécaniques, à savoir, Duriez et Hubbard-Field. Nos résultats ont été comparés à ceux de notre étude de référence. Ensuite, des essais de comportement de cet enrobé ont été réalisés à savoir, l'essai au Nottingham Asphalt Tester (NAT), fluage statique afin d'obtenir les caractéristiques rhéologiques de notre enrobé.

En finalité, cette étude nous permettra d'évaluer le comportement mécanique de notre sable bitume, de le modéliser et de lui attribuer une loi ou un modèle de comportement.

Partie Théorique

Chapitre I

Techniques de Sable Traité aux Liants Hydrocarbonés

I.1. INTRODUCTION

Dans le présent chapitre, nous allons parler des sables bitumes de leur formulation ainsi que de leurs spécifications, pour cela nous donnerons plusieurs définitions concernant les matériaux constituant, de leurs caractéristiques et des paramètres influençant sur leur choix. Nous présenterons aussi des essais mécaniques effectués dans le cadre du choix de la formulation.

I.2. MATERIAUX COMPOSANT LE SABLE-BITUME

I.2.1. Les sables

On appelle couramment sables les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30%. [01]

A cette définition se rattachent les sables de concassage mais lorsque l'on dit sable, on pense essentiellement aux sables naturels ; ces derniers sont abondants dans de nombreux pays où les réserves sont quasi inépuisables.

Les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation comportant à des degrés divers une décomposition sur place des différentes roches suivies d'un transport fluvial et parfois éolien. En règle générale, les différents processus qui conduisent de la roche massive aux sables sont suffisamment agressifs vis-à-vis des minéraux pour que seul subsistent les plus résistants ; c'est ainsi que la plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz. D'une façon générale le quartz devient de plus en plus abondant à mesure que la taille des grains décroît.

C'est ainsi que la fraction comprise entre 0,2mm et 0,5mm est le plus souvent constituée de quartz à plus de 75%. Selon l'importance et la nature de leur transport, ces grains de sable peuvent présenter un aspect différent :

- grains émoussés et luisants (usure due au déplacement par l'eau) ;
- grains ronds et mats (déplacement par le vent) ;
- grains non usés.

A côté du quartz, on trouvera dans la fraction la plus grossière des débris de roche et de débris de feldspath présent en faible quantité. Il est à noter que ces dernières sont surtout sous forme d'argile obtenue par destruction du réseau minéral par hydrolyse et en particulier en climat tropical caractérisé par une attaque chimique intense.

A cette composition classique des sables, peuvent s'ajouter des sulfates et des carbonates provenant de la cristallisation sous l'action de l'évaporation de sels en solution (en particulier dans les zones arides à faible pluviosité et forte évaporation).

En définitive, selon leur histoire géologique, les sables se distinguent les uns des autres par une multitude d'aspect : granulométrie, teneur et nature des fines, nature minéralogique, angularité, dureté, présence de matière humiques...

Tous ces aspects sont d'inégale importance dans l'optique d'un usage routier et les classifications fonctionnelles reprendront les aspects les plus utiles.

I.2.2. Les bitumes

Les bitumes sont composés d'hydrocarbures de masse moléculaire élevée appartenant en majorité aux groupes aliphatiques et naphthéniques, auxquels s'ajoutent en moindre quantité du soufre, de l'azote et des traces de métaux divers. Les hydrocarbures sont pour l'essentiel saturés et donc peu actifs. [09]

Ils se présentent comme un système colloïdal dans lequel les micelles sont constituées d'asphaltènes, à forte masse moléculaire, peptisées par des résines, et la phase intermicellaire de maltènes, d'aspect huileux.

Les propriétés des bitumes résultent des proportions et de la composition chimique précise des différents constituants.

Leurs caractéristiques et leur comportement sont déterminés par un certain nombre d'essais dont les principaux sont l'essai de pénétrabilité, l'essai de ramollissement billes et anneaux, essai de point de flamme et l'essai de point d'éclair, qui permettent de les classer en catégories normalisées. (pour plus de détails voir annexe « A »).

I.3. DEFINITION DU SABLE BITUME

Le sable bitume est un mélange de sable (naturel ou artificiel) avec un bitume traité en centrale et destiné à être utilisé en couche d'assise ou couche de roulement ; pour des questions de coûts de revient, les sables généralement utilisés sont des sables naturels.

Les sables artificiels sont employés en apport à un sable naturel pour améliorer son angularité, sa granulométrie et introduire des fines.

Les sables naturels utilisés en construction routière sont prélevés :

- Soit dans des gisements appartenant à des couches géologiques classiques ;
- Soit dans des alluvions des rivières ou fleuves ;
- Soit, plus rarement, sur des plages ou dunes actuelles.

Les utilisations des sables dépendent essentiellement de leur granularité dans la mesure où celle-ci a une influence directe sur l'aptitude au compactage, la perméabilité et la capillarité.

Les essais mécaniques qui permettent de juger les sables bitumes sont donc ceux que subissent tous les mélanges bitumeux posés en assise de chaussée. Les types d'essais mécaniques correspondant aux fonctions de l'assise sont :

- Essais de module ;
- Essai de fatigue ;
- Essai de fluage dynamique ou l'orniérage L.P.C.

Le sable utilisé est un sable propre ($E.S > 40$, $IP=0$). Généralement ce type de sable manque de fines. Les fines d'ajout sont soit des matériaux de concassage- broyage (sable, fines calcaires), soit des pulvérulents industriels (chaux et ciment). L'enrobage s'effectue en centrales à l'aide d'un bitume pur dur pour gagner en cohésion.

Les différences essentielles entre les sables bitumes et les sables enrobés à froid tiennent à deux aspects :

La nature des matériaux

La nature et le rôle du liant.

Les sables utilisés pour réaliser des sables enrobés à froid sont naturellement stables, le liant ayant pour rôle de maintenir cette stabilité dans l'environnement climatique du matériau (risques d'imbibition ou au contraire de dessiccation).

A l'inverse, les sables bitumes tiennent la majeure partie de leur cohésion au liant utilisé, le niveau de performance atteint résulte à la fois de la dureté du liant et de la granulométrie du matériau.

I.4. CLASSIFICATION / SEUIL DES MATERIAUX

La classification a pour intérêt de regrouper en familles les matériaux qui présentent des points communs soit dès leur genèse, soit dans leur comportement lié à un usage précis.

On conçoit de ces conditions qu'il n'y a pas une seule classification mais plusieurs selon l'usage envisagé, chacune répondant à une fonction. Il existe de ce fait des classifications géologiques, pédologiques ou géotechniques. [01]

En ce qui concerne l'usage des sables en construction routière, sont plus particulièrement importants :

Les terrassements, couche de forme et assises non traitées.

Les assises de chaussée traitées au liant.

La classification utilisée en terrassement et couche de forme est surtout axée sur la sensibilité à l'eau des matériaux, sur leur état naturel et sur la taille des gros éléments qui les constituent ; bien que ces données restent importantes au niveau d'un emploi en assises de chaussées traitées, elles ne sont pas suffisamment discriminantes.

Une classification simplifiée a été retenue pour les sables dans ce domaine d'emploi ; elle est essentiellement basée sur la granulométrie et la propreté.

I.4.1. La granulométrie

On distingue trois catégories de sables :

- **Grossier** : plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80µm sont compris entre 0,5 et 5 mm.
- **Moyen** : moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80µm sont compris entre 0,2 et 2 mm.
- **Fin** : plus de 75% des éléments supérieurs à 80 µm sont inférieurs à 0,5 mm.

« **Tableau I.1 : Catégories de sables** »

		Granulométrie				
		> 2 mm	0,5 – 5 mm	0,2 – 2 mm	< 0,5 mm	< 80 µm
Classe	Grossier	> 20 %	> 50 % de (100-f)	--	--	< 35%
	Moyen	>20 %	--	> 50 % de (100-f)	--	
	Fin	--	--	--	> 75 % de (100-f)	

I.4.2. La propreté

Elle est appréciée globalement par la valeur de l'essai au Bleu, cet essai est réalisé sur la totalité du sable (et non sur les fines uniquement). Le résultat est exprimé en grammes pour 100 g de sable. Sur cette base quatre classes sont définies :

VB	≤ 0,2	Matériau propre.
0,2 < VB	≤ 0,5	Matériau légèrement pollué.
0,5 < VB	≤ 1	Matériau pollué.
1 < VB		Matériau très pollué.

Toutefois, les essais traditionnels (ES, et IP) sont toujours utilisés à titre supplémentaire.

I.5. LES SABLES TRAITES AU BITUME POUR COUCHES DE ROULEMENT

L'emploi des sables en couche de roulement est une éventualité intéressante dans les régions dépourvues de roches dures et disposant de ce matériau. Cet emploi peut prendre des aspects très divers. Il peut s'agir [01]:

- Soit du simple sablage d'une couche de cure ;
- Soit d'un emploi en tant que constituant d'un enrobé à chaud 0/D ($10 \leq D \leq 16$ mm) ;

- Soit enfin comme matériau principal de la couche de roulement.

I.5.1. Le Sablage

Cette opération est destinée à permettre la circulation (par véhicules légers) sur une couche de cure ou d'imprégnation en évitant ainsi le collage du liant aux pneus des véhicules. On utilise généralement des gravillons de petit diamètre (2/4, 4/6, ou 2/6) mais un sable peut convenir dans la mesure où il est relativement grossier (0/4 à 0/6) propre sans fines et de granulométrie assez « creuse ». Les sables fins monogranulaires (type sable de dune) sont à éviter.

I.5.2. Constituants d'un enrobé 0/D.

Selon leur formation, les enrobés 0/D de couche de roulement sont employés dans une gamme d'épaisseur de 4 à 8cm. Généralement, le pourcentage de sable employé est compris entre 30 et 60 % selon la granulométrie du sable et la valeur (D) de l'enrobé.

Ce sable, dans les formules les plus performantes, est concassé, toutefois, un certain pourcentage de sable roulé peut être employé. L'emploi de sable a les conséquences suivantes:

- Il diminue la résistance à l'orniérage ;
- Il affecte la rugosité de surface ;
- Et il améliore la maniabilité de la formule (élément souvent utile pour des mises en œuvre en faible épaisseur).

Pour des emplois supérieurs à 20 %, les sables roulés seront toujours des sables à granulométrie étalée (sables moyens ou grossiers) ; l'emploi de sable fin monogranulaire dégrade rapidement les performances.

Les sables utilisés seront propres (IP =0, E.S. >40).

I.5.3. Matériau Principal

Différentes techniques sont envisageables, une caractéristique commune est qu'elles sont toutes employées pour des épaisseurs inférieures à 4cm.

On peut vouloir réaliser :

a. Un sable enrobé à chaud (Sand Asphalt)

C'est une technique réalisée à chaud. Il s'agit d'enrobé 0/D ($2 \leq D \leq 4\text{mm}$) constitué en majorité de sable roulé mais pouvant contenir un certain pourcentage de sable concassé destiné à améliorer ses performances.

Il se distingue des sables bitumes utilisés en assise :

- par une teneur en liant plus élevée (6,5% au lieu de 4 à 4,5%)
- par des exigences de qualité plus restrictives concernant les sables utilisables en particulier du point de vue granulométrique : les sables fins monogranulaires ne sont pas employés à teneurs élevées. La compacité en place de ce type d'enrobés est de l'ordre de 90 %. On peut l'améliorer (mais aux dépens de la rugosité) en faisant évoluer la formulation de ce type d'enrobés vers celle des mastics bitumineux (sheet asphalt) : Ces enrobés peuvent contenir en quantité variable du sable roulé moyen ou grossier, du sable concassé et du sable fin roulé (maximum 30%). La particularité d'un sable bitume par rapport aux sables enrobés est que celui-ci est plus fins et plus riches en fines et en bitume. La rigidité du mélange fines-bitume vient compenser l'instabilité liée à l'emploi de sable fin. Ces enrobés sont compacts (95%) et étanches ; ils sont malheureusement très glissants. Autrefois très utilisés en milieu urbain, leur coût élevé (compte tenu du fort dosage en bitume nécessaire : pouvant parfois atteindre jusqu'à 9%) tend de plus en plus à les faire disparaître des applications.

b. Un enrobé fin

C'est une technique réalisée à chaud. Il s'agit d'enrobé 0/D ($4 \leq D \leq 6$ mm). [01]

Constitués entièrement de sable concassé, ils constituent des micro-bétons. Ils peuvent cependant contenir un certain pourcentage d'éléments roulés selon le niveau de performance souhaité lié à l'intensité du trafic.

Ils se distinguent des sables enrobés par une granularité plus étalée et un niveau de performances plus élevé. Ils sont également plus compacts.

Lorsqu'ils sont coulés, ils sont comparables à tous points de vue à des enrobés classiques 0/10 ou 0/14 pour une mise en œuvre en 4cm (enrobés d'entretien).

c. Des coulis bitumineux

Il s'agit de mélanges à froid ; ces coulis sont constitués de sable, de fines, d'émulsion de bitume et d'eau de façon à produire un mélange de consistance fluide. Après le répannage, le coulis, en perdant son eau, se transforme en un revêtement bitumineux analogue à un mortier. Lorsque le sable est entièrement concassé, on constitue des micro- bétons coulés.

I.6. LES SABLES ENROBÉS À CHAUD (MICRO-ENROBE)

Les sables enrobés à chaud (ou micro-enrobés) sont utilisables pour des chaussées à trafic faible à moyen (inférieur à 1000 véhicules/jour). L'épaisseur employée est généralement de l'ordre de 3 cm avec une certaine tolérance. Pour une chaussée parfaitement profilée, le répannage peut descendre à 20 à 30 kg/m², mais le minimum est plus couramment de 40 kg/m² et de façon habituelle le choix se fixe à 60 kg/m². [01]

La limitation d'emploi du point de vue du trafic de ce type d'enrobé tient essentiellement à deux causes :

- le niveau de performances est limité.
- l'emploi de sable naturel (roulé) non recomposé en quantité importante entraîne une certaine hétérogénéité de composition donc aussi de performances. Les micro-enrobés n'ont pas une étanchéité parfaite ; ils sont donc à déconseiller sur couche de base en grave non traitée.

Ces enrobés sont utilisables en rase campagne. Ils ont généralement une bonne microrugosité, mais ne procurent pas, à une grande vitesse, la même sécurité vis-à-vis de la glissance que les enrobés réalisés avec des granulats plus gros et concassés.

Les micro-enrobés sont bien adaptés aux sites urbains. Il faut toutefois éviter les zones trop sollicitées (carrefours avec feux, arrêt de bus ...). Ces enrobés peuvent permettre un reprofilage léger de la chaussée mais pour des épaisseurs (en rives notamment) supérieures à 5cm, il y a lieu de préférer une autre technique (sable-bitume en particulier) réalisée préalablement à l'application de micro-enrobés.

I.6.1. Qualités des constituants

a. Les matériaux

On utilise généralement des sables naturels moyens ou grossiers. Le fuseau granulométrique (figure I.1) est limité par [01]:

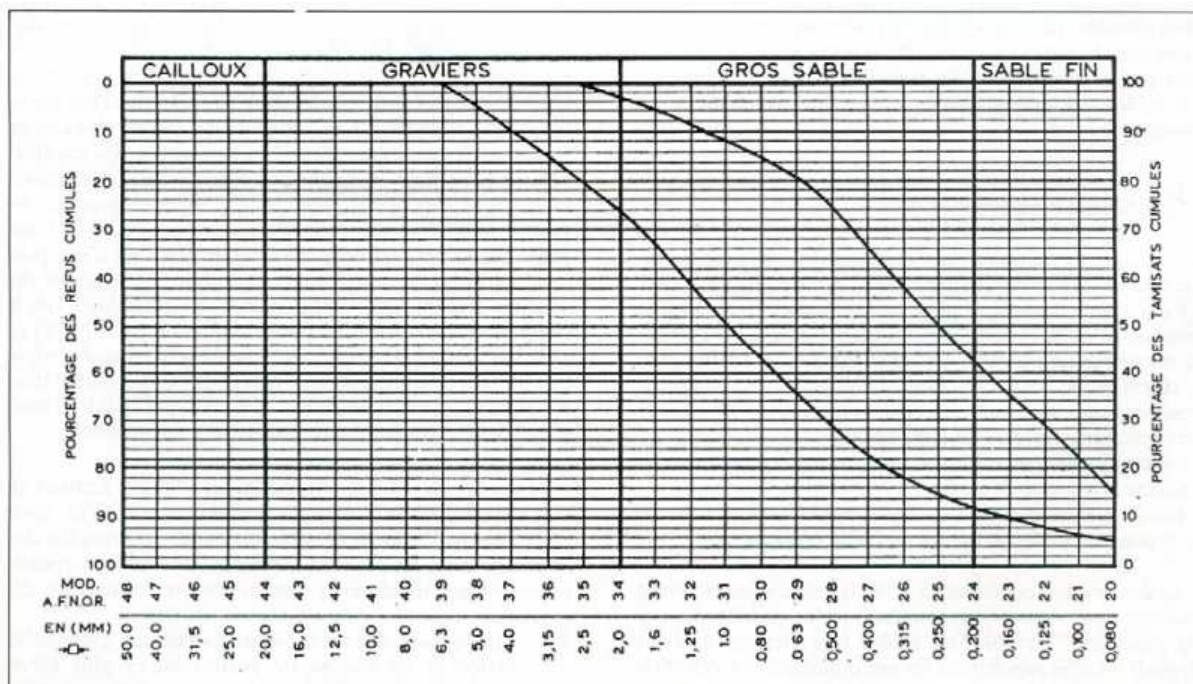


Figure I.1. : « Fuseau granulométrique utilisé pour les micro-enrobés »

- *une courbe basse* : par la notion même de sable (pour la valeur du diamètre maximum D) et la nécessité d'un minimum de compacité (ce qui exclut les courbes trop creuses).

- *une courbe haute* : pour des problèmes d'aspect de surface de la couche de roulement, également de dosage en bitume et aussi de compacité (la teneur en vide des sables fins est très important).

Les sables utilisés doivent par ailleurs être propres :

IP non mesurable (= 0)

ES > 40

Lorsque la propreté du sable se situe à un niveau légèrement inférieur à cette limite, on pourra réaliser l'essai sur matériau après passage dans le tambour sécheur de la centrale (l'élimination ou séchage d'ultrafines dans les fumées peut en effet conduire à l'amélioration de l'équivalent de sable).

La teneur en fines naturelles des sables est généralement insuffisante. Le complément sera assuré soit par des fines d'apport, soit par un sable de concassage ou de broyage.

- les fines d'apport seront toujours d'origine artificielle, soit un résidu industriel de dépoussiérage, soit un pulvérulent fabriqué (fines calcaires, chaux grasse, ciment).

Le sable de concassage ou de broyage devra être riche en fines pour contribuer efficacement à l'amélioration de la teneur en fines du mélange : généralement cette teneur en fines se situe dans une gamme de 15 à 35 % et l'ajout de sable concassé dans le mélange de 10 à 30 %.

b. Les Liants

Compte tenu généralement du manque d'angularité du matériau, il conviendra d'éviter les bitumes de pénétration trop importante (pénétration à 25°C supérieure à 100 dixièmes de mm), ceci afin d'éviter les risques d'orniérage.

A l'inverse, des liants de trop faibles pénétrations peuvent conduire très rapidement par vieillissement à une rigidité élevée ce qui peut avoir comme conséquence de rendre le matériau très sensible aux phénomènes de fatigue. Dans la pratique, il est conseillé de choisir un bitume dont la pénétration est comprise entre 50 et 100. La teneur en liant utilisé est fréquemment de l'ordre de 7 à 9%. Il est à noter que certains liants spéciaux permettent d'augmenter les performances (bitume élastomère en particulier). Mais leur coût élevé est peu compatible avec la rusticité de ce type d'enrobés.

I.6.2. Performances Recommandées

Trois essais sont généralement faits pour apprécier le niveau de performances des micro-enrobés :

- stabilité Hubbard Field.
- stabilité Marshall.
- immersion – compression LCPC (Duriez).

Pour des niveaux de trafic limités à ceux prescrits pour ce type de matériau (inférieur à 1000 véhicules/jour), les caractéristiques recommandées sont les suivantes :

Hubbard Field	{	Stabilité minimale à 60°C de 500 daN
		Compacité comprise entre 88 et 95%
Marshall	{	Stabilité à 60°C \geq 300 daN
		Compacité comprise entre 87 et 94%
LCPC	{	Résistance à la compression à sec à 18°C : RC \geq 3,5 MPa
		Tenue à l'immersion I/C $>$ 0,75
		Compacité comprise entre 85 et 92%

Un niveau de compacité minimum est souhaitable pour garantir une certaine imperméabilisation ; cette compacité est par ailleurs limitée pour éviter le ressuage du bitume et l'instabilité de l'enrobé.

Une formule ne répondant pas à l'un ou l'autre de ces critères est améliorable de différentes manières selon le critère :

- *Mauvaise tenue à l'immersion :*

- Il peut s'agir d'une mauvaise adhésivité entre le sable et le bitume : utiliser un dope d'adhésivité pour enrobage à chaud ou de la chaux en fines d'apport.
- Il peut s'agir d'une imbibition trop importante : pour la diminuer, il convient d'augmenter la compacité en augmentant la teneur en fines ou en liant ou les deux.

- *Stabilité ou résistance trop faible :*

- Ajouter ou augmenter le dosage en sable de concassage.
- Augmenter la dureté du bitume et faire varier le dosage.
- Modifier la courbe granulométrique par ajout d'un petit gravillon (cas des sables trop fins).
- Faire varier le rapport fines/bitume : la stabilité du mélange varie en fonction de ce rapport. Elle passe généralement par un optimum pour un rapport dont la valeur dépend de la nature des fines. Cette valeur se situe généralement entre 1,5 et 2% (selon le pouvoir rigidificateur des fines employées).

I.7. LES ENROBES FINS (MICROS-BETONS)

I.7.1. Domaine d'emploi

Les micro-bétons sont utilisables sur chaussées de tous trafics mais leur niveau de qualité et de performance les désignent plutôt pour les trafics les plus importants (supérieur à 1000 véhicules/jour). Tous les emplois envisageables avec les micro-enrobés le sont également avec les micro-bétons sans restriction sur la stabilité. Par ailleurs, l'influence des caractéristiques de surface vis-à-vis de la glissance peut être résolue par cloutage. Les gammes d'épaisseur d'emploi sont également similaires (épaisseur normale d'utilisation de 3cm). Les limites d'emploi tiennent compte de la faible épaisseur résultant du niveau de trafic et de la déflexion. [01]

I.7.2. Qualités des constituants

a. Les Matériaux

On utilise généralement des sables de concassage ; une très bonne homogénéité de constitution peut être assurée par reconstitution en centrale en 2 ou 3 composants par exemple 0/2 et 2/6 ou 0/2 et 2/4 et 4/6.

La granulométrie du mélange est en règle générale plus étalée (figure I.2) [01] et le diamètre maximum D plus élevé que pour les micro-enrobés ce qui confère aux micro-bétons un niveau de performances et une compacté plus élevés.

Un certain pourcentage de sable roulé moyen ou grossier peut-être utilisé. Généralement, un tel emploi diminue les performances. Cette diminution peut-être compensée si l'emploi l'exige par l'utilisation de liants spéciaux (bitume-souffre, bitume élastomère, etc...). la teneur en fines nécessaire augmente lorsque le diamètre maximum diminue.

Les sables de concassage employés ne devront pas être friables, on aura les mêmes exigences de propreté que pour les micro-enrobés.

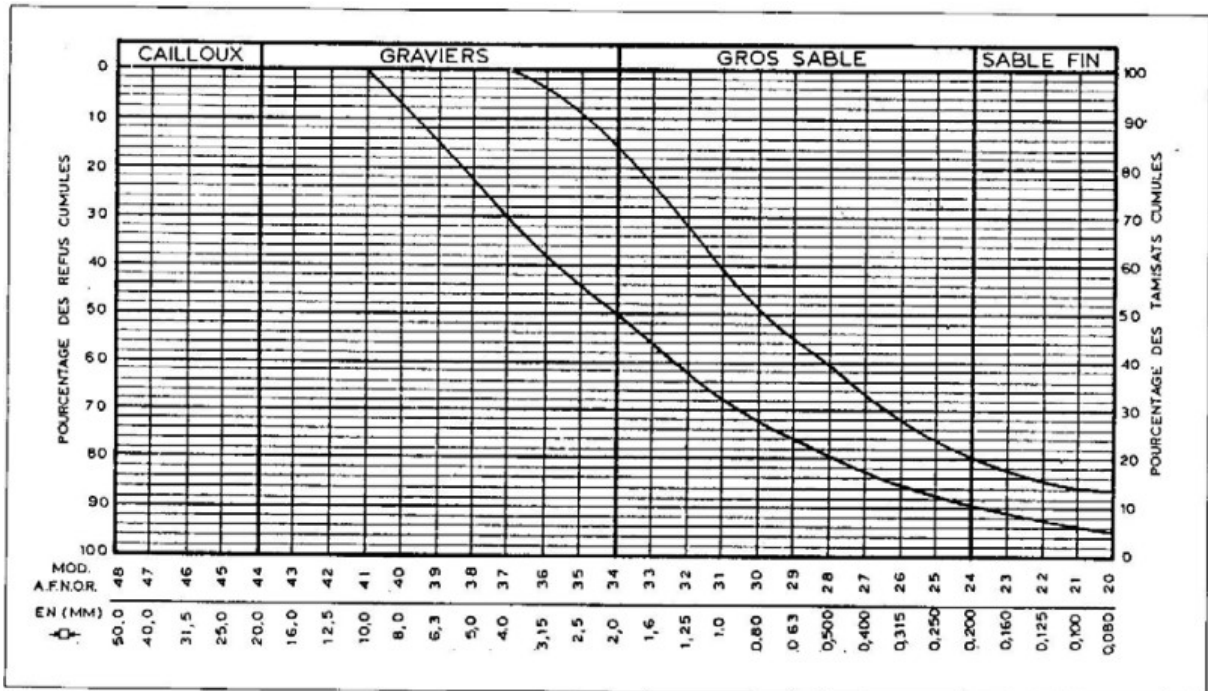


Figure I.2. : « Fuseau granulométrique conseillé pour les micro-bétons »

b. Le bitume

le choix du liant sera fonction du niveau de trafic et de la déflexion du support : moins sensible que les micro-enrobés au problème d'orniérage, il s'agira surtout de se prémunir des phénomènes de fatigue.

I.7.3. Performances recommandées

Les performances des micro-bétons peuvent être appréciées à l'aide de différents essais :

- Compression et tenue à l'immersion, LCPC.
- Marshall
- Orniérage.
- Compactage avec une presse à cisaillement giratoire (PCG).

Les niveaux de performances recommandés sont les suivants :

- Essai LCPC :

- Résistance à la compression à sec à :
18°C avec un bitume 40/50 $R_c > 6 \text{ MPa}$
18°C avec un bitume 60/70 $R_c > 5 \text{ MPa}$
- Tenue à l'immersion $I/C > 0,75$
- Compacité $88 \leq C \leq 95\%$

- Essai Marshall :

Stabilité à 60°C $S > 600 \text{ daN}$

Compacité $89 \leq C \leq 96\%$

- Essai d'orniérage LPC :

Ornière $< 20\text{mm}$ à 3000 cycles.

Ornière $< 10\text{mm}$ à 1000 cycles.

- Essai PCG :

Compacité à 10 girations $< 91\%$

Compacité à 40 girations minimum 92% – maximum 96%

Les facteurs ayant une influence sur le niveau des performances et les moyens de les améliorer sont identiques à ceux déjà mentionnés pour les micro-enrobés.

I.7.4. Les améliorations envisageables lorsque le niveau de performances visé n'est pas atteint

a. Fines d'apport

Les sables utilisés doivent nécessairement être propres : cette exigence entraîne souvent un manque de fines. L'apport de fines se situera généralement entre 2 à 5 %. Ces fines amélioreront la cohésion du matériau et sa résistance. Ce résultat est dû à la fois à l'amélioration de la granulométrie et au pouvoir rigidifiant de ces fines.

Lorsqu'un choix se posera entre plusieurs produits fins, on pourra choisir celui qui aura le plus grand pouvoir rigidificateur (le pouvoir rigidificateur d'un produit fin se mesure à l'aide de l'essai bille et anneau. On détermine la température de ramollissement d'un bitume pur 80/100 puis celle d'un mélange de 40 % de ce bitume et 60 % du produit fin. La différence entre ces deux températures correspond au pouvoir rigidificateur du produit fin). On vérifiera cependant que ce gain n'entraîne pas une chute de tenue à l'immersion. Par prudence, on évitera des produits fins dont le pouvoir rigidificateur est supérieur à 20°C et dans la mesure du possible, on retiendra des produits pour lesquels une certaine expérience locale existe déjà.

Cependant, dans certains cas (sable fin propre en particulier), l'emploi de fines d'apport peut s'avérer insuffisante pour amener le niveau de performances au seuil voulu et la correction devra être plus importante.

b. Sable de concassage ou de broyage

- un sable riche en fines (plus de 15% passant à 80 microns): améliorera à la fois la cohésion et le frottement interne de la formule.
- un sable ayant peu de fines : améliorera uniquement le frottement interne. Il pourra éventuellement être accompagné par l'ajout en centrale d'un produit fin.

Le dosage en sable correcteur se situe généralement entre 20 et 40 %.

c. Le soufre

Le soufre est liquide à 120°C, ajouté au bitume, il permet la mise en place du matériau. Au refroidissement, il cristallise et peut rigidifier le mélange.

d. Produits rigidifiants divers

il existe dans l'industrie chimique et en particulier dans la pétrochimie, un certain nombre de produits compatibles avec le bitume et ayant des propriétés rigidifiantes :résines aromatiques, asphaltènes...Associés à un bitume de pénétration normale de tels produits peuvent compenser l'absence de bitume dur tel que le 20/30. Avant emploi, une étude de laboratoire assez développée ainsi que des sections d'essais de petite importance sont nécessaires pour juger du comportement. Il est à noter qu'un excès de rigidité serait en effet aussi néfaste qu'une résistance trop faible.

e. Dopes d'adhésivité

Utilisés mélangés au bitume, de tels produits peuvent éventuellement résoudre un problème de tenue à l'immersion insuffisante.

f. Pré-enrobage au ciment

Le manque d'angularité et de frottement interne du matériau peut être compensé en faisant adhérer à la surface des grains de sables et des cristaux de ciment hydraté.

On réalise pour cela un mélange de sable et de ciment Portland avec une quantité d'eau suffisante pour assurer l'hydratation du ciment (le dosage en ciment est de l'ordre de 4 %). Le mélange ainsi traité est conservé un minimum de 48 heures avant d'être employé en centrale d'enrobage classique.

Un tel traitement améliore de façon sensible la tenue à l'orniérage du sable-bitume. Des améliorations de la stabilité de l'ordre de 25 % peuvent être ainsi atteintes.

I.8. FORMULATION DU SABLE BITUME

Les sables bitumes sont des matériaux qui permettent d'effectuer des revêtements minces (2,5 à 3,5 cm). Ainsi la technique du sable bitume consiste, à partir d'un sable simple ou composé, à choisir une teneur en liant. On vérifie que le pourcentage des vides est convenable et que la stabilité est suffisante. [02]

Une composition des enrobés bitumineux se résume :

- Au choix de la granulométrie de l'ossature qui conduit à un minimum de vides ;
- A la recherche de la quantité de liant capable à la fois d'enrober totalement les grains du mélange et d'en permettre l'agglutination totale suivant le meilleur arrangement.

I.8.1. Détermination de la teneur en liant.

La teneur en liant d'un enrobé bitumineux dépend de la granulométrie de l'ossature et plus exactement de la surface spécifique. Cette surface est d'ailleurs déterminée en grande partie par le filler proprement dit et dans une certaine mesure par le sable fin. La teneur en liant sera définie lors de l'étude en laboratoire en utilisant la formule suivante :

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

Avec :

α : coefficient de correction destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats tel que

$$\alpha = \frac{2,65}{\gamma_G} \quad , \quad \text{où } \gamma_G : \text{masse volumique réelle des granulats}$$

K : module de richesse.

Σ : surface spécifique conventionnelle tel que :

$$\Sigma = 4,75 + 1,3 f \text{ (formule de Duriez)}$$

f : pourcentage de fines ($d < 80 \mu\text{m}$)

- **Module de richesse K**

Dans l'expression précédente la valeur de $k = \frac{P}{\alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma}}$ est appelée «module de richesse en liant» ou en abrégé module de richesse. Il est caractéristique de l'épaisseur du film de liant enrobant les grains d'agrégats, d'où son nom. Son choix est sous la dépendance de la déformabilité, du climat, de la nature et de l'intensité du trafic.

D'une manière générale la valeur du module de richesse K varie entre 3,75 et 4,25.

I.8.2. Calcul de la compacité des éprouvettes

Soit :

- d_m : la densité apparente de l'éprouvette ;
- d_b : la densité du bitume ;
- d_a : la densité de l'agrégat ;
- p_b : le pourcentage en poids du bitume ;
- p_a : le pourcentage en poids de l'agrégat.

La densité vraie de l'éprouvette est :

$$D_m = \frac{100}{\frac{p_b}{d_b} + \frac{p_a}{d_a}}$$

Le pourcentage volumétrique des vides résiduels ou vides de l'éprouvette est :

$$V_m = \frac{D_m - d_m}{D_m}$$

$\frac{d_m}{D_m}$ est le volume vrai de l'agrégat dans l'éprouvette de volume unité.

Le pourcentage C ou pourcentage volumétrique des pleins est :

$$C = 100 - V_m$$

I.8.3. Notion de stabilité

La stabilité des matériaux enrobés est la résistance aux déformations par compression, flexion, traction, cisaillement ou poinçonnement. En pratique, elle est évaluée au moyen des essais au laboratoire et notamment :

a. Essai Duriez

L'essai Duriez consiste à confectionner des éprouvettes cylindriques dans des conditions déterminées, et soumettre les éprouvettes, après conservation à l'air libre ou en immersion, à l'écrasement pour déterminer la résistance à la compression simple qui sera dite «stabilité Duriez». [03]

Le but de cet essai est de caractériser les qualités de résistance mécaniques et de désenrobage par l'eau des matériaux classiques. Les résultats de l'essai Duriez suffisent à eux seuls à caractériser convenablement la qualité du matériau, dans d'autres cas, on pourrait avoir avantage à les compléter par les résultats d'autres essais (essai Hubbard Field pour les matériaux fins, et l'essai Marshall pour les matériaux à base de granulats ronds ou très anguleux). (Pour plus de détails voir annexe « B »).

b. Essai Marshall

C'est un essai de compression simple exercée suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique semi frettée. Cette compression est appliquée une demi-heure après immersion dans l'eau à 60°C à une vitesse de 0,86 mm/sec.

L'essai Marshall consiste à écraser à 60°C, entre deux mâchoires, une éprouvette cylindrique de 10cm de diamètre et de 6,3cm de hauteur. Les mâchoires s'appuient sur deux génératrices opposées et de la vitesse d'avancement est constante et égale à 50mm par minute. On note l'effort maximum à la presse et la déformation diamétrale de l'éprouvette au moment de la rupture, c'est-à-dire au maximum d'effort de la presse.

L'essai Marshall diffère de l'essai Duriez dans la température de l'essai qui est de 60°C pour l'essai Marshall et de 18°C pour Duriez, et dans le mode d'application de la charge qui y est radiale alors qu'elle est axiale pour l'essai Duriez. (Pour plus de détails voir annexe « C »).

c. Essai Hubbard Field.

Cet essai consiste à mesurer sous quelle pression une éprouvette de mortier ou enrobé bitumeux, dont les dimensions et la confection sont normalisées, peut fluer à travers un orifice calibré. [04]

La mesure de la stabilité Hubbard Field dans le cas d'un mortier hydrocarboné consiste à mesurer la pression qui provoque l'extrusion ou fluage, d'une brique de 100g et de 50.8mm de diamètre à travers un anneau de diamètre inférieur de 44.5mm. Cette pression est appliquée à la vitesse de 1 mm/sec sur une brique, conservée à sec à 18°C pendant 24

heures après sa confection et amenée au moment de l'essai soit à la température de 18°C, soit de 60°C, l'éprouvette est émergée dans l'eau une heure.

On appelle stabilité H.F., la charge exprimée en Kg qu'il faut exercer pour provoquer ce fluage.

Ces trois essais sont réalisés pour l'étude expérimentale des enrobés bitumineux, et le choix de la meilleure formulation à adopter. (Pour plus de détails voir annexe « D »).

I.9. CONCLUSION

Connaissant les définitions et les techniques concernant le sable bitume, après avoir identifié et classé les matériaux utilisés et après avoir étudié la méthode de formulation, il nous est possible de passer à l'étape suivante qui consiste à confectionner un enrobé en tenant compte des paramètres déjà cités concernant les matériaux et l'enrobé.

Chapitre II

Comportement du Sable Bitume

II.1. INTRODUCTION

Pour modéliser le comportement d'un sable bitume, il est important de connaître les lois de comportement et les modèles rhéologiques élémentaires nécessaires à une telle modélisation. Afin d'y parvenir, nous allons effectuer plusieurs essais de comportement, qui nous permettront d'obtenir les informations définissant celui du sable bitume.

II.2. RHEOLOGIE

La rhéologie est l'outil moderne pour la formulation de systèmes complexes comme par exemple les cosmétiques, détergents, peintures, bitumes, etc. Les relations entre les paramètres industriels comme l'écoulement pendant la production ou les paramètres d'utilisation comme la stabilité du produit fini, le comportement pendant l'application et le comportement rhéologique sont présentés pour une série d'exemples sortant directement d'applications réelles qui ont été traitées dans les laboratoires d'applications.

La rhéologie décrit l'écoulement et la déformation d'un produit pendant la production et dans beaucoup d'applications elle est reliée directement aux propriétés importantes du produit fini. Elle constitue un outil indispensable dans les industries de plastique, caoutchouc, cosmétique, adhésifs, aliments, composites, pour le développement de matériaux nouveaux et des produits avec des propriétés spécifiques afin d'obtenir une production fiable et le produit fini désiré.

La rhéométrie est une méthode de caractérisation importante pour obtenir des informations sur la structure d'un matériau ou produit et en même temps sur son comportement lors de la production. Le comportement rhéologique complexe est défini par le spectre de relaxation résultant de la structure spécifique du matériau.

II.3. COMPORTEMENT VISCOELASTIQUE

Un sable enrobé présente des propriétés viscoélastiques, son comportement s'apparente à la fois au comportement du solide élastique parfait hookéen et à celui du liquide visqueux newtonien. L'étude de ces propriétés est donc tout à fait essentielle. [05]

Avant d'entamer l'étude du comportement viscoélastique du sable bitume, il convient de donner un certain nombre de définitions générales : comportement linéaire, fonction de fluage, fonction de relaxation, indispensables à cette étude.

II.3.1. Comportement solide et liquide

En rhéologie, la frontière entre solide et liquide est souvent mal définie. On adopte les définitions suivantes :

- une substance est solide si, soumise à une contrainte constante ne provoquant pas la rupture, elle tend vers un état d'équilibre statique, pour lequel sa déformation demeure constante.

- Une substance est liquide si, soumise à une contrainte constante, elle n'atteint jamais un état d'équilibre statique : sa déformation augmente indéfiniment, la substance s'écoule.

II.3.2. Comportement linéaire : principe de superposition de Boltzmann

Par définition, on dira qu'un matériau a un comportement linéaire, ou qu'il satisfait au principe de superposition de Boltzmann, si, soumis à une contrainte ($\tau = \sum_i \tau_i$), il subit une déformation ($\varepsilon = \sum_i \varepsilon_i$) égale à la somme des déformations ε_i qu'il subirait s'il était soumis isolément à la contrainte τ_i . Si le matériau possède l'équation rhéologique d'état :

$$\varepsilon = f(\tau). \tag{II.1}$$

Il est clair que cette propriété de linéarité se traduit mathématiquement par les relations suivantes :

$$\begin{cases} f(\tau_1 + \tau_2) = f(\tau_1) + f(\tau_2) \\ f(\lambda \cdot \tau) = \lambda \cdot f(\tau) \end{cases} \quad \text{où } \lambda \text{ est un nombre réel quelconque.} \tag{II.2}$$

Mathématiquement, les relations (II.2) sont les relations de définition d'une fonction linéaire : un matériau possède un comportement linéaire si la fonction $\varepsilon = f(\tau)$ est linéaire.

Tous les matériaux présentent un comportement linéaire, à condition que les contraintes et les déformations auxquelles ils sont soumis demeurent suffisamment faibles. Dans la pratique, si on admet que $\varepsilon \leq 10^{-2}$, presque tous les matériaux peuvent être considérés comme linéaires.

Le comportement linéaire est évidemment relié à l'aptitude du matériau à supporter des déformations sans modification de sa structure microscopique, à cet égard, on peut considérer que l'étude des propriétés viscoélastiques linéaires permet de caractériser la structure « au repos ». Au contraire, la transition vers un régime non linéaire (à partir d'un certain seuil de déformation) s'accompagne le plus souvent d'une modification structurelle.

II.3.3. Fonction de fluage et de relaxation

Les fonctions fluage et relaxation sont les fonctions essentielles en viscoélasticité linéaire. Par définition :

La fonction fluage $f(t)$ est la déformation subie par le matériau, lorsqu'on impose à ce dernier une contrainte d'amplitude unité à l'instant initial $t = 0$, contrainte qui sera maintenue constante au cours du temps (figure II.1).

La fonction relaxation $g(t)$ est la contrainte résultant de l'application d'une déformation d'amplitude unité à l'instant initial $t = 0$, déformation qui est maintenue constante au cours du temps (figure II.2).

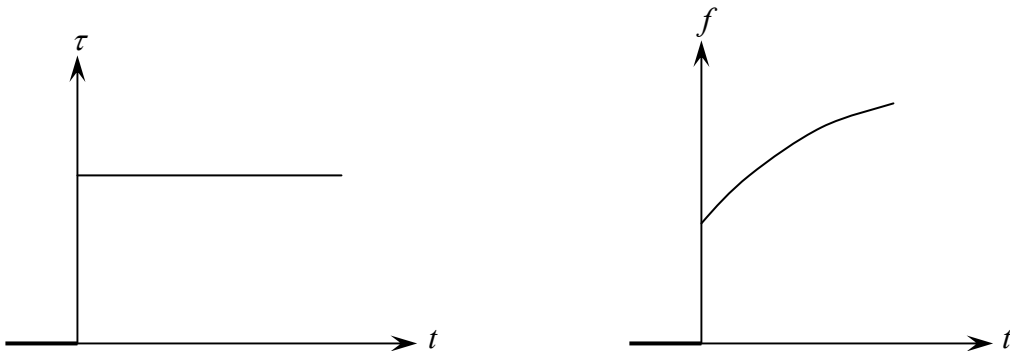


Figure II.1. : « Fonction de fluage »

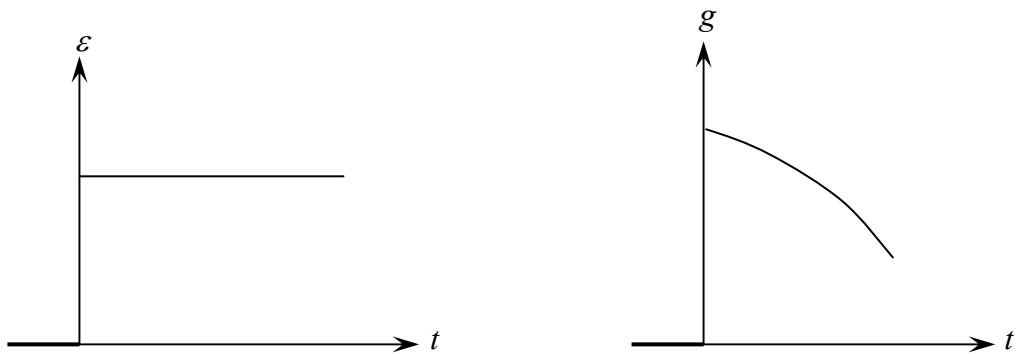


Figure II.2. : « Fonction de relaxation »

Si le matériau est soumis à partir de $t = 0$ à une contrainte $\tau(t)$ quelconque. On obtient en utilisant le principe de superposition de Boltzmann et la définition de la fonction fluage, la déformation $\varepsilon(t)$ correspondante donnée par la relation générale :

$$\varepsilon(t) = \tau(t) \cdot f(0) + \int_0^t \dot{f} \cdot (t-t') \cdot \tau(t') dt' \quad (\text{II.3})$$

Où :

$$\dot{f}(u) = \frac{df}{du}(u)$$

De la même façon, si l'on fait subir au matériau à partir de $t = 0$ une déformation $\varepsilon(t)$ quelconque, la contrainte $\tau(t)$ correspondante est donnée par la relation générale :

$$\tau(t) = \varepsilon(t) \cdot g(0) + \int_0^t \dot{g} \cdot (t-t') \cdot \varepsilon(t') dt' \quad (\text{II.4})$$

Où :

$$\dot{g}(u) = \frac{dg}{du}(u)$$

La connaissance de la fonction fluage ou de la fonction relaxation d'un matériau permet de déterminer toutes les propriétés viscoélastiques du matériau. Chacune de ces fonctions, à elle seule, est suffisante pour décrire complètement le comportement viscoélastique. C'est dire l'intérêt fondamental de ces fonctions, et cela d'autant plus qu'elles sont accessibles directement par l'expérience, selon qu'on utilise tel ou tel rhéomètre, on déterminera expérimentalement directement la fonction fluage ou relaxation :

- lorsqu'on dispose d'un rhéomètre capable d'imposer une contrainte constante τ , la déformation correspondante mesurée sera égale à :

$$\varepsilon(t) = \tau \cdot f(t) \quad (\text{II.5})$$

Si le rhéomètre est relié à un enregistreur, le graphe de ε en fonction du temps est obtenu automatiquement : on déduit alors aisément $f(t)$

- lorsqu'on dispose d'un rhéomètre capable d'imposer une déformation constante ε , la contrainte correspondante mesurée sera égale à :

$$\tau(t) = \varepsilon \cdot g(t) \quad (\text{II.6})$$

La mesure de $\tau(t)$ fournit donc la fonction $g(t)$.

II.4. MODELES VISCOELASTIQUES ELEMENTAIRES

Le comportement d'un corps viscoélastique linéaire est intermédiaire entre le comportement d'un solide de Hooke et d'un liquide de Newton. Nous allons donc rappeler les propriétés de ces deux milieux idéaux et limites et construire des modèles de comportements intermédiaires. [05]

II.4.1. Solide élastique parfait

L'équation rhéologique du solide élastique parfait (loi de Hooke) s'écrit :

$$\varepsilon(t) = J \cdot \tau(t) \quad (\text{II.7})$$

Où J est un coefficient constant dépendant de la nature du solide, appelé *complaisance élastique*. On utilise souvent le coefficient $G=1/J$, appelé *module de rigidité* ou *module de cisaillement* ou encore second module de Lamé.

La relation (II.7) s'applique à une expérience de cisaillement simple ; il faut cependant souligner que pour un solide élastique parfait, la déformation et la contrainte sont toujours reliées par une relation linéaire (loi de Hooke) du type (II.7) ; mais que les coefficients de proportionnalité dépendent du type de déformation. Les déformations de traction, de compression ou de dilatation volumique sont introduites ; les coefficients élastiques correspondants (module de Young E , coefficient de poisson ν , module de compression uniforme K) sont définis, en relation avec le module de rigidité G .

De l'expression de la loi de Hooke, on tire les informations suivantes :

- Dès qu'une contrainte est appliquée, instantanément une déformation prend naissance, proportionnelle à la contrainte ; inversement, si la contrainte est ramenée à zéro, immédiatement la contrainte s'annule : on dit que la déformation élastique est *instantanée et récupérable*.
- Le comportement est bien un comportement solide : soumis à une contrainte constante, le matériau atteint instantanément un état d'équilibre.
- La fonction fluage a pour expression :

$$f(t) = J \quad \text{pour } (t \geq 0) \quad (\text{figure II.3}) \quad (\text{II.8})$$

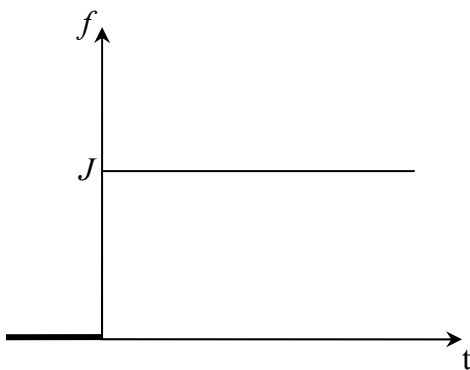


Figure II.3. : « fonction fluage du solide de Hooke »

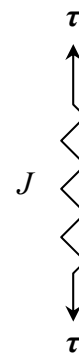


Figure II.4. : « Solide de Hooke »

Un solide élastique parfait sera symbolisé en rhéologie par un ressort de coefficient de complaisance élastique J . (figure II.4)

Cette même figure représente schématiquement un solide élastique parfait de coefficient J soumis à une contrainte τ .

II.4.2. Liquide visqueux newtonien

L'équation rhéologique du liquide visqueux newtonien est l'équation (II.8) de Newton :

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{\tau(t)}{\eta} \quad (\text{II.9})$$

Tenant compte des conditions initiales :

$$t < 0 \quad ; \quad \tau(t) = 0 \quad ; \quad \varepsilon(t) = 0$$

L'équation (II.9) s'intègre immédiatement :

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \tau(t') \cdot dt' \quad (\text{II.10})$$

On remarque que :

- Le liquide visqueux newtonien se « souvient » de toutes les contraintes qui lui ont été imposées dans le passé : l'expression de $\varepsilon(t)$ dépend de toutes les valeurs prises par la contrainte τ de 0 à t .
- Si la contrainte est ramenée à zéro à un certain instant, la déformation demeure constante et égale à la valeur qu'elle possédait au même instant ; la déformation est irréversible.
- Le comportement est bien un comportement liquide, soumis à une contrainte constante τ_0 , la déformation

$$\varepsilon(t) = \frac{\tau_0}{\eta} t \quad (\text{II.11})$$

croît linéairement avec le temps : le matériau s'écoule indéfiniment.

L'expression de la fonction fluage est obtenue en remplaçant dans l'équation (II.11), τ_0 par l'unité :

$$f(t) = \frac{t}{\eta} \quad (\text{figure II.5}) \quad (\text{II.12})$$

Le liquide visqueux newtonien sera symbolisé en rhéologie par un amortisseur de coefficient de viscosité η (figure II.6).

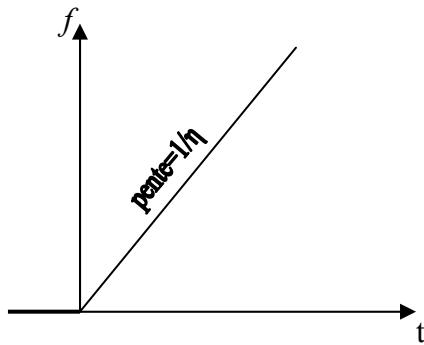


Figure II.5. : « fonction fluage du liquide visqueux newtonien »

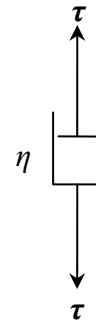


Figure II.6. : « Liquide visqueux newtonien »

Nous venons de présenter les deux comportements viscoélastiques linéaires les plus élémentaires. Le comportement viscoélastique linéaire le plus général est défini en construisant un modèle constitué d'un assemblage de ressorts et d'amortisseurs. Il s'agit d'un assemblage analogue et symbolique : tout matériau sera représenté par une association éventuelle fort complexe de ressorts et d'amortisseurs en série et en parallèle ; *l'équation rhéologique du matériau sera obtenue en utilisant les équations rhéologiques des constituants élémentaires (ressort : solide élastique parfait ; amortisseur liquide visqueux newtonien) et en respectant les lois d'association en série et en parallèle des différents éléments.*

Les lois d'association, que nous verrons par la suite, ont été définies de façon à ce que tous les modèles susceptibles d'être construits à l'aide de ressorts et d'amortisseurs correspondent à des comportements viscoélastiques linéaires observables expérimentalement.

Il faut bien comprendre que les modèles ainsi construits ne constituent qu'un moyen commode et très utilisé de représenter les différents comportements viscoélastiques linéaires (par l'équation rhéologique à laquelle ils conduisent) ; il ne faut surtout pas commettre l'erreur d'établir un lien quelconque entre la structure réelle du matériau et la structure de son modèle représentatif.

II.4.3. Lois d'association en série et en parallèle

Par définition :

- Dans une association en parallèle dont un cas particulier est représenté par la figure.II.7:

- la contrainte imposée à l'ensemble est la somme des contraintes imposées à chaque branche ;
 - la déformation subie est identique dans chaque branche et égale à la déformation subie par l'ensemble.
- Dans une association en série dont un cas particulier est représenté par la (figure II.8):
 - la contrainte imposée à l'ensemble est supportée en totalité par chaque élément ;
 - la déformation totale est la somme des déformations subies par chaque élément.

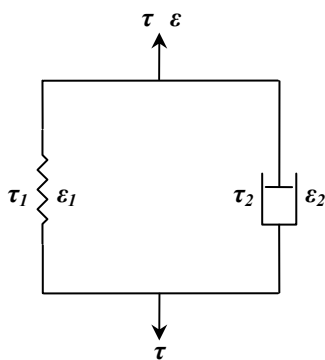


Figure II.7. : « Association en parallèle »

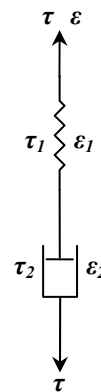


Figure II.8. : « Association en série »

II.4.4. Solide de Kelvin-Voigt

Il est constitué par l'association en parallèle d'un ressort, de complaisance élastique J , et d'un amortisseur de viscosité η (figure II.9).

Soient ε_1 et ε_2 les déformations, τ_1 et τ_2 les contraintes, respectivement dans le ressort et dans l'amortisseur. D'après les équations (II.7) et (II.9)

$$\tau_1 = \frac{1}{J} \varepsilon_1$$

$$\tau_2 = \eta \frac{d\varepsilon_2}{dt}$$

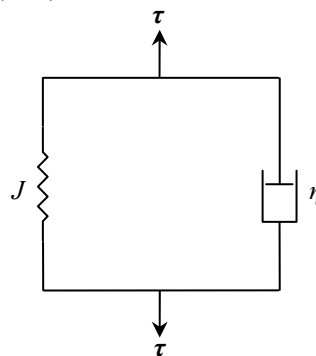


Figure II.9. : « Solide de Kelvin Voigt »

D'après les lois d'associations en parallèle, la déformation et la contrainte totale ε et τ s'écrivent :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2$$

Si bien que :

$$\eta \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{1}{J} \varepsilon = \tau \quad (\text{II.13})$$

Telle est l'équation rhéologique du solide de Kelvin-Voigt.

Pour déterminer la fonction fluage $f(t)$ de ce modèle, il suffit de remplacer la contrainte τ figurant dans le second membre de l'équation (II.13) par l'unité :

$$\eta \frac{df}{dt} + \frac{1}{J} f = 1 \quad (\text{II.14})$$

La résolution de cette équation différentielle nous donne la fonction fluage $f(t)$:

$$f(t) = J(1 - e^{-t/\theta}) \quad \text{avec : } \theta = \eta \cdot J \quad (\text{II.15})$$

Le coefficient θ possède la dimension du temps, il est appelé **temps de retard**.

On comprend l'origine de cette dénomination en comparant les graphes des fonctions fluage d'un solide élastique parfait et d'un solide de Kelvin-Voigt de même coefficient de complaisance élastique (figure II.10).

La fonction fluage du solide de Kelvin-Voigt est représentée par une exponentielle croissante possédant une asymptote horizontale d'amplitude J . Théoriquement, cette amplitude maximale J n'est atteinte qu'au bout d'un temps infini ; pratiquement, compte-tenu des propriétés de décroissance au bout d'un temps de l'ordre de θ .

On en déduit que θ est le temps nécessaire pour que le ressort couplé avec l'amortisseur (modèle du solide de Kelvin-Voigt) atteigne la déformation que le ressort seul (modèle du solide élastique parfait) atteindrait instantanément.

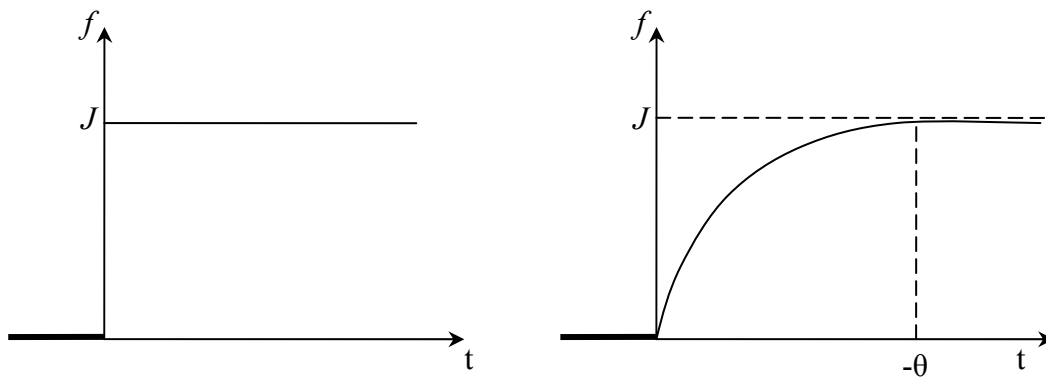


Figure II.10. : « Comparaison entre les fonctions fluage du solide de Hooke et celui de Kelvin Vogit »

On voit que le rôle de l'amortisseur, couplé en parallèle avec le ressort, est de freiner et de retarder la déformation. On dit qu'un solide de Kelvin-Voigt possède une *élasticité retardée*, par opposition à l'*élasticité instantanée* du solide élastique parfait, on emploie également le terme *post-effet élastique*.

II.4.5. Liquide de Maxwell

Il est constitué par l'association en série d'un ressort de complaisance élastique J et d'un amortisseur de coefficient de viscosité η (figure II.11)

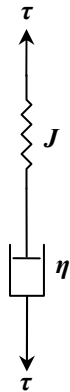


Figure II.11. : « Liquide de Maxwell »

Soient ε_1 et ε_2 les déformations, τ_1 et τ_2 les contraintes, respectivement dans le ressort et dans l'amortisseur. D'après les équations (II.7) et (II.9) :

$$\tau_1 = \frac{1}{J} \varepsilon_1$$

$$\tau_2 = \eta \frac{d\varepsilon_2}{dt}$$

D'après les lois d'association D'après les lois d'associations en parallèle, la déformation et la contrainte totale ε et τ s'écrivent :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

$$\tau = \tau_1 = \tau_2$$

Si bien que :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} = J \frac{d\tau_1}{dt} + \frac{1}{\eta} \tau_2$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = J \frac{d\tau}{dt} + \frac{1}{\eta} \tau \quad (\text{II.16})$$

Telle est l'équation rhéologique du solide de Maxwell. Sa résolution est immédiate, tenant compte des conditions initiales :

$$t < 0 : \tau = 0 ; \varepsilon = 0.$$

Il en vient :

$$\int_0^\varepsilon d\varepsilon = J \int_0^\tau d\tau + \frac{1}{\eta} \int_0^t \tau(t') \cdot dt' \quad \Rightarrow \quad \varepsilon(t) = J \cdot \tau(t) + \frac{1}{\eta} \int_0^t \tau(t') \cdot dt \quad (\text{II.17})$$

Déformation qui conduit à la fonction de fluage :

$$f(t) = J + \frac{t}{\eta} \quad (\text{II.18})$$

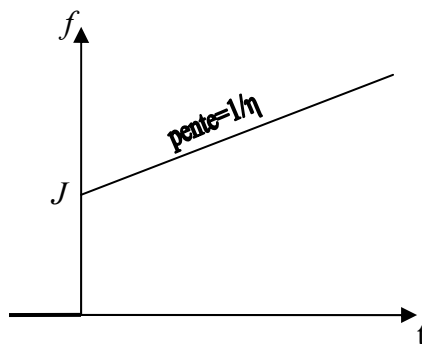


Figure II.12. : « Fonction fluage du liquide de Maxwell »

Le graphe de $f(t)$ (figure II.10) comprend deux parties :

- une variation instantanée à l'instant $t = 0$, d'amplitude J : elle décrit l'élasticité instantanée du liquide de Maxwell (ressort du modèle) :
- cette variation instantanée est suivie par une variation linéaire de pente $1/\eta$ qui correspond au comportement de liquide visqueux newtonien du liquide de Maxwell (amortisseur du modèle).

En résumé, un *liquide de Maxwell est un liquide visqueux possédant une élasticité instantanée.*

II.5. MODELE VISCOELASTIQUE GENERAL

Toutes les associations de ressorts et d'amortisseurs, aussi complexes soient-elles, correspondent à un comportement viscoélastique linéaire. [05]

A partir des lois d'association en série et en parallèle, on peut établir l'équation rhéologique de chaque modèle et en déduire les fonctions fluage et relaxation dans chaque cas. Cela dit tout les circuits aussi complexes soient ils peuvent être représentés par des modèles de structure bien définie ; on distingue le modèle de Kelvin-Voigt généralisé et le modèle de Maxwell généralisé.

II.5.1. Modèle de Kelvin- Voigt généralisé

Il est constitué par l'association en série d'un liquide de Maxwell et d'un certain nombre de solides de Kelvin-voigt (figure II.13).

Les valeurs des différents paramètres (E_0, η_0, E_i, η_i), et le nombre de solides de Kelvin-Voigt présents dans le modèle sont propres aux enrobés hydrocarbonés (corps viscoélastique linéaire).

Sachant que la fonction fluage d'une association en série est égale à la somme des fonctions fluages des divers éléments, et connaissant la fonction fluage du liquide de Maxwell (II.19) et celle du solide de Kelvin-Voigt (II.20), on aura celle de Kelvin-Voigt généralisé (II.21):

$$f(t) = E_0 + \frac{t}{\eta_0} \quad (\text{II.19})$$

$$f(t) = E_0 + E \times \left(1 - e^{-t/\theta}\right) \quad (\text{II.20})$$

$\theta = E \times \eta$: temps de retard du solide de kelvin-voigt

$$f(t) = E_0 + \frac{t}{\eta_0} + \sum_{i=1}^n E_i \left(1 - e^{-t/\theta_i}\right) \quad (\text{II.21})$$

Cette fonction est parfois exprimée sous la forme équivalente suivante :

$$f(t) = E_e^0 + \frac{t}{\eta_0} - \sum_{i=1}^n E_i e^{-t/\theta_i} \quad (\text{II.22})$$

Avec : $E_e^0 = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i$ (II.23)

n : nombre de solide de kelvin voigt.

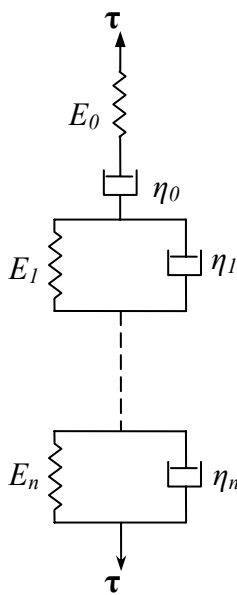


Figure II.13. : « Modèle de Kelvin Voigt généralisé »

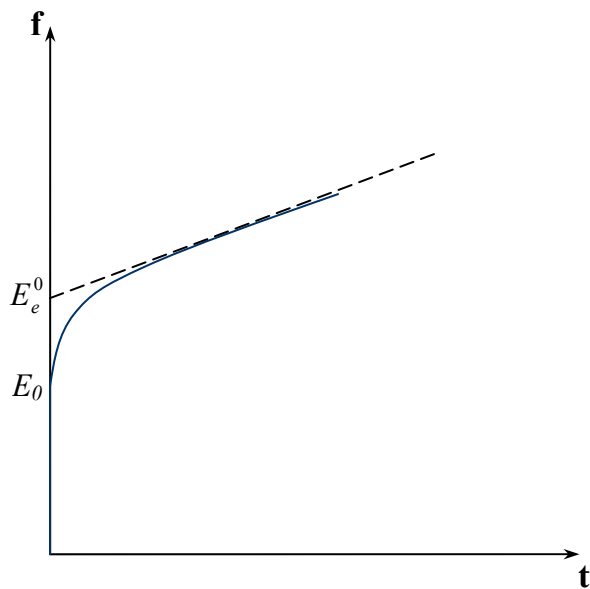


Figure II.14. : « Fonction fluage du solide de Kelvin Voigt généralisé »

Le graphe de la fonction fluage (figure II.14) se décompose en trois parties :

- ❖ Une variation instantanée à l'instant $t = 0$, d'amplitude E_0 , élasticité instantanée (ressort E_0).
- ❖ Une variation assez rapide au cours du temps (partie courbe du graphe) correspondant à l'élasticité retardée des différents solides de Kelvin – Voigt.

- ❖ Une variation linéaire de pente $\frac{1}{\eta_0}$ correspondant à un régime d'écoulement permanent newtonien (amortisseur η_0).

Ce modèle et la fonction de fluage qui lui est associée sont également susceptibles de décrire un comportement solide, il suffit pour cela de donner au coefficient η_0 une valeur infinie ; cela revient à supprimer l'amortisseur de la (figure II.13). La fonction fluage correspondante a pour expression :

$$f(t) = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \left(1 - e^{-t/\theta_i}\right) \quad (\text{II.23})$$

Son graphe (figure II.15) présente une asymptote horizontale, caractéristique du comportement solide.

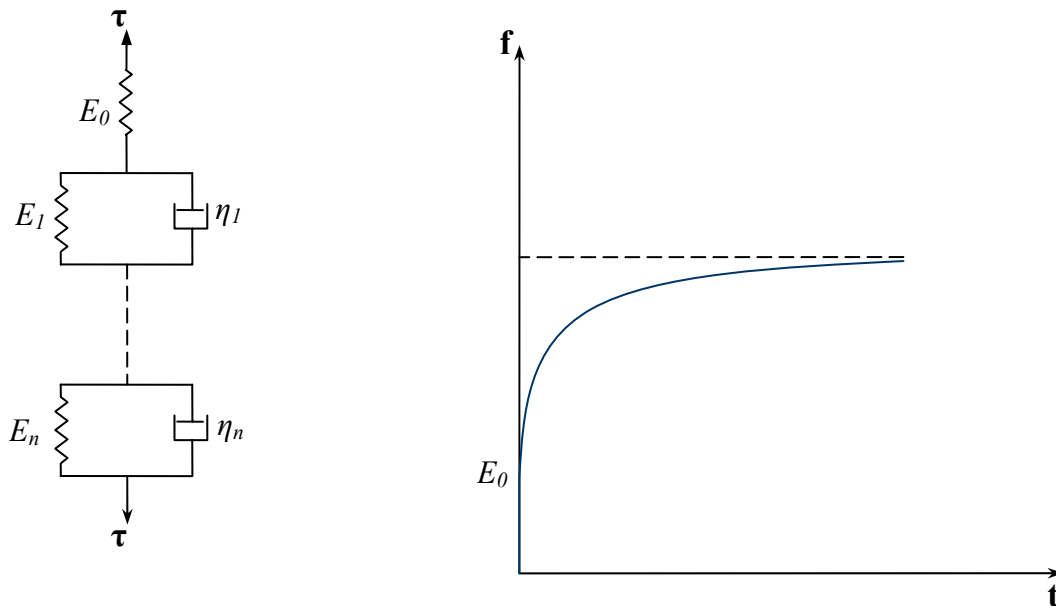


Figure II.15. : « Cas particulier du modèle de Kelvin Voigt généralisé η_0 infinie »

La fonction fluage est accessible expérimentalement, certains rhéomètres en fournissent un enregistrement graphique. Par une analyse mathématique de ce graphe, on peut alors déduire les valeurs des différents paramètres (E_i, η_i), ainsi que le nombre de solides de Kelvin-Voigt dont est constitué le matériau. Cette analyse mathématique peut être effectuée au moyen de la **méthode d'Inokuchi**.

Si à partir de $t=0$, on soumet le matériau à une contrainte d'amplitude unitaire, la déformation correspondante est décrite par la fonction de fluage $f(t)$ donnée précédemment. Supposons maintenant qu'à $t=T$, la contrainte soit ramenée à zéro.

Il nous est alors facile de démontrer que l'expression de la déformation correspondante dite de « recouvrance », est :

$$\varepsilon_r(t) = \frac{T}{\eta_0} + \sum_{i=1}^n E_i \times \left(e^{T/\theta_i} - 1 \right) \times e^{-t/\theta_i} \quad \text{Pour } t > T \quad (\text{II.24})$$

La figure II.16 présente le graphe de la déformation subie :

- lorsque la contrainte est appliquée : déformation de fluage ($0 < t < T$) ;
- lorsque la contrainte est supprimée : déformation de recouvrance ($t > T$).

On constate que les déformations d'origine élastique s'annulent avec la cause qui leur a donné naissance :

- instantanément pour la déformation : $AO = DE = J_0$
- avec un retard pour les déformations retardées : $AB = EF = \sum_{i=1}^n J_i$

La déformation consécutive à l'écoulement visqueux newtonien est irrécupérable :

$$BC = FG = \frac{T}{\eta_0}$$

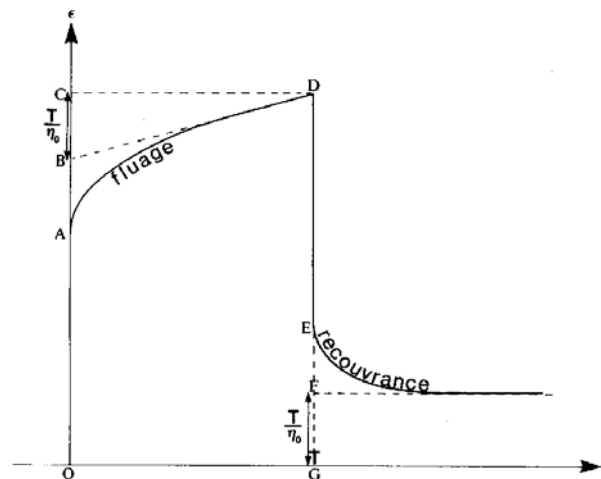


Figure II.16. : « Graphe de la déformation subie par le solide de Kelvin Voigt généralisé »

II.5.2. Modèle de Maxwell généralisé

Tous les modèles viscoélastiques linéaires peuvent être représentés par des modèles de Kelvin-Voigt généralisés. Il faut cependant bien comprendre que le comportement le plus général peut également être décrit par d'autres modèles équivalents, de structure différente,

mais conduisant à la même équation rhéologique. Une autre structure équivalente, présentant un grand intérêt, est le modèle de Maxwell généralisé : il est constitué par l'association en parallèle de n liquides de Maxwell, chacun d'entre eux étant caractérisé par un module de rigidité G_i et un coefficient de viscosité η_i (figure II.17).

A condition que tous les paramètres G_i et η_i possèdent des valeurs finies, le modèle précédent décrit un comportement liquide avec élasticité instantanée et retardée.

Si, au contraire, dans une ou plusieurs branches, l'un des coefficients G_i et η_i possède une valeur infinie, la branche correspondante se réduit respectivement à un amortisseur ou à un ressort libre, et le modèle correspondant décrit d'autres types de comportement : liquide sans élasticité instantanée, solide avec ou sans élasticité instantanée...

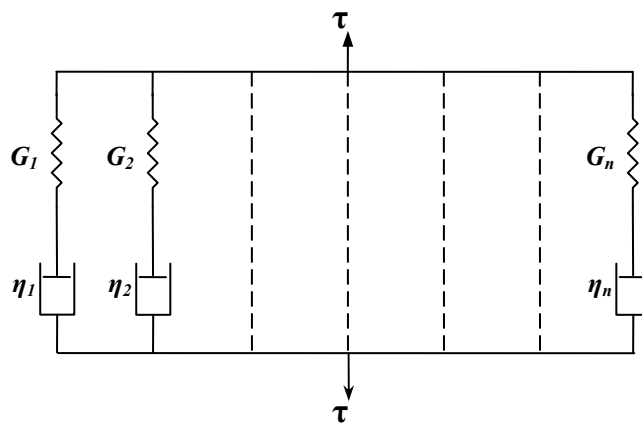


Figure II.17. : « Modèle de Maxwell généralisé »

Le modèle de Maxwell est particulièrement adapté aux expériences de relaxation ; la fonction de relaxation $g(t)$ s'exprime en effet de façon très simple en fonction des paramètres du modèle :

$$\left| \begin{array}{ll} g(t) = \sum_{i=1}^n G_i e^{-t/\theta_i} & \text{Comportement liquide} \\ g(t) = \sum_{i=1}^{n-1} G_i e^{t/\theta_i} + G_n & \text{Comportement solide} \end{array} \right. \quad (\text{II.25})$$

Où les coefficients $\theta_i = \eta_i / G_i$ sont appelés temps de relaxation, θ_i représente le temps nécessaire pour que, dans une expérience de relaxation, la contrainte aux bornes de la $i^{\text{ème}}$ branche soit réduite dans le rapport $(1/e)$. Les relations (II.25) qui sont représentées graphiquement par la figure II.18, établissent que, lors d'une expérience de relaxation, les contraintes se relâchent, décroissent exponentiellement avec le temps vers une valeur limite, **différente de zéro pour un solide, nulle pour un liquide.**

Alors que chaque élément du modèle du modèle de Kelvin-Voigt est susceptible d'une interprétation physique très claire, en terme de d'élasticité instantanée, retardée, ou

d'écoulement permanent newtonien, il n'en est pas de même pour le modèle de Maxwell, pour lequel il n'est pas possible, dans le cas général, d'attribuer à un élément particulier une fonction déterminée. Il est possible d'exprimer les paramètres G_i et η_i du modèle de Maxwell en fonction des paramètres J_0 , η_0 , J_i et η_i du modèle de Kelvin-Voigt équivalente, et réciproquement. Le calcul, très fastidieux et qui utilise la méthode des *transformées de Laplace-Carson* (méthode très utilisée en viscoélasticité linéaire et qui permet de transformer les équations rhéologiques, équations différentielles linéaire à coefficients constants, en équation algébriques) ne présente aucun intérêt pratique dans le cas général ; il peut cependant être intéressant de connaître les relations de correspondance entre les deux modèles, dans tel ou tel cas particulier : nous les donnons à titre d'exemple, dans le cas du comportement liquide sans élasticité instantanée défini par les modèles équivalents de la figure II.19 ; les propriétés rhéologiques ainsi définies sont celles d'une solution diluée de macromolécules linéaires rigides :

$$\begin{aligned} \eta_0 &= \eta_1 + \eta_2 \\ \eta_1' &= (\eta_1 + \eta_2) \frac{\eta_2}{\eta_1} \\ J_1' &= \frac{1}{G_1} \frac{\eta_1^2}{[\eta_1 + \eta_2]^2} \end{aligned} \quad (\text{II.26})$$

Remarquons que la première la première de ces relations peut être généralisée à tous les comportements liquides:

$$\eta_0 = \sum \eta_i$$

Où η_0 représente le coefficient de viscosité d'écoulement permanent (modèle de Kelvin – Voigt) et $\sum \eta_i$ la somme des coefficients de viscosité de tous les amortisseurs du modèle de Maxwell associé.

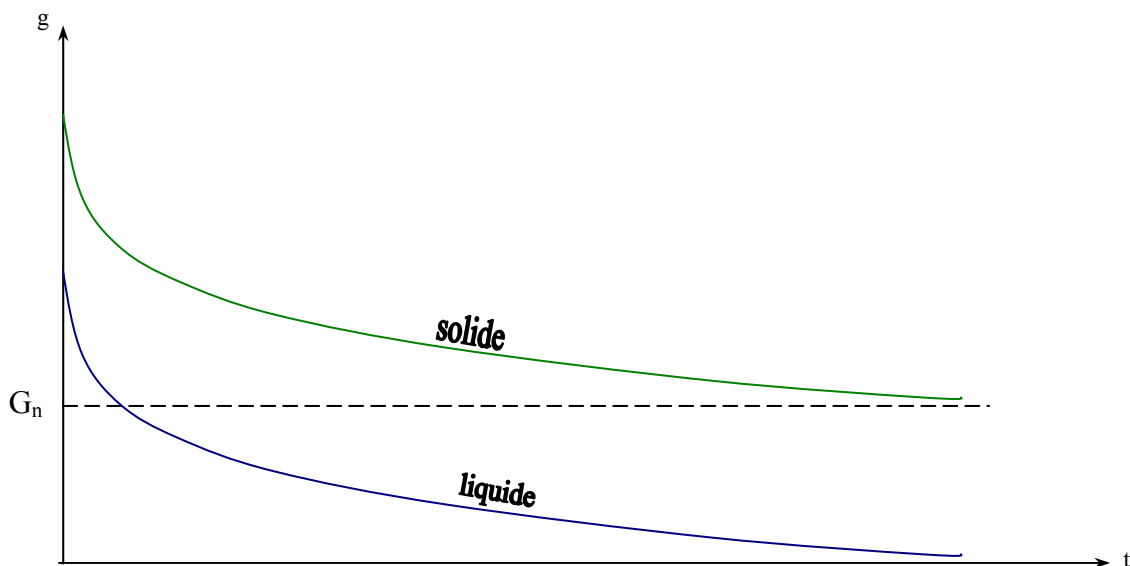


Figure II.18. : « Fonction relaxation du le modèle de Maxwell généralisé »

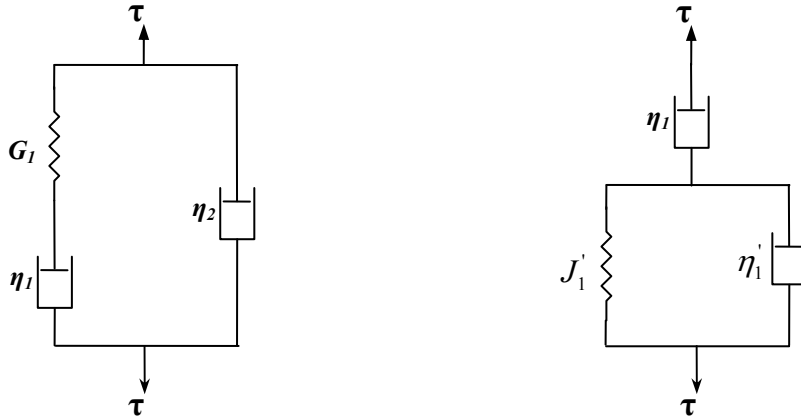


Figure II.19. : « Modèles équivalents désignant un comportement liquide sans élasticité instantanée »

Il faut noter que, dans le cas le plus général, les grandeurs rhéologiques η_0 et J_e^0 peuvent s'exprimer par une fonction analytique simple de la fonction relaxation $g(t)$:

$$\left. \begin{aligned} \eta_0 &= \int_0^{\infty} g(t) dt \\ J_e^0 &= \frac{1}{\eta_0^2} \int_0^{\infty} t \cdot g(t) dt \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.27})$$

Il est alors facile, à partir de la relation (II.25), d'obtenir l'expression de η_0 et de J_e^0 en fonction des paramètres du modèle de Maxwell généralisé ; il vient pour un liquide :

$$\left. \begin{aligned} \eta_0 &= \sum \eta_i \\ J_e^0 &= \frac{1}{\eta_0^2} \sum G_i \cdot \theta_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.28})$$

En conclusion de ce paragraphe, consacré au comportement viscoélastique linéaire général, soulignons encore une fois que chacun des deux modèles présentés définit les propriétés rhéologiques du matériau sans ambiguïté, et se suffit à lui-même ; l'emploi de l'un ou l'autre dépend des conditions expérimentales :

- Avec des rhéomètres fournissant directement la fonction fluage (**rhéomètre à fluage**), on privilégiera le modèle de Kelvin – Voigt, qui conduit à une expression de la fonction fluage particulièrement simple [relation (II.23)].
- Avec des rhéomètres fournissant la fonction relaxation (**rhéomètre à relaxation**), on utilisera de préférence le modèle de Maxwell, qui possède une fonction relaxation facilement exploitable [relation (II.25)]. Cependant, le principal intérêt de ce modèle provient surtout de l'utilisation qui en est faite en régime sinusoïdal.

II.6. ESSAIS DE COMPORTEMENT

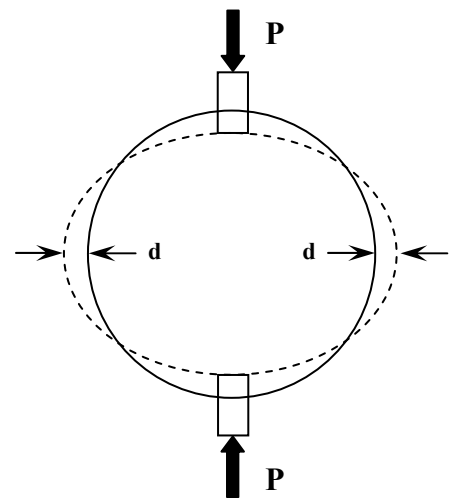
II.6.1. Essai de traction indirecte répétée au NAT (Nottingham Asphalt Tester)

Principe de l'essai

Le principe de l'essai de traction indirecte répétée (figure II.20) consiste à soumettre une éprouvette cylindrique de façon répétée à une charge verticale de compression le long d'un diamètre, provoquant ainsi une contrainte de traction le long du diamètre perpendiculaire à la direction du chargement. La déformation transitoire (horizontale) due à cette contrainte est mesurée. Le module élastique est une fonction de la charge de compression et de la déformation de traction. La contrainte de traction (σ_{ti}) et le module élastique (E_{ti}) sont donnés respectivement par les relations suivantes [06]:

$$\sigma_{ti} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot e}$$

$$E_{ti} = \frac{P(v + 0,27)}{\Delta D \cdot e}$$



avec :

σ_{ti} : contrainte de traction indirecte.

E_{ti} : module d'élasticité de traction indirecte.

P : effort vertical appliqué

D : diamètre de l'éprouvette.

ΔD : variation du diamètre (déformation horizontale).

e : épaisseur de l'éprouvette.

v : coefficient de Poisson

Figure II.20. : « Déformation d'une éprouvette – Essai de traction indirecte NAT – »

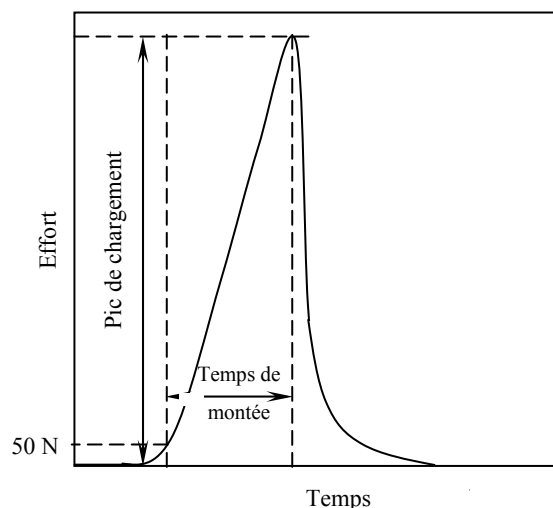


Figure II.21. : « Evolution de l'effort de déformation en fonction du temps. »

Avant l'essai proprement dit, l'éprouvette est soumise à 5 pulsations de conditionnement, dont le but est la stabilisation des barres de chargement par l'intermédiaire desquelles l'effort est transmis à l'échantillon. Cinq pulsations d'essai (figure II.21) sont ensuite réalisées à une fréquence imposée avec mesure du module élastique à chaque pulsation. Le module obtenu est la moyenne de ces 5 valeurs. Le coefficient de poisson est estimé et la valeur communément utilisée est 0,35 à 20°C à 0,25 à 10°C.

Matériel utilisé :

La (figure II.22) montre le dispositif de chargement NAT pour l'essai de traction indirecte.

Le contrôle et l'acquisition de données sont reliés via une interface à un ordinateur. Les dimensions de l'éprouvette (160mm maxi pour le diamètre et 80mm maxi pour l'épaisseur), le niveau de déformation de traction 5 à 10 microns, le temps de montée en charge 60 à 160 millisecondes ainsi que le coefficient de poisson sont des saisies comme données d'entrée.

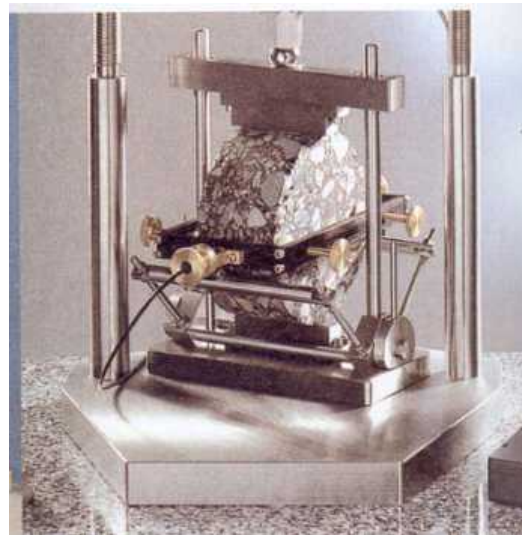
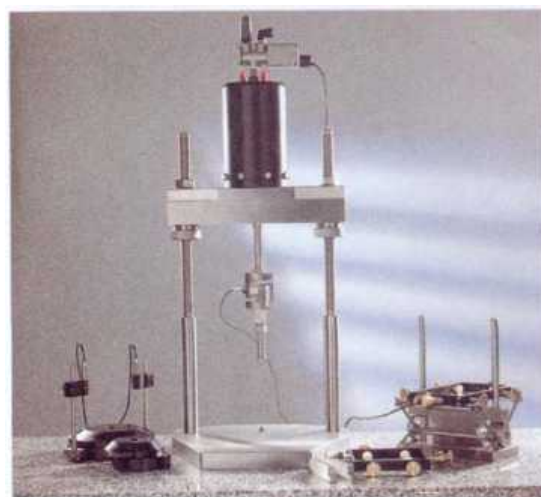


Figure II.22. : « Matériel utilisé dans l'essai de traction indirecte répétée au NAT » [08]



Les éléments constitutifs du système de montage de l'éprouvette et des capteurs de déformation sont représentés par les figures II.23 et II.24. L'ordinateur ajuste le régulateur de pression d'air de manière à stocker dans le réservoir une quantité d'air à la pression nécessaire pour la génération des pulsations. L'activation de la valve permet ensuite au vérin d'appliquer l'effort requis à l'échantillon. L'effort est contrôlé par l'ordinateur de telle sorte que toute déviation est corrigée par un ajustement automatique de la pression de régulation réalisant ainsi un système en boucle fermée.

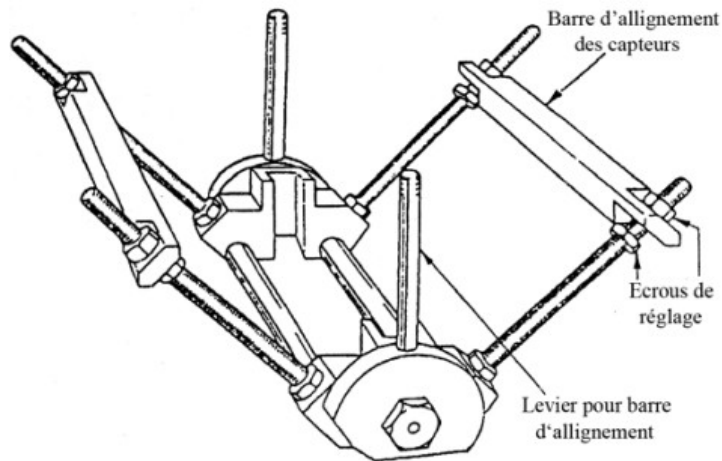


Figure II.23. : « Dispositif de montage de l'éprouvette »

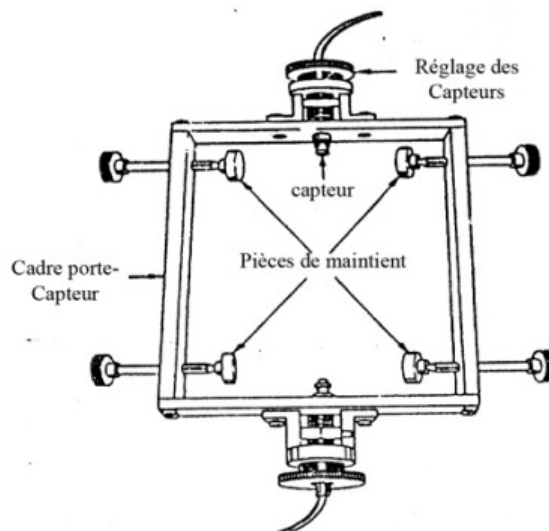


Figure II.24. : « Capteurs de déformation »

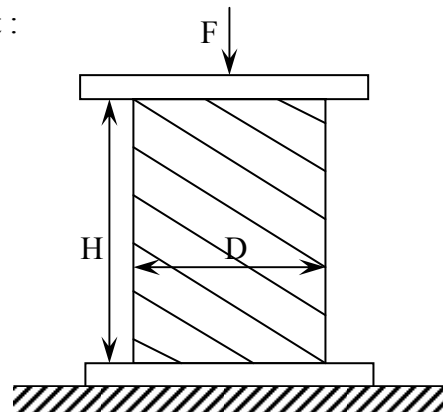
II.6.2. Essai de fluage statique uniaxial

L'essai consiste à charger uniaxialement, avec une charge constante des éprouvettes cylindriques d'enrobés afin de déterminer la déformation résultante dans la direction de la charge. (Figure II.25) [07]

La déformation relative égale au rapport $\frac{\Delta H}{H}$ peut être représentée en fonction du temps. Les conditions de chargement de chargement sont :

$$F = 500\text{N} ; \sigma = 0,1 \text{ MPa} ; T = 40^\circ\text{C} ; t = 1\text{h}$$

Figure II.25. : « Schéma du principe du fluage statique uniaxial. »



II.6.3. Essai de fluage dynamique

L'essai consiste à contraindre un échantillon d'enrobé à fluer en lui appliquant une charge dynamique avec des conditions spécifiques de charge, température et fréquence jusqu'à ce qu'une déformation standard soit atteinte. Le temps requis pour atteindre cette déformation standard s'appelle « durée de vie en fluage dynamique ». L'aspect spécifique de cet essai est tel qu'il permet la simulation dynamique du phénomène d'ornièr.

L'essai s'effectue sur une éprouvette de forme cylindrique (diamètre 10cm, hauteur 13,7 cm) qui peut provenir soit de la chaussée soit d'un échantillon de matériau fabriqué en laboratoire à l'aide d'un compacteur de plaques de manière à reproduire le compactage sur chantier.

Placée dans une cellule thermo-régulée, l'éprouvette est soumise à une contrainte verticale sinusoïdale de compression dont l'amplitude et la fréquence sont constantes. On y superpose une contrainte de compression statique et isotrope. Sous l'effet de chargement, l'échantillon subit une déformation axiale.

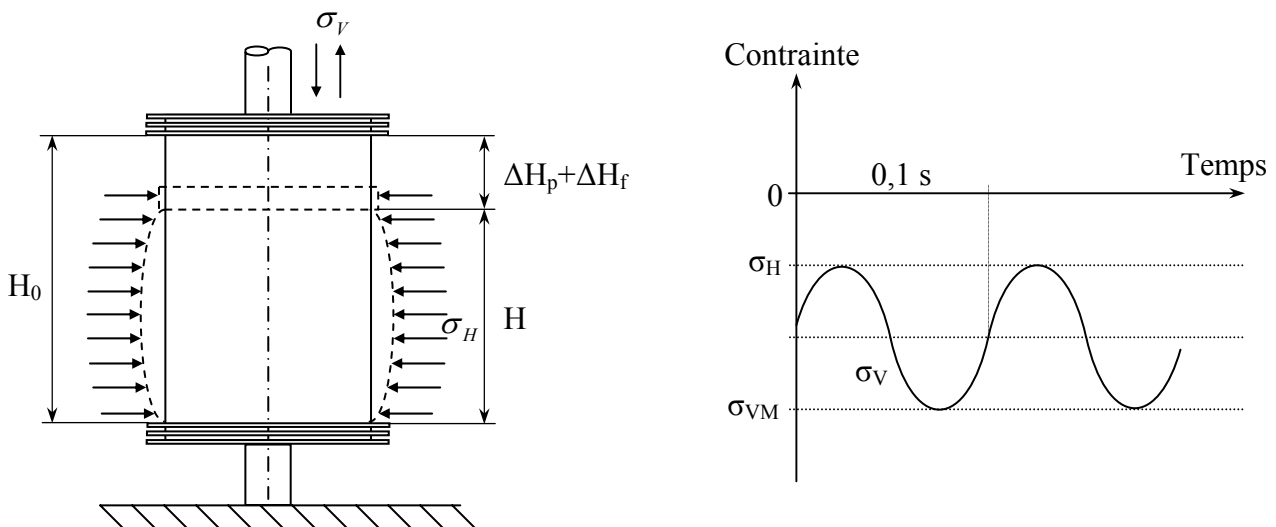


Figure II.26. : « Schéma du principe du fluage dynamique. »

II.7. CONCLUSION

Connaissant les modèles rhéologiques élémentaires et généraux spécifique au comportement viscoélastique, nous avons étudié leurs fonctions de fluage et de relaxation, ainsi nous pouvons en ayant une courbe de fluage ou de relaxation de notre matériau, la superposer à la courbe qui lui est la plus proche et en suite la calibrer en ajoutant ou en retirant des branches ou des éléments du modèle afin d'obtenir une approximation qui donnera le modèle le plus approprié et qui schématisera au mieux le comportement du sable bitume.

Chapitre III

Etude Bibliographique

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons présenter des résultats issus d'une étude de formulation d'un sable bitume faite dans le cadre d'une thèse de magister [02].

Notre travail consiste surtout à modéliser le comportement d'un sable bitume. Nous allons procéder à une formulation suivant un optimum présenté dans ce qui va suivre et les résultats que nous présentons au cours de ce chapitre serviront de référence pour confirmer ceux que nous avons obtenus à travers les essais de comportement.

III.2. PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISES

III.2.1. Sable de dune (Hassi Berkine)

- **Caractéristiques physiques**

- Poids spécifique = 2,6 NFP 18-554 / NFP 18-555
- Equivalent de sable = 87,89 % NFP 18-598
- Valeur au bleu de méthylène = 0,10% NFP 18-592
- Friabilité = 6% NFP 18-576

- **Analyse chimique**

Tableau III.1. : « Analyse chimique du sable de dune de Hassi Berkine »

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice + silicates) INS	98,17
Oxyde de fer et d'alumine (R ₂ O ₃)	1,35
Chlorures (NaCl)	Traces
Sulfates (CaSO ₄ -H ₂ O)	0,11
Carbonates (CaCO ₃)	1,75
Anhydride Carbonique (CO ₂)	0,77
Perte au feu 1050°C	0,79
Eau de constitution	0,02
Bilan chimique pondéral	101,4

- **Analyse granulométrique**

Tableau III.2. : « Composition granulométrique du sable de dune de Hassi Berkine »

Tamis (mm)	Tamisât (%)
6,300	100
5,000	100
4,000	100
2,000	100
1,000	100
0,500	99,39
0,400	95,29
0,315	66,41
0,200	25,12
0,100	5,56
0,080	1,36

L'analyse granulométrique est représentée par la figure (III.1.). la totalité des éléments constituant ce matériau ont un diamètre compris entre 0,08 et 0,5 mm. Il s'agit d'un sable propre de granulométrie serrée. Le pourcentage assez faible de fines (1,36%) dénote de la pauvreté du sable de dune de Bassi Berkine en éléments fins < 0,08 mm ce qui nécessite a correction.

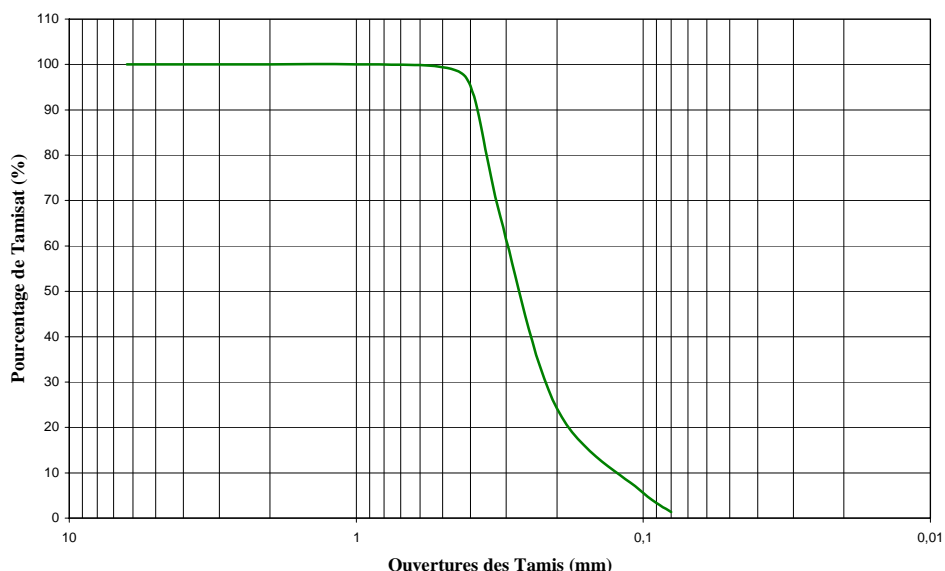


Figure III.1. : « Composition granulométrique du sable de dune de Hassi Berkine»

III.2.2. Sable concassé (Haoud el Hamra)

- **Caractéristiques physiques**

- Poids spécifique = 2,51 NFP 18-554 / NFP 18-555
- Equivalent de sable = 42,03 % NFP 18-598
- Valeur au bleu de méthylène = 0,15% NFP 18-592
- Friabilité = 31,4% NFP 18-576

- **Analyse chimique**

Tableau III.3. : « Analyse chimique du sable concassé de Haoud el Hamra »

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice + silicates) INS	33,10
Oxyde de fer et d'alumine (R ₂ O ₃)	2,50
Chlorures (NaCl)	5,14
Sulfates (CaSO ₄ -H ₂ O)	0,12
Carbonates (CaCO ₃)	58,82
Anhydride Carbonique (CO ₂)	25,88
Perte au feu 1050°C	26,00
Eau de constitution	0,12
Bilan chimique pondéral	99,78

- **Analyse granulométrique**

Tableau III.4. : « Composition granulométrique du sable concassé de Haoud el Hamra»

Tamis (mm)	Tamisât (%)
8,000	100
6,300	97,87
5,000	96,65
4,000	95,16
2,000	80,06
1,000	61,54
0,500	49,06
0,400	45,65
0,315	42,57
0,200	33,65
0,100	19,58
0,080	16,58

L'analyse granulométrique est représentée par la figure (III.2.).

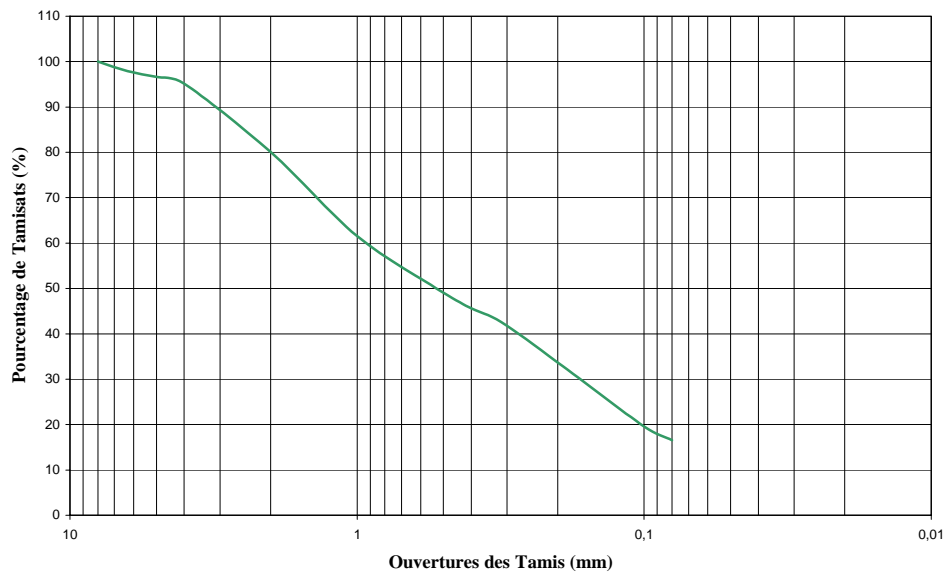


Figure III.2. : « Composition granulométrique du sable concassé de Haoud el Hamra»

Le sable concassé utilisé est riche en fine (16,58%), la courbe obtenue est bien graduée.

III.2.3. Les fines d'ajout

Les fines utilisées pour corriger la granulométrie du sable de dune sont des fines calcaires obtenues par broyage et tamisage au tamis de 0,08 mm d'un sable calcaire.

III.2.4. Les liants

➤ Bitume 40/50

Les caractéristiques de ce liant sont les suivantes :

Pénétrabilité (1/10 mm) : 42
 Point de ramollissement TBA (°C) : 58
 Point d'éclair (°C) : 268
 Point de flamme (°C): 333
 Densité relative : 1,03

III.3. SERIE D'ESSAI (TRAITEMENT A CHAUD)

III.3.1. Influence de la teneur en bitume sur la stabilité et la compacité Hubbard-Field

Des essais ont été effectués à différents pourcentages en bitume 40/50 sur le sable de dune pris séparément, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau III.5. : « Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le sable de dune de Hassi Berkine (bitume 40/50) »

Teneur en bitume (%)	5,5	6	6,5	7	7,5	8
Module de richesse	3,77	4,11	4,46	4,80	5,15	5,48
Poids à l'air (g)	105,23	105,80	106,32	106,43	107,18	107,75
Densité apparente	1,79	1,80	1,81	1,80	1,82	1,82
Densité théorique	2,28	2,26	2,23	2,21	2,19	2,16
Compacité	78,51	79,47	81,40	81,46	83,25	83,99
Stabilité Hubbard-field à 18°C (kg)	653,90	689,94	814,49	803,73	732,80	719,11

L'évolution des différentes performances est représentée par les figures ci-après :

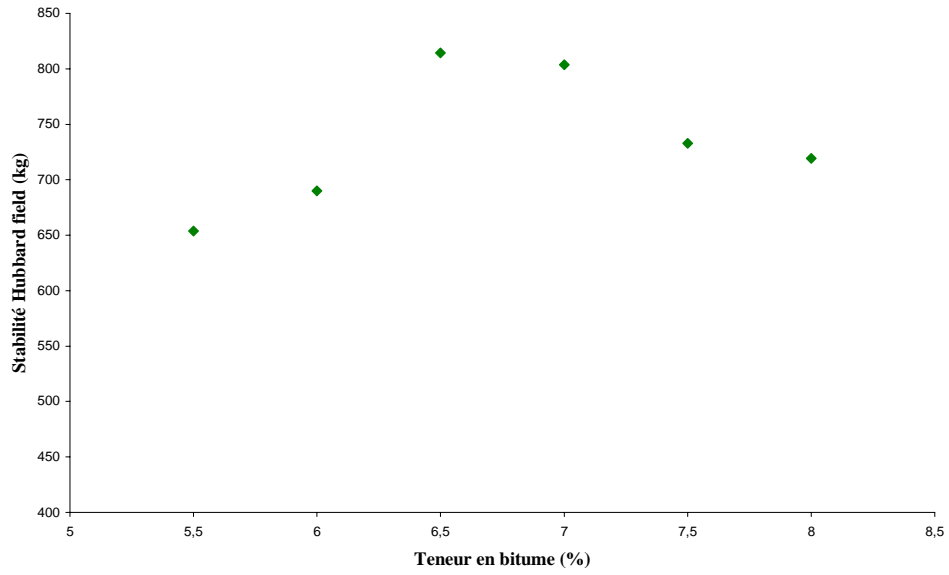


Figure III.3. : « Influence de la teneur en bitume 40/50 sur la stabilité Hubbard Field (100% sable de dune) »

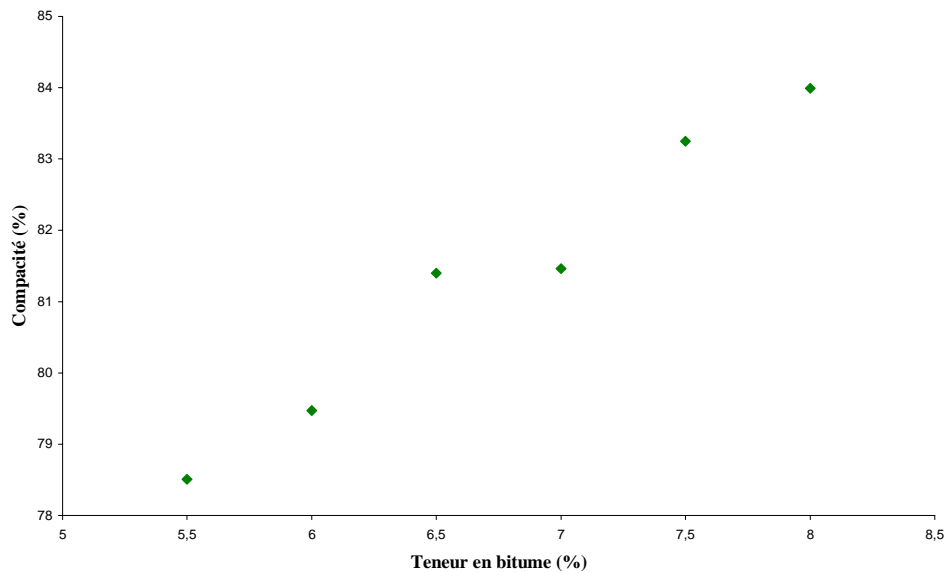


Figure III.4. : « Influence de la teneur en bitume 40/50 sur la compacité (100% sable de dune) »

III.3.2. Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité et la compacité Hubbard-Field

Des essais ont été effectués à différents pourcentages de sable concassé, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau III.6. : « Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec ajout de sable concassé (bitume 40/50) »

Module de richesse	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Sable concassé (%)	0	5	15	25	35
Teneur en bitume (%)	4,46	6,71	7,05	7,33	7,58
Poids à l'air (g)	106,32	106,50	107,00	107,35	107,50
Densité apparente	1,81	1,80	1,81	1,82	1,82
Densité théorique	2,23	2,22	2,20	2,18	2,16
Compacité	81,04	81,08	82,38	83,38	84,27
Stabilité Hubbard-field à 18°C (kg)	814,49	1163,12	1731,78	2753,32	3319,23

L'évolution des différentes performances est représentée par les figures ci-après :

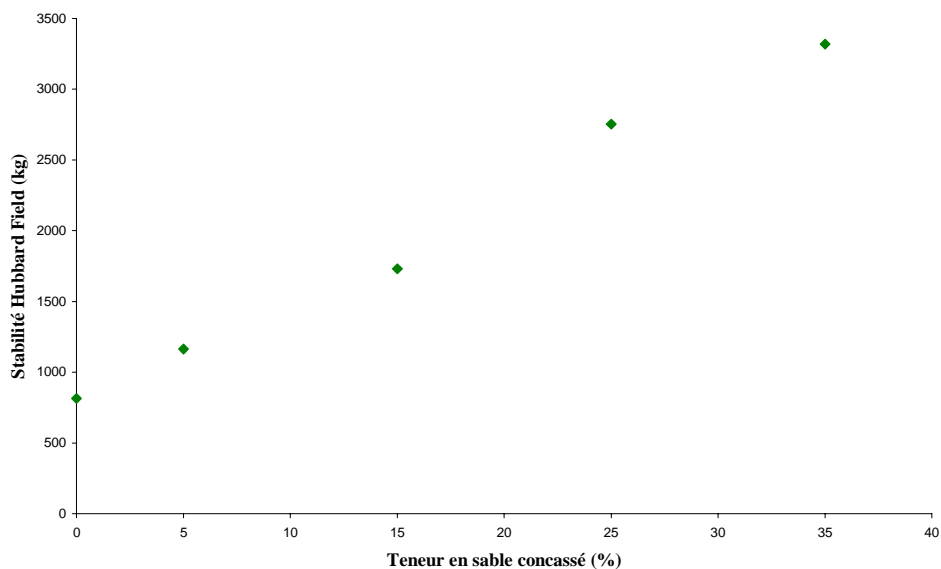


Figure III.5. : « Influence de la teneur sable concassé sur la stabilité Hubbard Field »

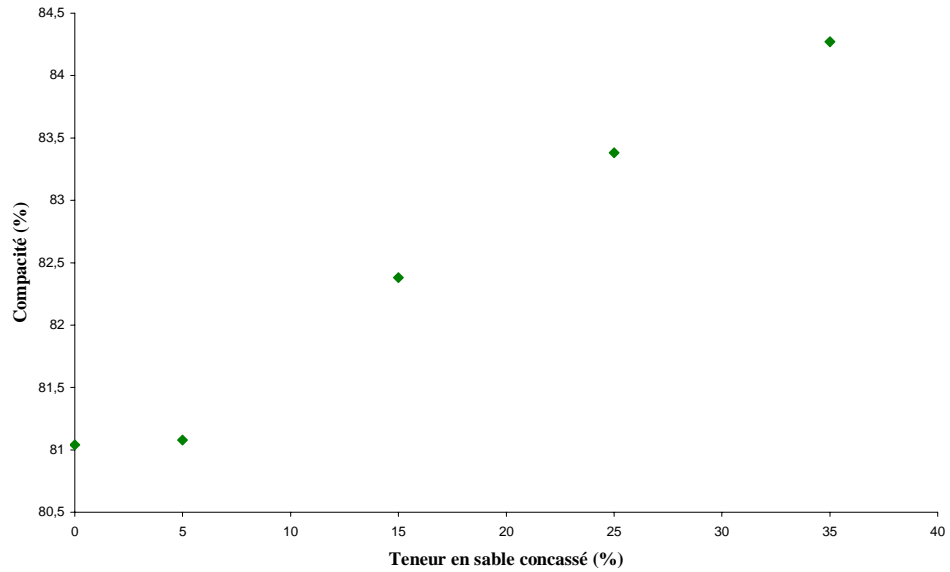


Figure III.6. : « Influence de la teneur sable concassé sur la compacité »

III.4. CONCLUSION

Ayant présenté ces résultats, nous pouvons à présent leur comparer nos résultats, et procéder à la modélisation d'un enrobé dont les caractéristiques mécanique sont proches de ceux déjà trouvés. Ce chapitre nous permettra de dire que notre sable bitume est conforme aux spécifications.

Partie Expérimentale

Chapitre IV

Formulation et Essais Mécaniques sur Sable Bitume

IV.1 INTRODUCTION

L'objectif de notre étude expérimentale est de partir d'une formulation optimale déjà établie dans des travaux antérieurs [02] et de procéder à des essais mécaniques pour déterminer les paramètres définissant le comportement de notre sable bitume. Avant d'entamer l'étape de la formulation, il nous faut procéder à des essais d'identification des matériaux utilisés. Ensuite confectionner les éprouvettes spécifiques à chaque type d'essai.

IV.2. ESSAIS DE LABORATOIRE

Les essais effectués au laboratoire sont les suivants :

IV.2.1. Identification des sables

Afin d'identifier les différents types de sables utilisés et pour s'assurer qu'ils répondent aux exigences et recommandations pour utilisation routières, les essais suivants ont été effectués :

- Granulométrie ;
- Equivalent de sable ;
- Essai de bleu de méthylène ;
- Friabilité des sables ;
- Poids spécifique.

IV.2.2. Identification des liants

Dans notre formulation nous utiliserons un liant plus ou moins dur, on choisira le bitume 40/50. Les essais spécifiques à ce type de liant sont les suivants :

- Essai de pénétrabilité à 25°C ;
- Essai de point de ramollissement bille et anneau ;
- Détermination de la densité relative ;
- Point d'éclair et point de flamme.

IV.2.3. Essais mécaniques

Après identification des différents composants du sable enrobé, des éprouvettes d'essai Duriez, Marshall, et Hubbard field, ont été confectionnées suivant la formulation optimale à base de sable de dune corrigé par du sable 0/3 concassé, pris de la même région que le sable de dune, ensuite nous avons procédé aux essais qui sont indispensables pour classer un enrobé quelconque et voir s'il est apte ou non à être utilisé dans la construction routière.

IV.3. PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISES

Dans ce qui suit, nous allons procéder à la présentation des matériaux de composition de l'enrobé.

IV.3.1. Les sables

1. Sable de dune de Ouergla

Ce sable a été prélevé des dunes se trouvant à proximité de l'aéroport de Ouergla. Son identification a donné les résultats suivants :

- **Caractéristiques physiques**

- Poids spécifique = 2,595 NFP 18-554 / NFP 18-555
- Equivalent de sable = 81,26 % NFP 18-598
- Valeur au bleu de méthylène = 0,13% NFP 18-592
- Friabilité = négligeable NFP 18-576

- **Analyse chimique**

Tableau IV.1. : « Analyse chimique du sable de dune de Ouergla »

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice + silicates) INS	95,08
Oxyde de fer et d'alumine (R ₂ O ₃)	0,60
Chlorures (NaCl)	0,35
Sulfates (CaSO ₄ -H ₂ O)	3,61
Carbonates (CaCO ₃)	1,77
Anhydride Carbonique (CO ₂)	0,78
Perte au feu 1050°C	1,11
Eau de constitution	0,33
Bilan chimique pondéral	101,74

- **Analyse granulométrique**

Tableau IV.2. : « Composition granulométrique du sable de dune de Ouergla »

Tamis (mm)	Tamisât (%)
6,300	100
5,000	100
4,000	100
2,000	100
1,000	100
0,500	99,60
0,400	95,4
0,315	88,80
0,200	53,82
0,100	6,16
0,080	1,60

L'analyse granulométrique est représentée par la figure (IV.1). La totalité des éléments constituant ce matériau ont un diamètre compris entre 0,5mm et 0,08mm. Il s'agit d'un sable propre de granulométrie serrée. Le faible pourcentage en (1,6 %) dénote la pauvreté du sable de dune de Ouergla en éléments fins < 80 microns ce qui nécessite sa correction.

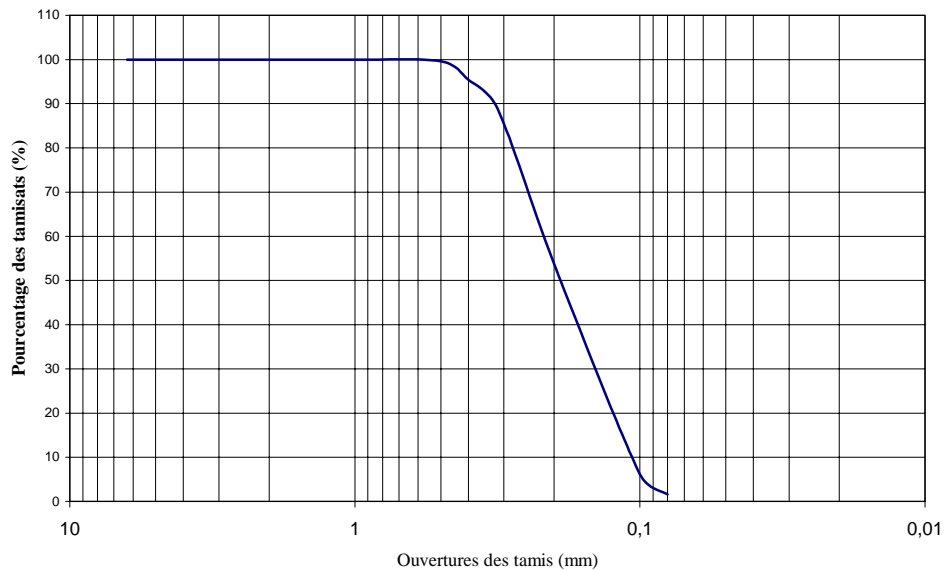


Figure IV.1. « Composition granulométrique du sable de dune de Ouergla »

2. Sable 0/3 concassé de Ouergla

Ce sable a été prélevé dans une carrière se trouvant sur la route menant à Hassi Messaoud à une vingtaine de kilomètres de la ville de Ouergla. Son identification a donné les résultats suivants :

- **Caractéristiques physiques**

- Poids spécifique = 2,543 NFP 18-554 / NFP 18-555
- Equivalent de sable = 42,19 % NFP 18-598
- Valeur au bleu de méthylène = 0,53% NFP 18-592
- Friabilité = 17,4 % NFP 18-576

- **Analyse chimique**

Tableau IV.3. : « Analyse chimique du sable 0/3 concassé de Ouergla »

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice + silicates) INS	90,98
Oxyde de fer et d'alumine (R ₂ O ₃)	2,15
Chlorures (NaCl)	0,41
Sulfates (CaSO ₄ -H ₂ O)	Traces
Carbonates (CaCO ₃)	8,85
Anhydride Carbonique (CO ₂)	3,89
Perte au feu 1050°C	4,05
Eau de constitution	0,16
Bilan chimique pondéral	102,55

- Analyse granulométrique**

Tableau IV.4. : « Composition granulométrique du sable 0/3 concassé de Ouergla »

Tamis (mm)	Tamisât (%)
6,300	100
5,000	100
4,000	97,52
2,000	81,3
1,000	61,22
0,500	41,53
0,400	35,11
0,315	26,92
0,200	12,01
0,100	2,21
0,080	2,08

L'analyse granulométrique est représentée par la figure (IV.2).

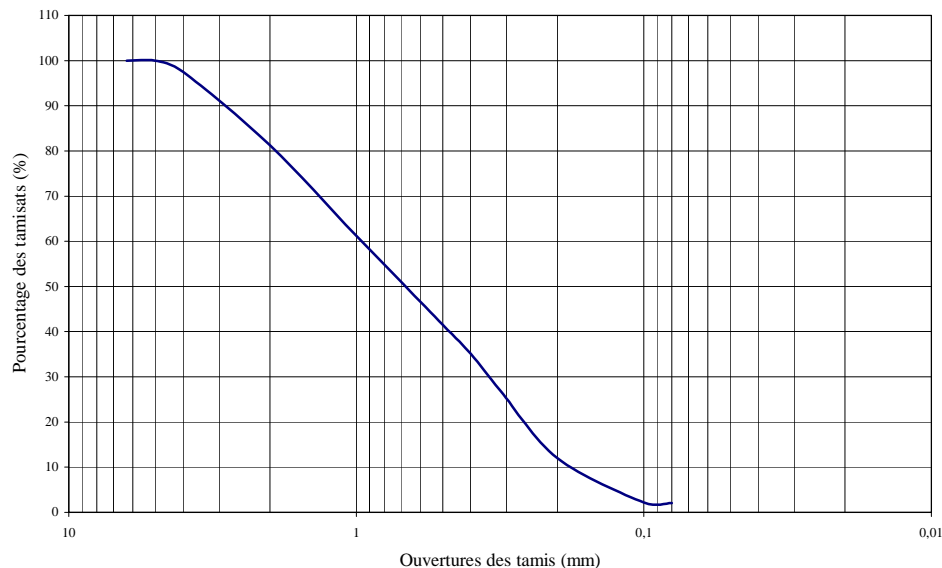


Figure IV.2. « Composition granulométrique du sable concassé 0/3 - Ouergla »

3. Sable de dune de Biskra

Ce sable a été prélevé des dunes se trouvant à la sortie de Biskra sur la route menant vers Alger. Son identification a donné les résultats suivants :

- Caractéristiques physiques**

- Poids spécifique = 2,54 NFP 18-554 / NFP 18-555
- Equivalent de sable = 78,75 % NFP 18-598
- Valeur au bleu de méthylène = 0,27% NFP 18-592
- Friabilité = négligeable NFP 18-576

- **Analyse chimique**

Tableau IV.5. : « Analyse chimique du sable de dune de Biskra »

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice + silicates) INS	71,68
Oxyde de fer et d'alumine (R ₂ O ₃)	6,78
Chlorures (NaCl)	0,29
Sulfates (CaSO ₄ -H ₂ O)	Traces
Carbonates (CaCO ₃)	12,80
Anhydride Carbonique (CO ₂)	10,03
Perte au feu 1050°C	11,25
Eau de constitution	1,22
Bilan chimique pondéral	102,77

- **Analyse granulométrique**

Tableau IV.6. : « Composition granulométrique du sable de dune de Biskra »

Tamis (mm)	Tamisât (%)
6,300	100
5,000	100
4,000	100
2,000	100
1,000	100
0,500	99,93
0,400	99,64
0,315	99,03
0,200	38,38
0,100	1,55
0,080	1,39

L'analyse granulométrique est représentée par la figure (IV.3). la totalité des éléments constituant ce matériaux ont un diamètre compris entre 0,5mm et 0,08mm. Il s'agit d'un sable propre de granulométrie serrée. Le faible pourcentage en fine (1,39 %) dénote la pauvreté du sable de dune de Biskra en éléments fins < 80 microns ce qui nécessite sa correction.

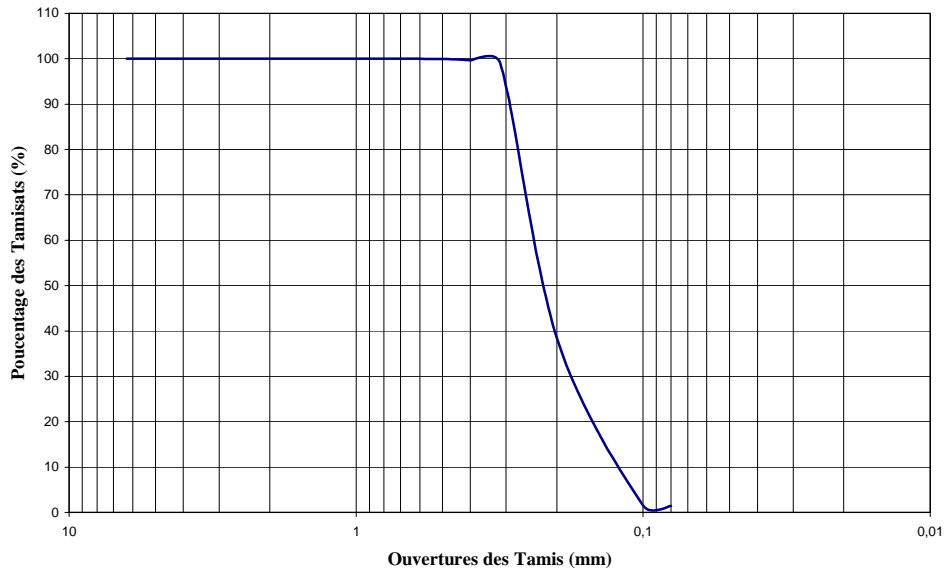


Figure IV.3. « Composition granulométrique du sable de dune de Biskra »

4. Sable concassé (carrière Lamouri Biskra)

Ce sable a été prélevé dans la carrière Lamouri de Biskra. Son identification a donné les résultats suivants :

- **Caractéristiques physiques**

- Poids spécifique = 2,575 NFP 18-554 / NFP 18-555
- Equivalent de sable = 19,66 % NFP 18-598
- Valeur au bleu de méthylène = 0,9 % NFP 18-592
- Friabilité = 25,6 % NFP 18-576

- **Analyse chimique**

Tableau IV.7. : « Analyse chimique du sable 0/3 concassé de Biskra »

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice + silicates) INS	31,6
Oxyde de fer et d'alumine (R ₂ O ₃)	0,35
Chlorures (NaCl)	0,29
Sulfates (CaSO ₄ -H ₂ O)	Traces
Carbonates (CaCO ₃)	65,22
Anhydride Carbonique (CO ₂)	28,70
Perte au feu 1050°C	30,07
Eau de constitution	1,37
Bilan chimique pondéral	98,83

- **Analyse granulométrique**

Tableau IV.8. : « Composition granulométrique du sable 0/3 concassé de Biskra »

Tamis (mm)	Tamisât (%)
6,300	100
5,000	96,82
4,000	93,46
2,000	82,24
1,000	76,00
0,500	51,61
0,400	42,53
0,315	33,06
0,200	17,19
0,100	11,31
0,080	10,10

L'analyse granulométrique est représentée par la figure (IV.4).

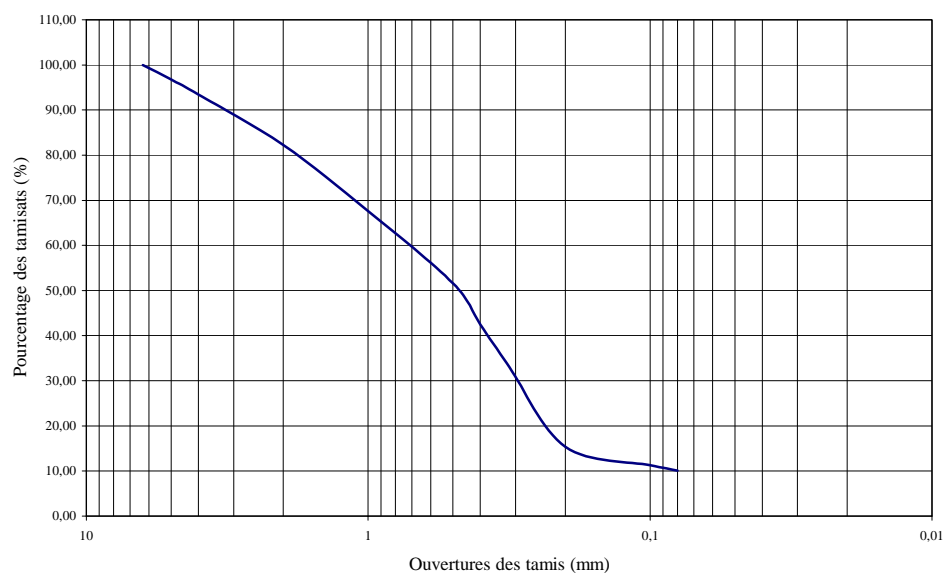


Figure IV.4. « Composition granulométrique du sable concassé 0/3 de la carrière Lamouri Biskra »

IV.3.2. Le liant

➤ Bitume 40/50

Les caractéristiques de ce liant sont les suivantes :

Pénétrabilité (1/10 mm) : 43
Point de ramollissement TBA (°C) : 56,55
Point d'éclair (°C) : 268
Point de flamme (°C) : 333
Densité relative : 1,02

➤ SELENE 120 [10]

Il s'agit d'un bitume naturel de la classe des asphaltites, riche en aromatiques et à forte teneur en asphaltènes et en nitrogènes.

Le SELENE compte moins de 15% de matières insolubles, essentiellement sous la forme de filler siliceux.

Il se présente sous la forme de veines compactes présentes dans le gisement de charbon d'une mine de Selenice en Albanie.

Le matériau est extrait en blocs qui peuvent ensuite être retraités à la demande dans une installation de concassage, sous forme de sable broyé 0/2, de gravillons 4/10, ou d'éléments plus grossiers. Eventuellement, le matériau peut être réduit en poudre (taille des éléments inférieure à 80 μ).

Très souple d'utilisation, le produit fini peut être fourni en deux conditionnements :

- En sacs fusibles de poids déterminé par le client pour utilisation pratique lors de l'utilisation dans les centrales d'enrobage discontinues dotées d'un malaxeur à pales, ou lors de son introduction directement dans le bitume chaud.
- En big-bags de 800 kg pour les utilisations en centrales continues, soit au niveau de l'anneau de recyclage, soit dans le tapis enfourneur des centrales à double flux de matériaux.

Le matériau est traité préalablement par un produit anti-mottage afin d'éviter toute reprise en masse.

Modification des bitumes

En ajoutant le SELENE 120 à un bitume 40/50 nous obtenons les courbes de pénétrabilité et du point de ramollissement suivantes :

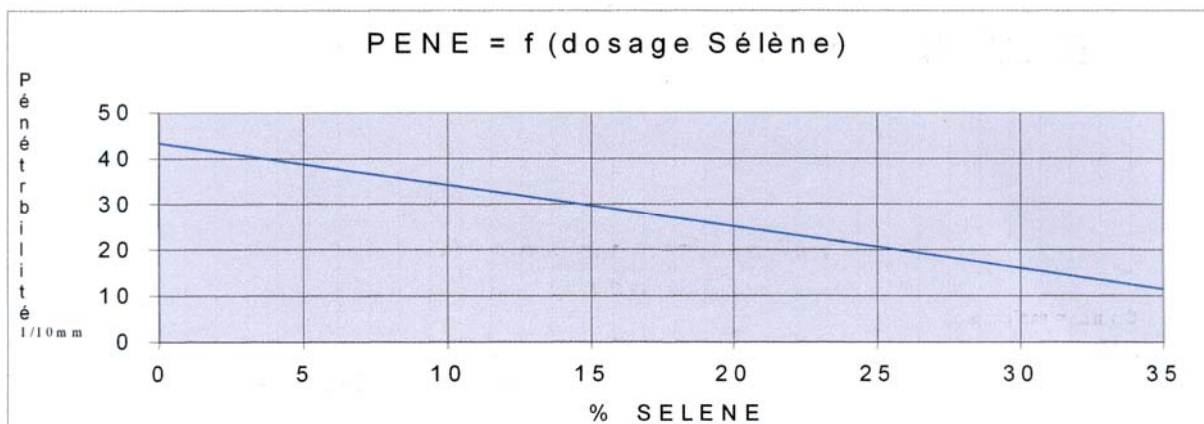


Figure IV.5. : « Influence du dosage du bitume SELENE sur la pénétrabilité »

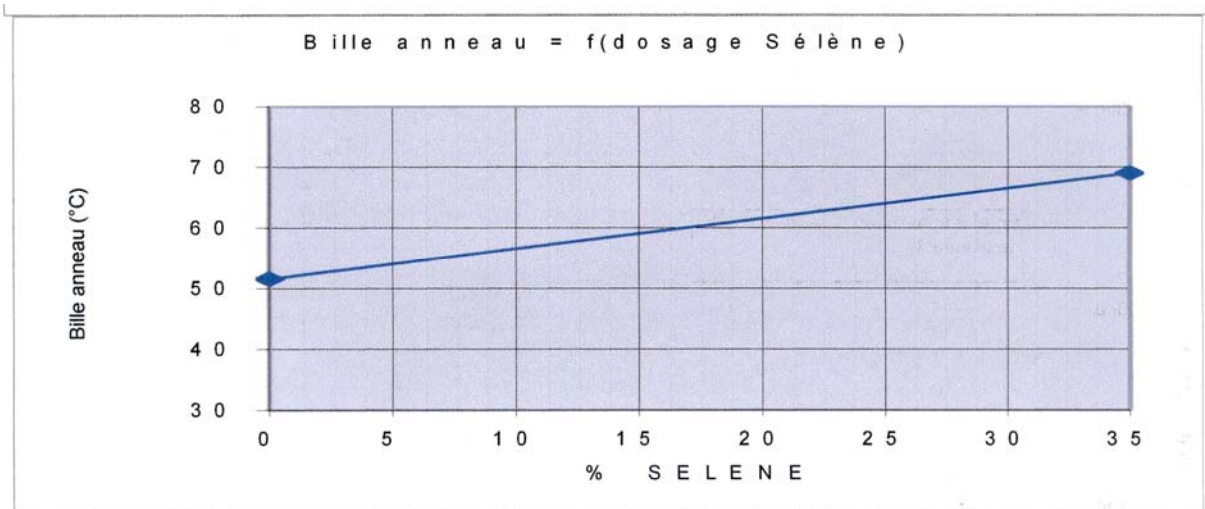


Figure IV.6. : « Influence du dosage du bitume en SELENE sur le point de ramollissement »

Principaux avantages du SELENE 120

- Totale compatibilité avec le bitume.
- Augmentation de la viscosité.
- Augmentation du point de ramollissement bille-anneau.
- Réduction de la pénétrabilité.
- Amélioration de la résistance à la déformation permanente.
- Réduction de la sensibilité à la température.
- Augmentation de la durée de vie des enrobés
- Augmentation du module complexe des enrobés.

Domaines d'application

- Enrobé à modules élevés.
- Bétons bitumineux à modules élevés.
- Routes à fort trafic.
- Giratoires.
- Zones canalisées et à fort trafic.
- Zones portuaires.
- Plates-formes industrielles.
- Aéroports.
- Barrières de péage, arrêt de bus.

Et d'une manière générale partout où les contraintes mécaniques et les conditions climatiques sont exceptionnelles.

IV.3.3. Bitume 40/50 modifié avec le SELENE 120

Un bitume 40/50 a été modifié avec le SELENE 120 à raison de 15% de la masse totale du liant, la composition de notre liant est donc (85% de bitume 40/50 et 15% de SELENE 120).

Les caractéristiques de ce liant sont les suivantes :

Pénétrabilité (1/10 mm) : 36

Point de ramollissement TBA (°C) : 61,25

Point d'éclair (°C) : 273

Point de flamme (°C): 348

Densité relative : 1,042

IV.3.4. Les fillers calcaires

Les fillers calcaires utilisés ont été obtenus par broyage de la fraction calcaire 15/25.

L'analyse chimique a donné les résultats suivants :

Tableau IV.9. : « Analyse chimique des fillers calcaires »

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice + silicates) INS	8.34
Oxyde de fer et d'alumine (R ₂ O ₃)	2.13
Chlorures (NaCl)	0.47
Sulfates (CaSO ₄ -H ₂ O)	Traces
Carbonates (CaCO ₃)	85.9
Anhydride Carbonique (CO ₂)	37.82
Perte au feu 1050°C	41.53
Eau de constitution	3.71
Bilan chimique pondéral	1.55

Le poids spécifique est de : 2,487

IV.4. FORMULATION DU SABLE BITUME

IV.4.1. Formulations utilisées

Nous avons utilisé deux sables de deux régions différentes à savoir Ouergla et Biskra. L'enrobé a été confectionné avec un sable de dune avec ajout de sable concassé, et un bitume 40/50, suivant une étude faite auparavant [02] et qui a abouti à une formulation optimale dont les pourcentages des agrégats sont comme suit :

- Sable de dune : 65%
- Sable concassé : 35%
- La teneur en liant calculée est : 6,5% de la masse des agrégats pour les sables des deux régions (les mélanges de sable de dune + sable concassé des deux régions présentent pratiquement les mêmes propriétés génésiques).

Dans un premier lieu nous avons utilisé un bitume 40/50 pour enrober les deux sables mélangés. Par la suite nous avons procédé à une série d'essais sur l'enrobé en question.

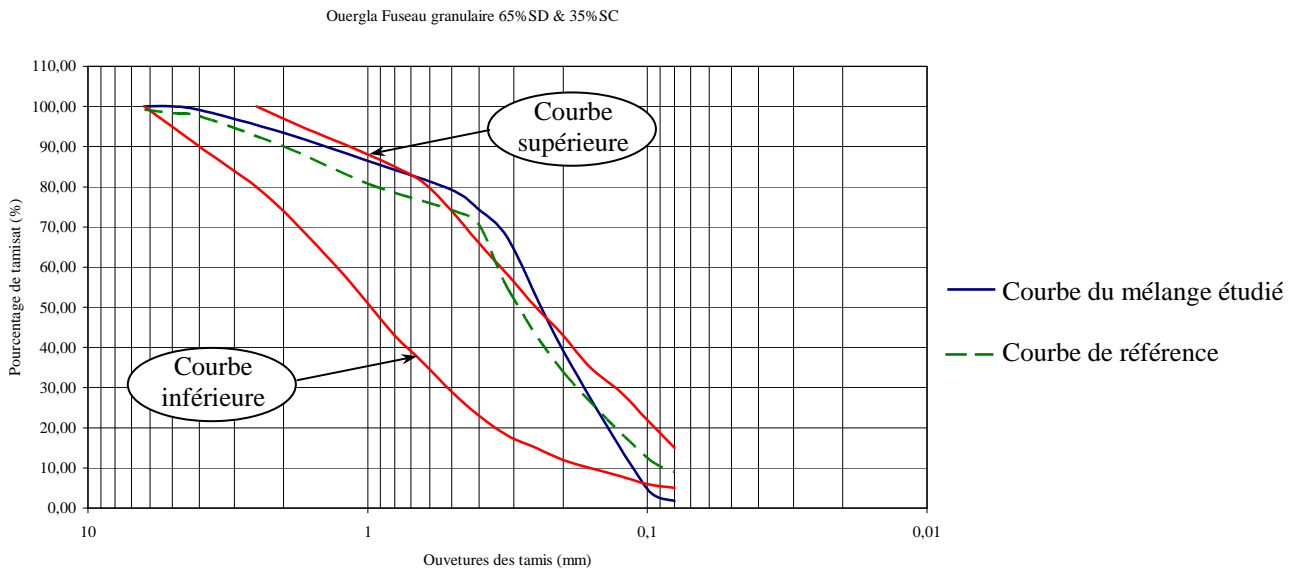
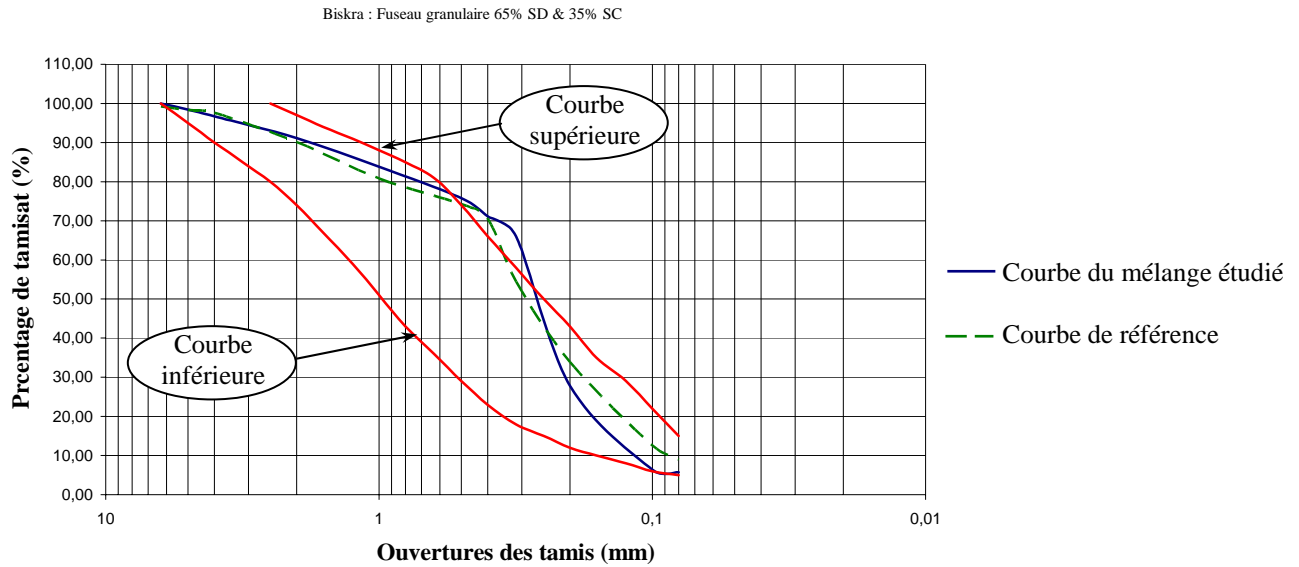
Puis nous avons utilisé un ajout de fines calcaires de façon à ce que le pourcentage total de fines dans le mélange ne dépasse pas 15% afin que la maniabilité du bitume ne soit altérée. L'ajout des fines en grande quantité n'est pas nécessaire, car les fines sont utilisées pour augmenter l'adhésivité chose qui n'est pas primordiale en milieu saharien, et aussi pour combler les vides (compacité) qui n'est pas nécessaire car les matériaux utilisés sont de granulométrie serrée et donnent une bonne compacité. L'ajout de fines permet d'augmenter la stabilité et la tenue à l'eau de l'enrobé.

Nous avons aussi utilisé une dope, le SELENE 120 (pour les avantages qu'il présente quand à l'amélioration de l'enrobé cités précédemment). Ce dernier est ajouté de façon à ce que la quantité totale du liant doit contenir 15% de SELENE.

IV.4.2. Fuseau granulaire pour micro-enrobés

Pour une meilleure formulation de notre sable bitume, la courbe granulométrique de notre mélange de sables doit s'insérer dans le fuseau granulaire spécifique aux micro-enrobés. La courbe désignant les sables que nous avons utilisés est alors comparée à une courbe de référence obtenue dans une étude antérieure [02].

Vue l'étude à laquelle nous nous référons, nous ne comparons que le mélange composé de 65% de sable de dune avec 35% de sable concassé. Les fuseaux granulaires sont donnés par le figure IV.7 et la figure IV.8.



IV.5. RESULTATS DES ESSAIS MECANQUES

Nous avons effectué l'essai Duriez et Hubbard-Field sur notre sable bitume, une moyenne arithmétique des résultats trouvés est donnée dans ce que suit :

IV.5.1. Première série d'essais (65% SD + 35% SC + Bitume 40/50)

Utilisation de 65% de sable de dune + 35% de sable concassé, enrobés avec un bitume 40/50.

1. Gâchée confectionnée avec les sables de Biskra

Module de richesse de la gâchée : $k = 4,02$

Le mélange de sables composé de 65% de sable de dune et 35% de sable concassé donne un pourcentage en fines égal à 3,28%.

Le pourcentage en liant est égal à 6,5% de la masse du corps solide (mélange de sables).

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

➤ **Essai DURIEZ**

Masse volumique apparente de l'éprouvette : 1,92 NF P – 98-250-6 (nov 91)

Masse volumique réelle de l'enrobé : 2,34

Compacité : 82,05%

Résistance des éprouvettes conservées à sec à 18°C : R = 450 kg/mm²

Résistance des éprouvettes conservées en immersion à 18° C : r = 235 kg/mm²

La tenue à l'eau de l'enrobé $\frac{r}{R} = 0,522$

➤ **Essai Hubbard – Field**

Masse volumique apparente de l'éprouvette : 1,918 NF P – 98-250-6 (nov 91)

Masse volumique réelle de l'enrobé : 2,34

Compacité : 81,96%

Stabilité Hubbard-Field : 1220 kg/mm²

2. Gâchée confectionnée avec les sables de Ouergla

Module de richesse de la gâchée : k = 4,36

Le mélange de sables composé de 65% de sable de dune et 35% de sable concassé donne un pourcentage en fines égal à 1,27%.

Le pourcentage en liant est égal à 6,5% de la masse du corps solide (mélange de sables).

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

➤ **Essai DURIEZ**

Masse volumique apparente de l'éprouvette : 1,91 NF P – 98-250-6 (nov 91)

Masse volumique réelle de l'enrobé : 2,35

Compacité : 81,27%

Résistance des éprouvettes conservées à sec à 18°C : R = 350 kg/mm²

Résistance des éprouvettes conservées en immersion à 18° C : r = 250 kg/mm²

La tenue à l'eau de l'enrobé $\frac{r}{R} = 0,714$

➤ **Essai Hubbard – Field**

Masse volumique apparente de l'éprouvette : 1,93 NF P – 98-250-6 (nov 91)

Masse volumique réelle de l'enrobé : 2,35

Compacité : 82,13%

Stabilité Hubbard-Field : 1140 kg/mm²

IV.5.2. Deuxième série d'essais (65% SD + (21-22%) SC + (13-14%) de fillers calcaires + Bitume 40/50)

Utilisation d'un ajout de fillers calcaire de façon à obtenir un pourcentage de fine qui ne dépasse pas de beaucoup 15%, cela pour permettre une meilleure maniabilité de notre enrobe au malaxage, et parce que les conditions d'utilisation de l'enrobé n'exigent pas une forte teneur en fines.

1. Gâchée confectionnée avec les sables de Biskra + fillers calcaires

Module de richesse de la gâchée : $k = 3,913$

Le mélange de sables composé de 65% de sable de dune, 22% de sable concassé et de 13% de fillers calcaires donne un pourcentage en fines égal à 15,26%.

Le pourcentage en liant correspondant est égal à 7,75% de la masse du corps solide (mélange de sables).

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

➤ Essai DURIEZ

Masse volumique apparente de l'éprouvette : 2,04 NF P – 98-250-6 (nov 91)

Masse volumique réelle de l'enrobé : 2,29

Compacité : 89,08%

Résistance des éprouvettes conservées à sec à 18°C : $R = 650 \text{ kg/mm}^2$

Résistance des éprouvettes conservées en immersion à 18° C : $r = 420 \text{ kg/mm}^2$

La tenue à l'eau de l'enrobé $\frac{r}{R} = 0,646$

➤ Essai Hubbard – Field

Masse volumique apparente de l'éprouvette : 2,07 NF P – 98-250-6 (nov 91)

Masse volumique réelle de l'enrobé : 2,29

Compacité : 90,39%

Stabilité Hubbard-Field : 1700 kg/mm²

2. Gâchée confectionnée avec les sables de Ouergla+ fillers calcaires

Module de richesse de la gâchée : $k = 3,97$

Le mélange de sables composé de 65% de sable de dune, 21% de sable concassé et de 14% de fillers calcaires donne un pourcentage en fines égal à 15,056%.

Le pourcentage en liant est égal à 7,75% de la masse du corps solide (mélange de sables).

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

➤ **Essai DURIEZ**

Masse volumique apparente de l'éprouvette : 2,00 NF P – 98-250-6 (nov 91)

Masse volumique réelle de l'enrobé : 2,32

Compacité : 86,20%

Résistance des éprouvettes conservées à sec à 18°C : R = 560 kg/mm²

Résistance des éprouvettes conservées en immersion à 18° C : r = 425 kg/mm²

La tenue à l'eau de l'enrobé $\frac{r}{R} = 0,759$

➤ **Essai Hubbard – Field**

Masse volumique apparente de l'éprouvette : 2,01 NF P – 98-250-6 (nov 91)

Masse volumique réelle de l'enrobé : 2,32

Compacité : 86,63%

Stabilité Hubbard-Field : 1510 kg/mm²

IV.5.3. Troisième série d'essais (65% SD + 35% SC + Bitume 40/50 modifié au SELENE 120)

Utilisation de 65% de sable de dune + 35% de sable concassé, enrobés avec un bitume 40/50 mélangé au SELENE 120.

1. Gâchée confectionnée avec les sables de Biskra (bitume modifié)

Module de richesse de la gâchée : k = 4,02

Le mélange de sables composé de 65% de sable de dune et 35% de sable concassé donne un pourcentage en fines égal à 3,28%.

Le pourcentage en liant est égal à 6,5% de la masse du corps solide (mélange de sables).

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

➤ **Essai DURIEZ**

Masse volumique apparente de l'éprouvette : 2,13 NF P – 98-250-6 (nov 91)

Masse volumique réelle de l'enrobé : 2,34

Compacité : 91,02%

Résistance des éprouvettes conservées à sec à 18°C : R = 800 kg/mm²

Résistance des éprouvettes conservées en immersion à 18° C : r = 625 kg/mm²

La tenue à l'eau de l'enrobé $\frac{r}{R} = 0,781$

➤ **Essai Hubbard – Field**

Masse volumique apparente de l'éprouvette : 2,13 NF P – 98-250-6 (nov 91)

Masse volumique réelle de l'enrobé : 2,34

Compacité : 91,03%

Stabilité Hubbard-Field : 2020 kg/mm²

2. Gâchée confectionnée avec les sables de Ouergla (bitume modifié)

Module de richesse de la gâchée : $k = 4,36$

Le mélange de sables composé de 65% de sable de dune et 35% de sable concassé donne un pourcentage en fines égal à 1,27%.

Le pourcentage en liant est égal à 6,5% de la masse du corps solide (mélange de sables).

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

➤ Essai DURIEZ

Masse volumique apparente de l'éprouvette : 2,11 NF P – 98-250-6 (nov 91)

Masse volumique réelle de l'enrobé : 2,36

Compacité : 89,41%

Résistance des éprouvettes conservées à sec à 18°C : $R = 850 \text{ kg/mm}^2$

Résistance des éprouvettes conservées en immersion à 18° C : $r = 675 \text{ kg/mm}^2$

La tenue à l'eau de l'enrobé $\frac{r}{R} = 0,794$

➤ Essai Hubbard – Field

Masse volumique apparente de l'éprouvette : 2,12 NF P – 98-250-6 (nov 91)

Masse volumique réelle de l'enrobé : 2,36

Compacité : 89,83%

Stabilité Hubbard-Field : 1830 kg/mm²

IV.6. CONCLUSION

En comparant les résultats de compacité et stabilité Hubbard Field trouvés dans la première série d'essai (les seuls comparables avec les résultats en références), nous remarquons qu'ils sont voisins, la compacité trouvée est de (81,96%, 82,13) comparée à 84,27%, quand à la stabilité elle est de (1220kg, 1140 kg) comparée à 2753,32. le SELENE a été utilisé pour se rapprocher le plus possible des références, chose qui s'est réalisée. Nous pouvons donc considéré que notre sable bitume est conforme au spécification. La différence entre les résultats trouvés et ceux de référence est due à la différence entre les matériaux et surtout au faible pourcentage de fines dans notre mélange.

Chapitre V

Modélisation du Comportement du Sable Bitume

V.1. INTRODUCTION

Ayant effectué les différents essais mécaniques et confirmé les résultats avec ceux cités en référence, nous pouvons à présent procéder aux essais de comportement, et déterminer les différents paramètres rhéologiques (le module de déformation « E », et le coefficient de viscosité « η »), à partir d'une courbe de fluage. Nous choisirons un modèle rhéologique dont l'allure de la courbe de fluage se rapproche le plus de la notre. Par la suite nous allons procéder à un calage de notre modèle en calculant l'équation rhéologique et en injectant les valeurs des modules trouvés.

V.2. ESSAIS DE COMPORTEMENT EFFECTUES :

Les essais de comportement ont été effectués sur deux gâchées. Dans la première nous avons utilisé un bitume 40/50 et dans la deuxième un bitume 40/50 modifié au SELENE 120.

V.2.1. Module de rigidité mesuré au NAT

1. Première gâchée 65% SD + 35% SC + bitume 40/50

L'essai au NAT sur une éprouvette avec les spécifications suivantes :

Composition : 65% sable de dune + 35% sable concassé + bitume 40/50

Hauteur : 76,6 mm

Diamètre : 101,5 mm

Déformation imposée à l'éprouvette : 5 microns

Temps de chargement imposé à l'éprouvette : 120 ms

Température 1 : 19,8°C

Température 2 : 18,9°C

a donné les courbes de la figure (V.1) dont les résultats sont présentés dans le tableau(V.1) :

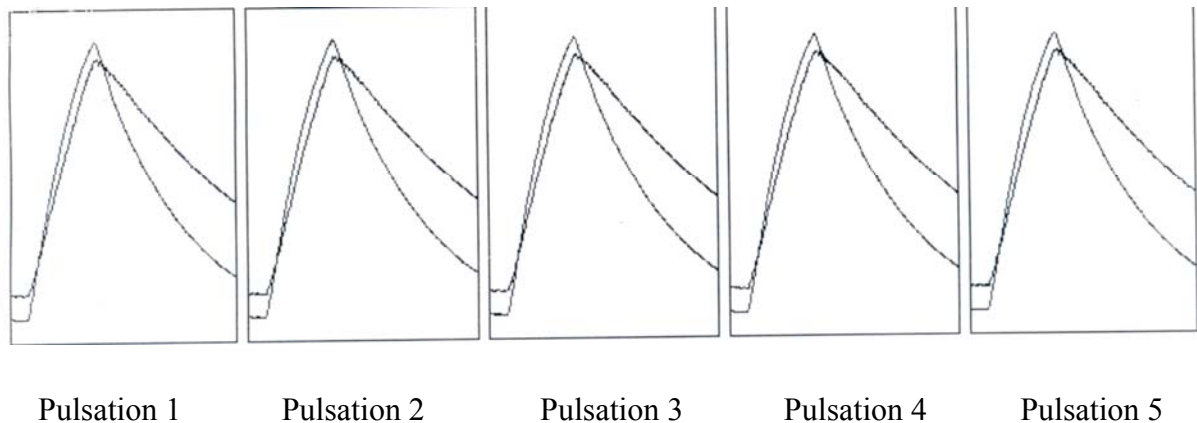


Figure V.1. : « Courbes de calcul du module de déformation E_1 »

Tableau V.1. : « Résultats de l'essai au NAT de la première formule »

Pulsation N°	Charge verticale (kN)	Contrainte horizontale (kPa)	Déformation horizontale (microns)	Temps de chargement (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	2,86	290,0	4,9	120	2115
2	2,91	295,9	5,1	120	2058
3	2,91	295,8	5,1	120	2101
4	2,83	287,7	5,0	120	2002
5	2,78	282,6	4,9	120	2034
Moyenne	2,86	290,4	5,0	120	2062

2. Deuxième gâchée : 65% SD + 35% SC + Bitume 40/50 modifié au SELENE 120

L'essai au NAT sur une éprouvette avec les spécifications suivantes :

Composition : 65% sable de dune + 35% sable concassé + bitume 40/50 modifié au SELENE120

Hauteur : 75,8 mm

Diamètre : 101,6 mm

Déformation imposée à l'éprouvette : 5 microns

Temps de chargement imposé à l'éprouvette : 120 ms

Température 1 : 19,7°C

Température 2 : 18,7°C

A donné les courbes de la figure (V.2) dont les résultats sont présentés dans le tableau(V.2) :

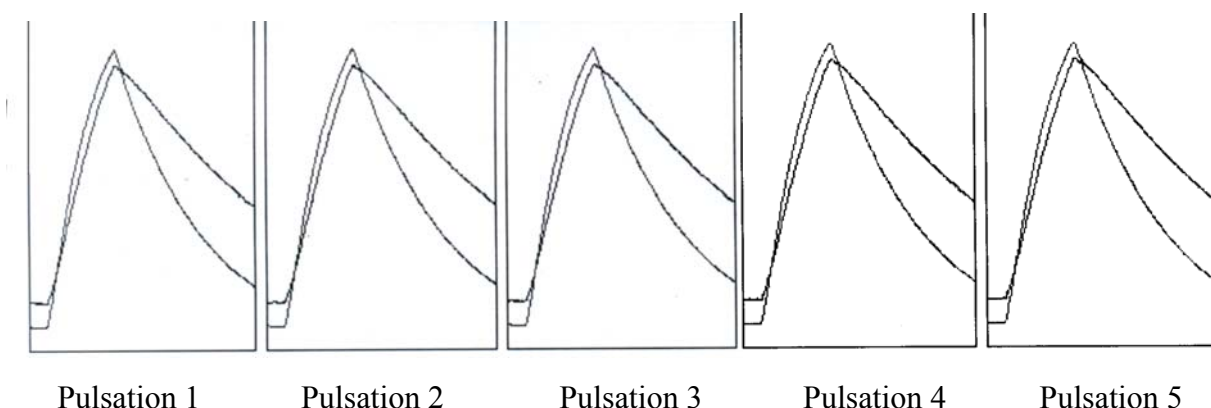


Figure V.2. : « courbes de calcul du module de déformation E_2 »

Tableau V.2. : « Résultats de l'essai au NAT de la deuxième formule »

Pulsation N°	Charge verticale (kN)	Contrainte horizontale (kPa)	Déformation horizontale (microns)	Temps de chargement (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	2,86	280,9	4,9	120	2162
2	2,91	286,1	5,1	120	2227
3	2,91	287,1	5,1	120	2234
4	2,83	277,5	5,0	120	2217
5	2,78	271,5	4,9	120	2200
Moyenne	2,86	280,6	5,0	120	2208

V.2.2. Essai de résistance à la traction indirecte

Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés utilisés en assise de chaussées, sont souvent caractérisés par leur résistance soit en compression soit en traction. Pour cela on a effectué l'essai à la traction indirecte pour distinguer entre les différents mélanges étudiés, et ceci en se basant sur le couple module – résistance (E, R).

1. But de l'essai

L'essai consiste à exercer sur l'éprouvette suivant deux génératrices opposées un effort de compression jusqu'à la rupture de celle-ci, les caractéristiques mesurés sont la force appliquée et la déformation du plan diamétral perpendiculaire au plan d'application de la force. L'exploitation des mesures permet la détermination de la résistance à la traction et le calcul du module élastique.

2. Détermination du module du matériau

La détermination du module nécessite la mesure en permanence en cours d'essai de la déformation de l'éprouvette. L'essai a été effectué après immersion des éprouvettes dans le bain marie à une température de 40° C pendant ½ heure.

La figure V.3 montre la forme de l'éprouvette avant et durant l'essai

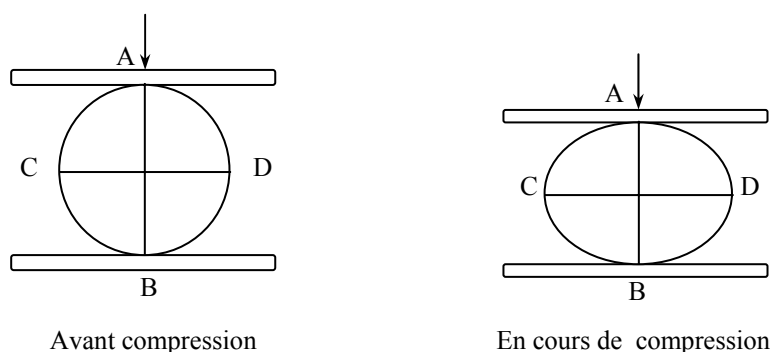


Figure V.3. : « Variation de la forme de l'éprouvette au cours de l'essai de traction indirecte »

La rupture est donc provoquée par fissuration due à la haute compression aux points d'application des charges et à la traction au centre de l'éprouvette.

3. Etude du module de déformation

En se basant sur la méthode de l'élasticité linéaire, nous pouvons calculer à partir de résultats obtenus, les modules de déformation. Le module de déformation E est donné par la formule suivante :

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta H/H} = \frac{\Delta F/S}{\Delta H/H} \quad (\text{V.1})$$

ΔP : gradient de pression (kg/cm^2)

S : section de l'éprouvette (cm^2)

ΔH : déformation correspondant au gradient d'effort (mm)

H : hauteur de l'éprouvette (mm)

ΔF : gradient d'effort (kg)

En considérant, sur les graphes effort – déformation obtenus (figures : V.4.a, V.4.b, V.4.c, V.4.d), la partie linéaire, on exprime la formule précédente comme suit :

$$E = \frac{(L_2 - L_1)/S}{(H_2 - H_1)/H} \times C \quad (\text{V.2})$$

L_1, L_2 : lecture anneau

S : section de l'éprouvette considérée comprimée pour l'essai de traction indirecte ($3,14 \times RH$)

C : coefficient de l'anneau (0,63kg/div)

H_1, H_2 : déformation axiale délimitant la plage linéaire l_1, l_2 (mm).

H : diamètre de l'éprouvette pour l'essai de traction indirecte.

D'où :

$$E = k \times \frac{L_2 - L_1}{H_2 - H_1} \quad (V.3)$$

avec : $k = 0,66$ pour la résistance à la traction indirecte.

Le module de déformation est donc exprimé en kg/cm^2

Les différents résultats du module E sont donnés sur les graphes des figures : V.4.a, V.4.b, V.4.c, V.4.d

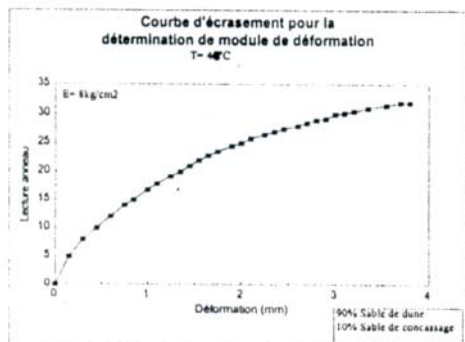


Figure V.4.a

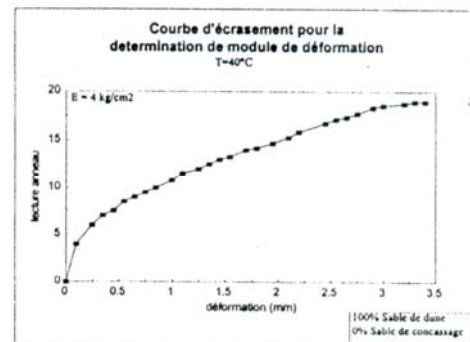


Figure V.4.b

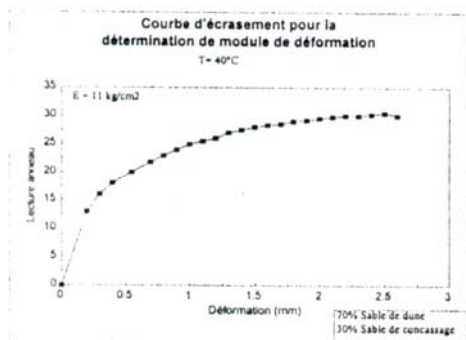


Figure V.4.c

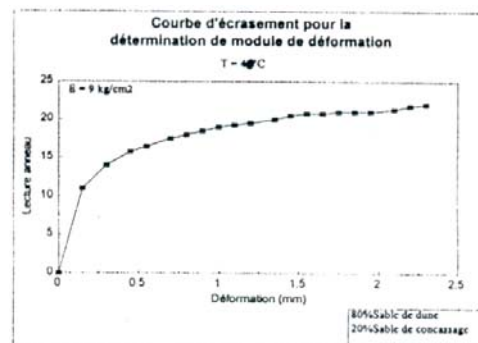


Figure V.4.d

Figure V.4. : « Courbe contrainte déformation pour la détermination du module de déformation »

V.2.3. Essai de fluage statique

Le matériel propre à l'essai est donné par la figure (V.5) :



Figure V.5. : « Matériel utilisé dans l'essai de fluage statique »

L'acquisition des données se fait à l'aide d'un micro-ordinateur via une interface le reliant à la machine d'essai. Tous les paramètres tels que la contrainte et la déformation, qui sont imposées, sont contrôlés par l'ordinateur. La contrainte σ_0 est égale à 0,14 MPa.

1. Première gâchée : 65% SD + 35% SC + bitume 40/50

Ce premier essai à l'odomètre a donné les résultats présentés dans le tableau (V.3) :

Tableau V.3. : « Résultats de l'essai de fluage statique sur la 1^{ère} gâchée »

Temps (s)	déformation relative (‰)
1	0,004
5	0,021
10	0,034
20	0,050
40	0,066
60	0,076
80	0,082
100	0,086
200	0,096
300	0,102
400	0,106

Temps (s)	déformation relative (%)
500	0,108
600	0,111
700	0,114
800	0,116
900	0,117
1000	0,119
1200	0,123
1400	0,125
1800	0,131
2200	0,135
2800	0,140
3600	0,145

Ces résultats nous donnent alors une courbe de fluage illustrée par la figure (V.6)

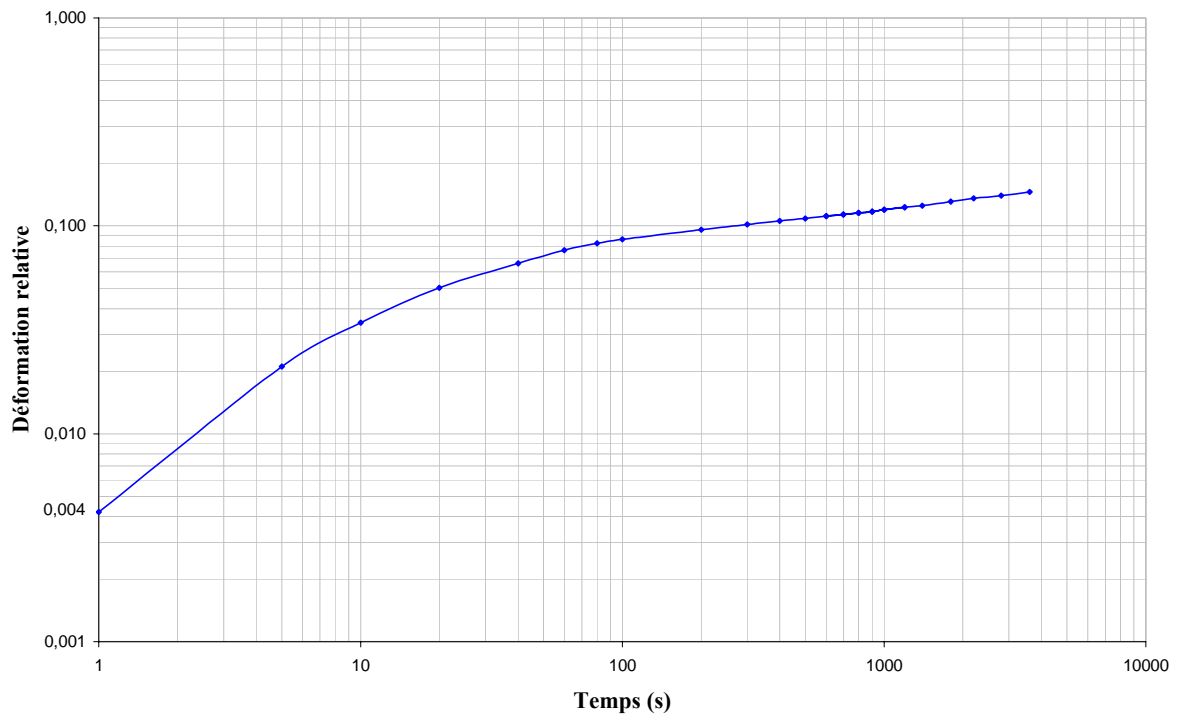


Figure V.6. : « Courbe du fluage statique (65% SD + 35% SC + bitume 40/50) »

2. Deuxième gâchée : 65% SD + 35% SC + Bitume 40/50 modifié au SELENE 120

Pour cet essai, les résultats sont présentés dans le tableau (V.4) :

Tableau V.4. : « Résultats de l'essai de fluage statique sur la 2^{ème} gâchée »

Temps (s)	déformation relative (‰)
1	0,007
5	0,026
10	0,037
20	0,050
40	0,068
60	0,073
80	0,076
100	0,079
200	0,083
300	0,085
400	0,087
500	0,088
600	0,089
700	0,090
800	0,091
900	0,092
1000	0,093
1200	0,094
1400	0,096
1800	0,097
2200	0,099
2800	0,099
3600	0,101

Ces résultats nous donnent alors une courbe de fluage illustrée par la figure (V.7)

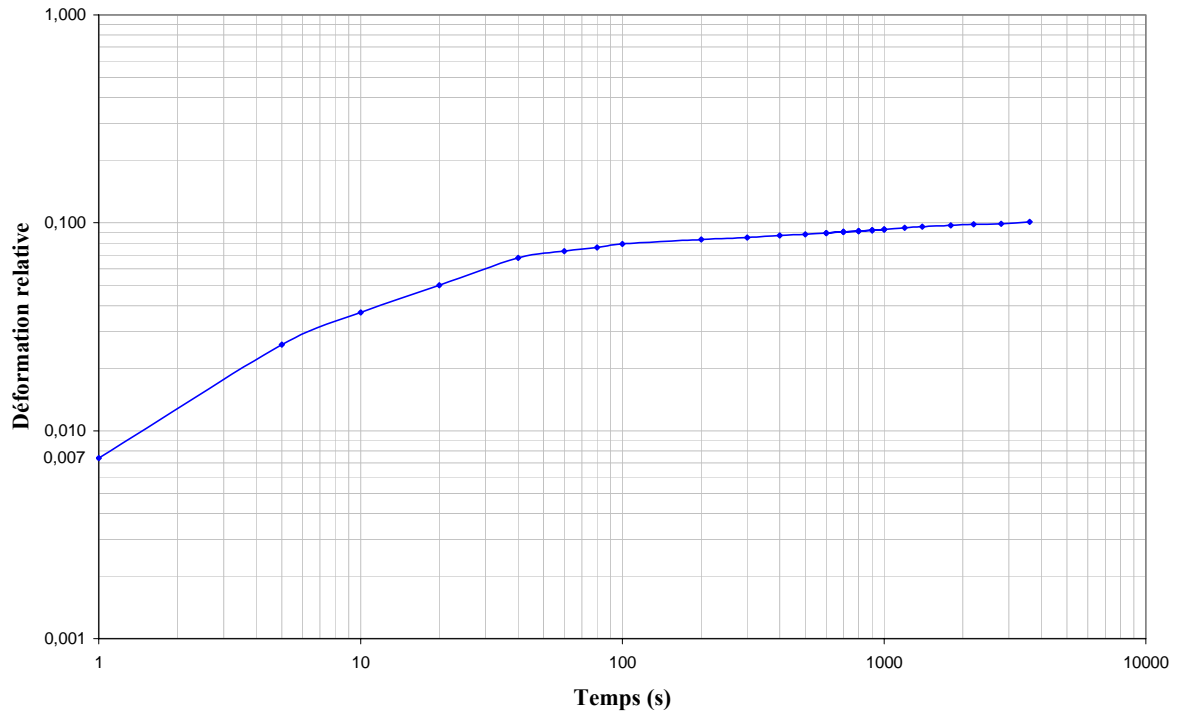


Figure V.7. : « Courbe du fluage statique 65% SD + 35% SC + bitume 40/50 modifié au SLENE 120 »

V.3. MODELISATION DU COMPORTEMENT

V.3.1. Analyse des courbes

Les deux courbes de fluage ont pratiquement la même allure. Nous pouvons alors dire que chacune de ces courbes se décompose en trois parties :

- * Une variation instantanée à l'instant $t = 0$, d'amplitude E_0 , pour des raisons pratiques cette variation a été reporté à l'instant ($t=1s$), pour faciliter le traçage de notre courbe avec une échelle logarithmique. Cette partie est dite élasticité instantanée ;
- * Une variation assez rapide au cours du temps correspondant théoriquement à une élasticité retardée, pratiquement cette partie correspond au réarrangement des grains de l'enrobé (partie courbe du graphe) ;
- * Une variation linéaire de pente $\frac{1}{\eta_0}$ pour une contrainte égale à l'unité. Dans notre cas la pente est égale à $\frac{\sigma_0}{\eta_0}$

Par cette analyse nous pouvons dire que notre courbe de fluage et celle du fluage du modèle de Kelvin Voigt ont une allure similaire. Donc nous pouvons utiliser l'équation de ce modèle pour définir celle de notre enrobé.

V.3.2. Elasticité instantanée E_0

Le module d'élasticité instantanée est celui calculé au NAT les résultats sont les suivants :

1. Première gâchée : 65% SD + 35% SC + bitume 40/50

Le module d'élasticité : $E_0 = 2062$ MPa

2. Deuxième gâchée : 65% SD + 35% SC + Bitume 40/50 modifié au SELENE 120

Le module d'élasticité : $E_0 = 2208$ MPa

V.3.3. Module de viscosité (η_0)

Pour obtenir le module de viscosité η , il nous faut approximer la partie linéaire par une courbe de tendance donnant la pente de cette dernière. Ainsi nous allons tirer le module de viscosité de notre enrobé.

1. Première gâchée : 65% SD + 35% SC + bitume 40/50

L'approximation de la branche linéaire est faite de façon à obtenir un coefficient de corrélation (R^2) le plus proche possible de 1. Cette approximation est faite à l'aide d'un logiciel de traitement de données et est illustrée sur la figure (V.8).

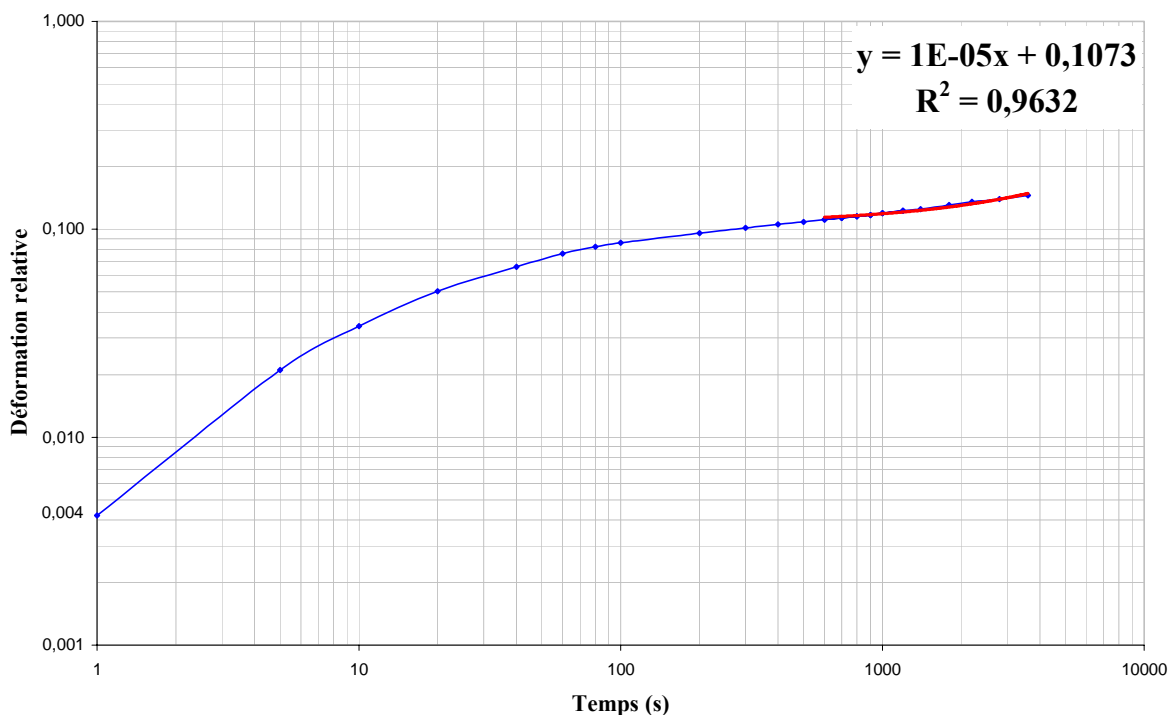


Figure V.8. : « Approximation de la branche linéaire de la courbe de fluage »
(65% SD + 35% SC + bitume 40/50)

Ce même logiciel nous donne l'équation de la droite qui approche notre courbe (droite de couleur rouge) et aussi le coefficient de détermination $R^2 = 0,9632$.

$$\text{D'après l'équation de la droite la pente est égale à } 1 \times 10^{-5} = \frac{\sigma_0}{\eta_0}$$

Le Coefficient $\eta_0 = 14\ 000$ MPa

2. Deuxième gâchée : 65% SD + 35% SC + Bitume 40/50 modifié au SELENE 120

L'approximation de la branche linéaire est faite de façon à obtenir un coefficient de détermination (R^2) le plus proche possible de 1. Cette approximation est faite à l'aide d'un logiciel de traitement de données et est illustrée sur la figure (V.9).

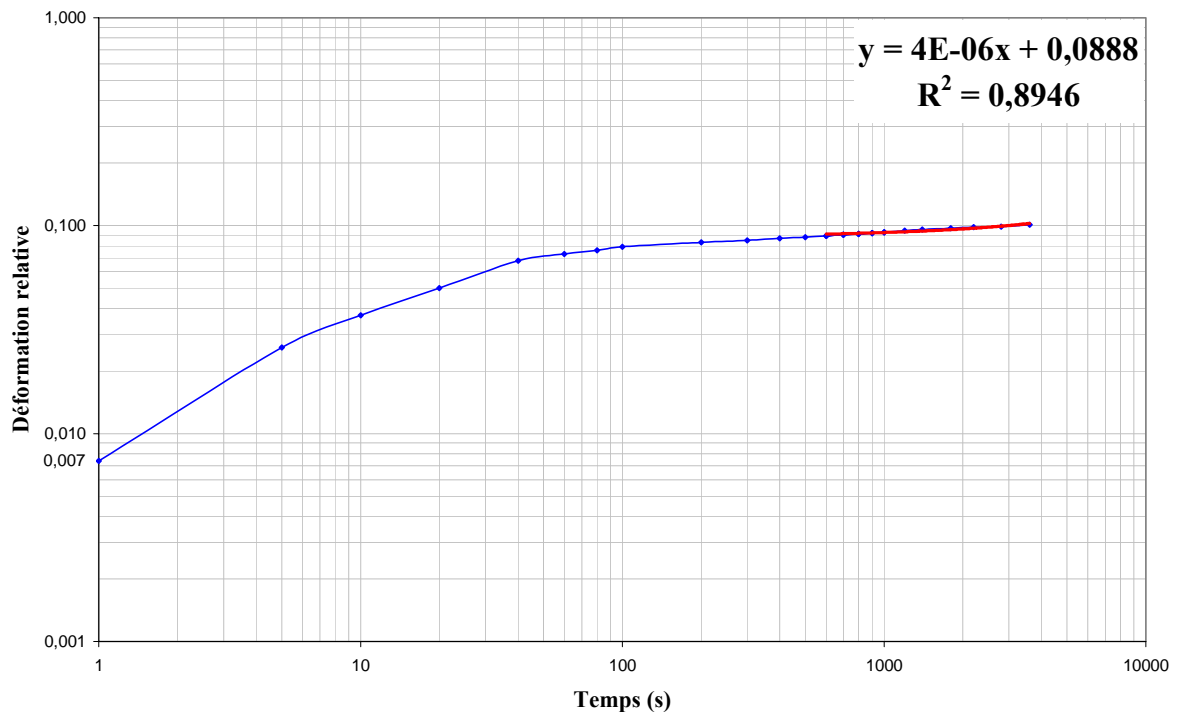


Figure V.9. : « Approximation de la branche linéaire de la courbe de fluage »
(65% SD + 35% SC + bitume 40/50 modifié au SELENE 120)

$R^2 = 0,8946$.

$$\text{D'après l'équation de la droite la pente est égale à } 4 \times 10^{-6} = \frac{\sigma_0}{\eta_0}$$

Le Coefficient $\eta_0 = 35\ 000$ MPa

V.3.3. Application du modèle de kelvin Voigt généralisé

On choisit un modèle de Kelvin Voigt généralisé avec un seul solide de Kelvin Voigt, ce modèle est donné par la figure V.10.

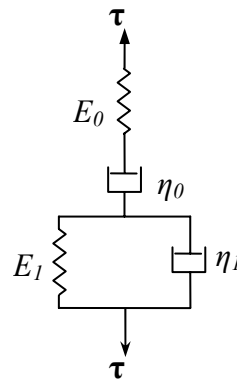


Figure V.10. : « Modèle de Kelvin Voigt appliqué à notre sable bitume »

La fonction fluage de ce modèle est donnée par la relation (II.22) du chapitre II, en prenant $n=1$:

$$f(t) = E_e^0 + \frac{t}{\eta_0} - \sum_{i=1}^n E_i e^{-t/\theta_i} \quad (V.4)$$

$$\text{Avec : } E_e^0 = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \quad (V.5)$$

n : nombre de solide de kelvin voigt.

E_i : modules de déformations des branches du solide de Kelvin Voigt.

η_0 : module de viscosité qu'on vient de calculé à partir de la courbe de fluage.

E_e^0 : déduit à partir de la courbe de fluage propre à l'enrobé, comme suit :

*** Calcul du coefficient E_e^0**

1. Première gâchée : 65% SD + 35% SC + bitume 40/50

La déduction du coefficient E_e^0 est faite par prolongement de la partie linéaire de la courbe de fluage. Sa valeur est donc calculée pour la valeur de la déformation « d » correspondant à l'intersection de cette droite avec l'axe des déformations. (Figure V.10)

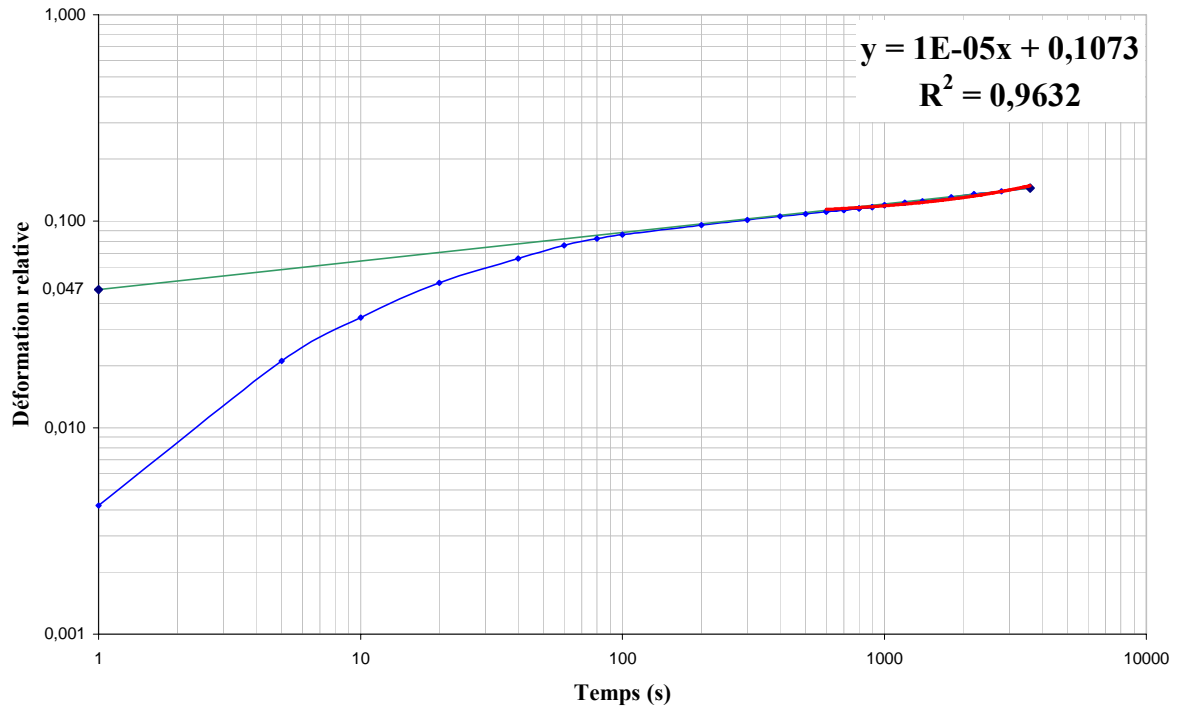


Figure V.11. : « Détermination du coefficient E_e^0 »
(65% SD + 35% SC + bitume 40/50)

Nous relevons la valeur : $d = 0,047$

$$\text{Le coefficient } E_e^0 = \frac{\sigma_0}{d} = \frac{0,14}{0,047 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow E_e^0 = 2979 \text{ MPa}$$

2. Deuxième gâchée : 65% SD + 35% SC + Bitume 40/50 modifié au SELENE 120

De la même façon, nous allons calculer le coefficient E_e^0 pour cette gâchée, pour cela nous avons la figure V.12.

Nous relevons la valeur : $d = 0,063$

$$\text{Le coefficient } E_e^0 = \frac{\sigma_0}{d} = \frac{0,014}{0,063 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow E_e^0 = 2223 \text{ MPa}$$

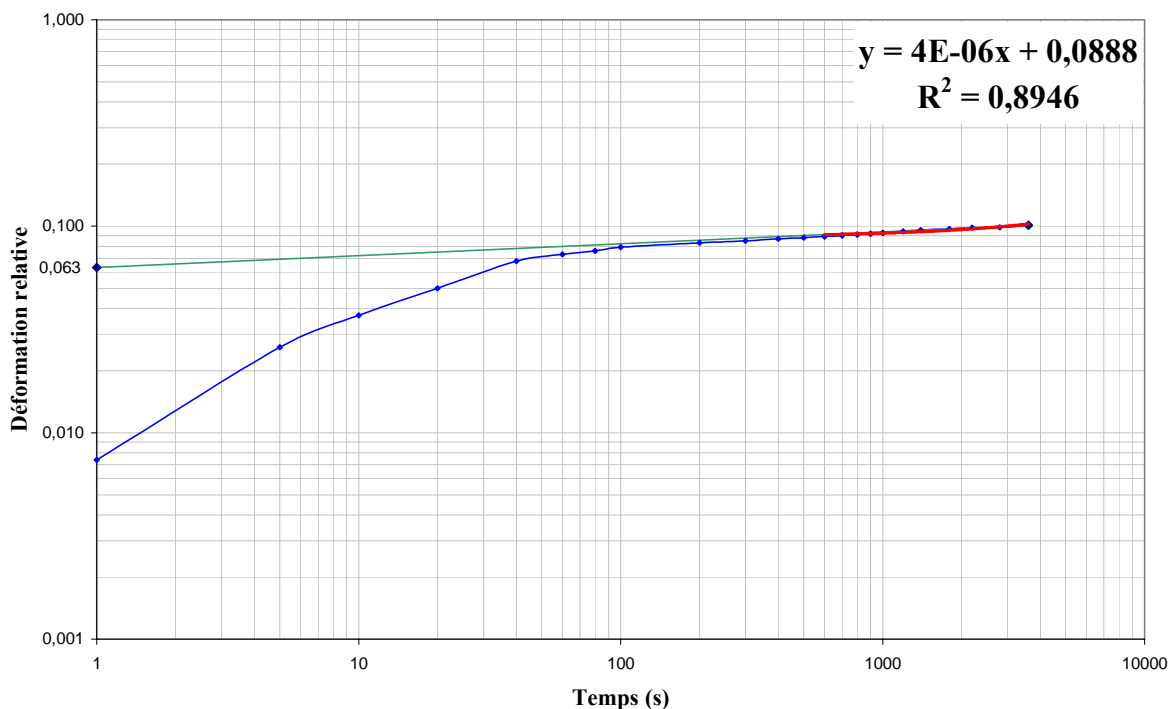


Figure V.12. : « Détermination du coefficient E_e^0 »
(65% SD + 35% SC + bitume 40/50 modifié au SELENE 120)

*** Calcul du coefficient η_1**

Le coefficient η_1 est calculé à partir de la deuxième partie de la courbe de fluage (élasticité retardée). Pour cela il nous faut résoudre l'équation donnée par la fonction de fluage suivante :

$$f(t) = E_1 \times (1 - e^{-t/\theta_1}) \quad (\text{V.6})$$

avec : $E_1 = E_e^0 - E_0$ (V.7)

Pour résoudre cette équation, nous avons procédé par une méthode empirique qui consiste à injecter différentes valeurs de « t » appartenant à la partie de la courbe qui nous intéresse, puis à choisir une valeur moyenne de η_1 . Tableau V.5.

Tableau V.5. : « Résultats du calcul du coefficient η_1 »

		Bitume 40/50		Bitume 40/50 Modifié au Selene 120	
		$E_1 = 917 \text{ MPa}$		$E_1 = 15 \text{ MPa}$	
t (s)	f(t)	η_1 (MPa.s)	f(t)	η_1 (MPa.s)	
5	0,021	0,0011	0,026	0,5749	
10	0,034	0,0020	0,037	0,6135	
20	0,050	0,0037	0,050	0,9059	
40	0,066	0,0105	0,068	2,0832	
η_{1m} (MPa.s)	0,002267		0,6981		

Nous Remarquons que la valeur de η_1 commence à accroître rapidement à partir d'un certain temps ($t = 60s$). Cela est tout à fait normal, car le matériau sort de la phase de l'élasticité retardée pour entrer dans la phase décrite par la troisième partie de la courbe de fluage. D'où nous déduisons que la partie de l'élasticité retardée se fait durant un court laps de temps.

Pour obtenir une valeur de η_1 , nous pouvons prendre une valeur moyenne η_{1m} des valeurs trouvées pour « t » pris entre 5 et 40s.

V.4. CONCLUSION

Nous avons étudié le comportement du sable bitume à travers des essais spécifiques (NAT et fluage statique), et nous avons abouti aux différents modules propres à notre enrobé qui nous permettent de faire un calage du modèle de Kelvin Voigt, et d'obtenir une loi de fluage.

Pour la gâchée confectionnée avec le bitume 40/50, la fonction est :

$$f(t) = 2797 + 7,1 \cdot 10^{-5} \times t - 917 \cdot e^{-0,481 \times t} \quad (V.8)$$

Pour la gâchée confectionnée avec le bitume 40/50 modifié au SELENE 120, la fonction est :

$$f(t) = 2223 + 2,9 \cdot 10^{-5} \times t - 15 \cdot e^{-0,095 \times t} \quad (V.9)$$

Dans le cas où le modèle de Kelvin Voigt généralisé contient plusieurs solides de Kelvin Voigt, Nous proposons la solution suivante :

Les coefficients E_i sont égaux et faciles à déduire par la relation (V.10) du moment que nous pouvons avoir E_e^0 et E_0 à partir du graphe de fluage, les coefficients η_i s'obtiennent par la résolution du système d'équations (V.11).

$$E_1 = E_2 = \dots = E_n = \frac{E_e^0 - E_0}{n} \tag{V.10}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n \times E - E \times \left[e^{-\frac{t_1}{E \cdot \eta_1}} + e^{-\frac{t_1}{E \cdot \eta_2}} + \dots + e^{-\frac{t_1}{E \cdot \eta_n}} \right] = f(t_1) \\ n \times E - E \times \left[e^{-\frac{t_2}{E \cdot \eta_1}} + e^{-\frac{t_2}{E \cdot \eta_2}} + \dots + e^{-\frac{t_2}{E \cdot \eta_n}} \right] = f(t_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ n \times E - E \times \left[e^{-\frac{t_n}{E \cdot \eta_1}} + e^{-\frac{t_n}{E \cdot \eta_2}} + \dots + e^{-\frac{t_n}{E \cdot \eta_n}} \right] = f(t_n) \end{array} \right. \tag{V.11}$$

En remplaçant E et $f(t)$ par leurs valeurs, nous obtiendrons un système d'équation dont les seuls inconnues sont les η_i .

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

A travers ce travail, nous avons confectionné un micro enrobé bitumineux à partir de sable de dune et de sable concassé de deux régions différentes, Biskra et Ouargla, suivant une formulation optimale consistant à utiliser dans un premier lieu 65% de sable de dune et 35% de sable concassé. Une correction de ce mélange a été ensuite effectuée par ajout de fillers calcaires de façon à obtenir un pourcentage total de fines n'excédant pas 15%.

Dans le but d'améliorer les résistances mécaniques de notre enrobé ainsi obtenu nous avons utilisé la dope SELENE 120.

Des essais mécaniques Hubbard – Field et Duriez ont été effectués et les résultats obtenus comparés à des résultats de référence [02] ; ce qui a confirmé les performances de notre sable enrobé nous permettant ainsi de dire qu'il répond aux normes spécifiques aux micro-enrobés.

La finalité de cette étude est l'aboutissement à une modélisation du comportement de notre sable bitume. Pour cela, les caractéristiques rhéologiques permettant de caler notre modèle ont été déterminés à partir des essais de comportement (NAT et fluage statique). Ce calage a permis de proposer ainsi une loi de comportement.

La solution proposée n'est pas unique et pourrait être généralisée par résolution d'un système de n équations à n inconnues proposé.

*Références
Bibliographiques*

Références Bibliographiques

[01] : Jean Jacques CHAUVIN. « Les sables : guide pratique d'utilisation routière », 1987, I.S.T.E.D, Paris, France.

[02] : Lamine GUENNICHE. « Contribution à l'étude du traitement hydrocarboné d'un sable de dune de Hassi Berkine », thèse de Magister, ENP, 2003.

[03] : LCPC. « Essai Duriez LPC : essai de compression simple sur enrobés hydrocarbonés, projet de mode opératoire », 1981, Paris, France.

[04] : LCPC. « Essai Marshall, projet de mode opératoire », 1981, Paris, France.

[05] : G. COURRAZE & J.L. GROSSIORD. « Initiation à la rhéologie », 1991, 2^{ème} édition, Lavoisier, TEC & DOC.

[06] : CTTTP. « Catalogue de dimensionnement des chaussées, Rapport de recherche n°08/08, étude et expérimentation sur les Sand-Asphaltes », Avril 1998, Alger, Algérie.

[07] : LCPC. « Essai à l'ornieur, projet de mode opératoire », 1981, Paris, France.

[08] : CONTROLS. « Appareil et matériel d'essai pour le bâtiment et les travaux publics », 5^{ème} édition, catalogue 2000.

[09] : G. JEUFROY, S. SAUTEREY, P. HERCHKORN : « Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Cours de routes, Couches de roulement », 1985, 2^{ème} tirage, ISBN 2-85978-079-3 (Définition des bitumes)

[10] : 6D Solutions, Fiche technique du SELENE 120.

[11] : LCPC. « Essai de compression simple sur enrobés hydrocarbonés, Essai Duriez LPC, méthode d'essai LPC n°14 », Novembre 1985, Paris, France.

[12] : M. DURIEZ, J. ARRAMBIDE. « Nouveaux traités de matériaux de construction, Tome III, Liants et bétons hydrocarbonés » 1962, 2^{ème} édition, DUNOD, Paris.

[13] : CTTTP, « Catalogue de dimensionnement des chaussées, rapport de recherche n° 06/08, étude expérimentale sur les Sand-Asphaltes », Avril 1997, Alger, Algérie.

Annexes

ANNEXE « A » : LES BITUMES [09]

A.I. Constitution

Le bitume est composé d'hydrocarbures de masse moléculaire élevée appartenant en majorité aux groupes aliphatiques et naphténiques, auxquels s'ajoutent en moindre quantité du soufre, de l'azote et des traces de métaux divers. Les hydrocarbures sont pour l'essentiel saturés et donc peu actifs.

Il se présente comme un système colloïdal dans lequel les micelles sont constituées d'asphaltènes, à forte masse moléculaire, peptisées par des résines, et la phase intermicellaire de maltènes, d'aspect huileux.

Les propriétés des bitumes résultent des proportions et de la composition chimique précise des différents constituants.

Leurs caractéristiques et leur comportement sont déterminés par un certain nombre d'essais dont les principaux sont décrits ci-après et qui permettent de les classer en catégories normalisées.

A.II. Types de bitumes

A.II.1. Bitume naturel

Le bitume existe à l'état naturel sous forme de résidus d'ancien gisement de pétrole dont les éléments les plus légers ont été éliminés au cours du temps par une sorte de distillation naturelle. Ils sont extraits soit à ciel ouvert, les gisements se présentent alors comme de véritables lacs, soit sous forme de filon en sous-sol. Le plus connu de ces bitumes naturels est le bitume de Trinidad qui relève du premier type de gisement.

Les bitumes naturels subissent des opérations de dégazage et de déshydratation avant d'être conditionnés, le plus souvent, en bacs fusibles.

Au total, la production mondiale de bitume reste est très faible.

A.II.2. Asphalte naturel

L'asphalte naturel est constitué par une roche calcaire imprégnée d'hydrocarbures lourds (jusqu'à 20%).

Le bitume naturel d'imprégnation a des caractéristiques particulières du fait de l'exsudation par la roche des fractions non colloïdales.

L'asphalte naturel entre traditionnellement dans la composition de l'asphalte coulé et peut être utilisé comme appoint dans les enrobés auxquels il apporte du liant et des fines.

A.II.3. Bitume de pétrole

C'est de très loin le principal liant hydrocarboné utilisé dans les chaussées.

Les bitumes de pétrole sont fabriqués par distillation de pétrole brut sélectionné. Pour obtenir économiquement les propriétés spécifiques à chaque utilisation, on peut utiliser des procédés de soufflage, de précipitation, de mélange et bien souvent une combinaison de ces procédés.

Toutes ces opérations se font en raffinerie et permettent d'obtenir les différentes catégories de liants en demandées par les ingénieurs routiers.

A.III. Principales caractéristiques des bitumes routiers

A.III.1. Pénétrabilité

La pénétrabilité à 25° C est l'une des bases de classification des bitumes routiers. Les spécifications correspondantes se traduisent par deux nombres correspondant aux seuils inférieur et supérieur de pénétrabilité de la classe considérée.

Les chiffres qui vont suivre caractérisent cinq classes de bitumes routiers qui sont dans le sens des duretés croissantes : 180-220, 80-100, 60-70, 40-50, 20-30.

Pour mieux définir un bitume, on peut être amené à effectuer des essais à plusieurs températures, ce qui permet de tracer une courbe de pénétrabilité en fonction de la température, très utiles pour apprécier la susceptibilité thermique du bitume.

A.III.2. Point de ramollissement et anneau

Les bitumes ne sont pas des corps purs, ils n'ont pas de point de fusion franc. Leur consistance décroît quand la température s'élève. On a donc dû fixer arbitrairement un repère de changement de consistance, c'est le point de ramollissement appelé également température bille et anneau (TBA).

Comme pour la pénétrabilité, on donne pour chaque classe de bitume les limites inférieure et supérieure entre lesquelles doivent se situer les valeurs de TBA.

A.IV. Classification des bitumes routiers

La classification se fait en prenant compte du vieillissement que provoque l'élévation de température que subit le bitume au cours de l'enrobage :

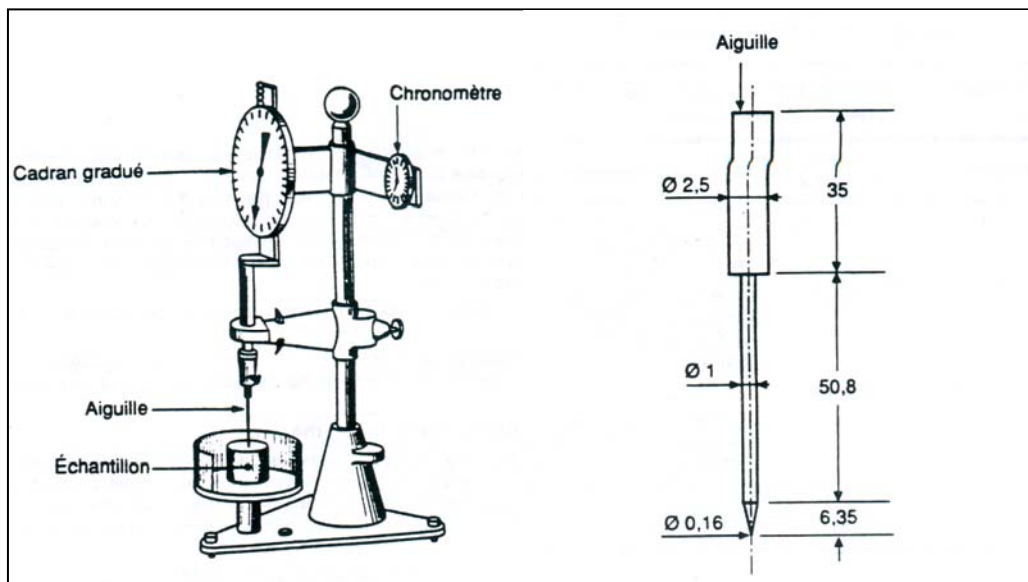
- Les bitumes 180-220 sont essentiellement utilisés pour la fabrication des émulsions et la réalisation d'enrobés fins mis en œuvre en couches minces.

- Les bitumes 80-100, 60-70 et 40-50 sont également utilisés pour la fabrication des émulsions et sont surtout destinés à la confection des enrobés denses, des bétons bitumineux et des graves bitumes.
- Les bitumes 20-30 sont principalement utilisés pour la confection des couches d'assises en sable bitume. Dans le cas de sables de concassage, on peut également employer le bitume 40-50.

A.V. Les essais effectués sur les bitumes

A.V.1. Essai de pénétrabilité des bitumes

Cet essai consiste à appliquer une charge de 100 g pendant 5 secondes sur une aiguille normalisée de 1 mm de diamètre afin de l'enfoncer dans un bitume à une température de 25°C, et on calcule la profondeur d'enfoncement exprimée en dixième de millimètre. (Figure A.1).

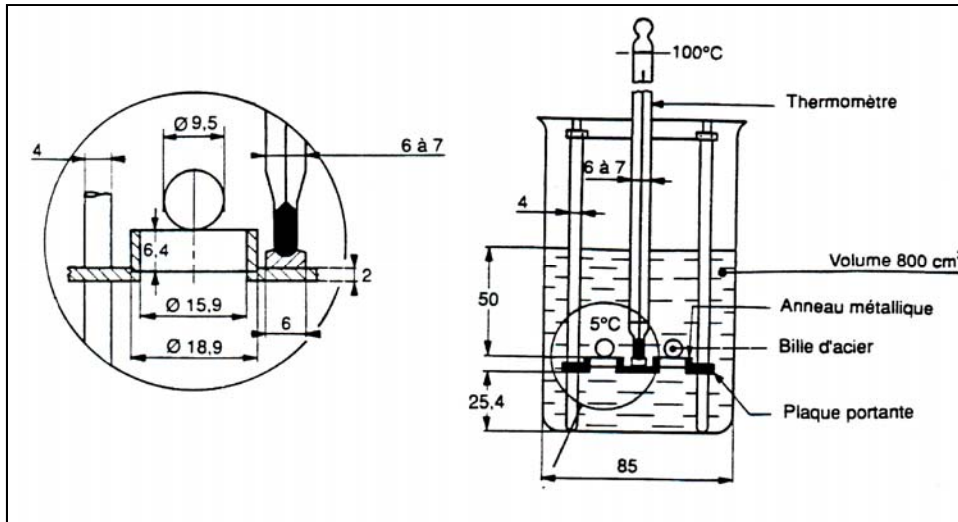


« Figure A.1. – Mesure de la pénétrabilité »

A.V.2. Essai de ramollissement des bitumes

L'essai est réalisé au moyen d'une bille d'acier de 3,5 g placée sur un disque de bitume coulé dans un anneau de 1,9 mm de diamètre. (Figure A.2.)

L'ensemble est placé dans un bain d'eau chauffé à vitesse constante. Sous l'effet du poids de la bille et de la température, le bitume flue. Quand la poche ainsi créée touche le plateau inférieur de l'équipage, on note la température atteinte qui caractérise le point de ramollissement (TBA).



« Figure A.2. Appareil bille et anneau pour le point de ramollissement du bitume. »

A.V.3. Essai pour la classification des bitumes

On a dit que la classification est influencée par l'élévation de la température qui peut être simulée par l'essai RTFOT « Rolling Tin-Film Oven Test », cet essai consiste à soumettre un échantillon de bitume à la température de 163° C en étuve ventilée pendant 75min ; on mesure ensuite la température bille et anneau et la pénétrabilité du bitume. Une évolution importante de ces deux grandeurs après l'essai RTFOT traduit une sensibilité excessive au vieillissement.

A.VI. Les bitumes fluidifiés et fluxés

Les bitumes sont très visqueux à température ambiante. On peut les rendre suffisamment fluides par simple chauffage pour permettre l'enrobage des granulats, des enrobés et des graves-bitumes.

Par contre, lorsqu'on les utilise en répandage pour les enduits superficiels, plusieurs difficultés apparaissent, liées au maintien de températures élevées dans les répandouses, au refroidissement trop rapide du film de liant répandu avant gravillonnage (mouillage défectueux) et aux difficultés de mise en œuvre.

Deux types de solutions ont été mises au point pour abaisser la viscosité à la mise en œuvre, tout en la retrouvant avant la mise en service :

- L'utilisation de diluants.
- La mise en émulsion dans l'eau.

Les diluants sont des intermédiaires de mise en œuvre qui permettent de travailler dans des gammes de températures raisonnables tout en facilitant le mouillage. Après application, le diluant doit disparaître pour laisser en place le bitume d'origine. Cette évaporation est plus ou moins complète et demande des durées très variables. Suivant le type de diluant utilisé, on distingue les bitumes fluidifiés et les bitumes fluxés.

A.VI.1 Les bitumes fluidifiés

Le diluant est une fraction légère issue du pétrole.

Dans de nombreux pays, ils sont fabriqués sous le nom de cut-back et on les distingue par leur vitesse de séchage, elle-même fonction du fluidifiant (essence, kérosène ou gas-oil).

On distingue traditionnellement les catégories suivantes en fonction de la vitesse de séchage :

- lente (SC, de l'anglais slow-curing).
- Moyenne (MC, medium-curing).
- Rapide (RC, rapid-curing).

La fabrication des bitumes fluidifiés se fait généralement en raffinerie, pour des raisons de sécurité et d'homogénéité du produit obtenu.

Ils n'ont pas une consistance suffisante pour pouvoir être soumis, comme les bitumes, à des essais de pénétrabilité à l'aiguille.

A.VI.2 Les bitumes fluxés

Ils sont obtenus par mélange de bitume et d'huile de houille à faible volatilité provenant de la distillation du goudron brut. Le mélange est plus fluide que le bitume d'origine et son adhésivité sur les granulats est améliorée.

Contrairement au kérosène des bitumes fluidifiés, une partie des huiles de fluxage reste associée au bitume de base qui se trouve ainsi plastifié.

Les bitumes fluxés sont fabriqués par les entreprises routières. La fabrication s'effectue soit en discontinu, par gâchées successives dans des bacs munis d'un système de malaxage, soit en continu dans des unités de malaxage en ligne, le choix des huiles de houille permet d'ajuster la durée de séchage du produit obtenu.

A.VI.3. Principales caractéristiques des bitumes fluidifiés et fluxés

Outre les essais qui permettent de caractériser le bitume entrant dans la composition du produit, les bitumes fluidifiés et fluxés sont caractérisés par un certain nombre d'essais spécifiques, adaptés à leurs particularités. Ce sont les essais suivants :

- Distillation fractionnée : réalisée dans les conditions normalisées, elle permet de déterminer la fraction distillant au dessous des températures de 190, 225, 315 et 360° C.
- Pseudo viscosité : elle caractérise de façon indirecte la viscosité du produit.

Elle est déterminée par le viscosimètre STV (standard tar viscosimetre) nommé antérieurement BRTA (British road tar association). Cet appareil permet de déterminer la vitesse d'écoulement du produit à travers deux orifices de 10 mm et 4 mm respectivement tout en le maintenant à une température constante. L'orifice de 10 mm est utilisé si la pseudo viscosité est égale ou supérieure à 10 s. si la pseudo viscosité à 25° C dépasse 600 s la température d'essai est portée à 40° C. l'orifice de 4 mm est utilisée à 25° C pour les bitumes fluidifiés dont la pseudo viscosité à l'orifice de 10 mm est inférieure à 10 s.

A.VI.4. Classification des bitumes fluidifiés et fluxés

Les bitumes fluidifiés 0-1 sont utilisés pour l'imprégnation des sols relativement compacts et les bitumes fluidifiés 10-15 pour celle des sols plus poreux.

Soulignons que ces deux classes comportent deux sous classes en fonction de la position du point d'éclair par rapport aux seuils de 21 et 55 ° C.

On utilise les bitumes fluidifiés et les bitumes fluxés 150-250 pour les enrobages à froid, les emplois partiels différés et les enduits superficiels sur route à trafic faible en début et fin de saison.

Les bitumes fluidifié et fluxés 400-600 sont réservés de préférence pour les enrobés et enduits superficiels. Ces enduits peuvent être également exécutés sur routes moyennement circulées avec des bitumes 800-1200, au prix de certaines précautions.

Le bitume fluidifiés 800-1200 et les bitumes fluxés 1200-1600 et 1600-2400 sont utilisés pour les enduits superficiels sur routes à forte circulation.

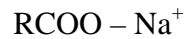
A.VII. Emulsion de bitume

Au lieu de le fluidifier ou de le fluxer, on peut aussi transformer le bitume en produit fluide en l'émulsionnant, c'est-à-dire en le dispersant dans l'eau sous forme de fines gouttelettes de quelques micromètres. Cette émulsion est stabilisée par l'emploi d'un corps organique à longue chaîne qui :

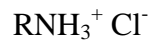
- abaisse la tension inter faciale au bitume.
- Se fixe à la surface des micelles de bitume en les chargeant électroniquement en créant entre elles un effet de répulsion qui assure leur stabilité.

❖ Les émulsions sont de deux types :

- les émulsions anioniques dans lesquels le radical lipophile c'est à dire celui qui se fixe sur la gouttelette de bitume est négatif. Les gouttelettes sont donc chargées négativement. Les émulsifiants correspondant sont des bases de type :



- Les émulsions cationiques dans lesquels le radical lipophile est positif. Les émulsifiant est dans ce cas un acide du type :



Les émulsions se rompent au contact des granulats et cela pour diverses raisons.

D'une part les charges électrostatiques des gouttelettes de bitume sont neutralisées par les charges contraires du minéral, d'autre part, il y a toujours absorption d'eau par la terre.

Les émulsions se séparent alors en deux phases : le bitume qui adhère au granulats et l'eau qui s'évacue et s'évapore.

- Les émulsions anioniques seront mieux avec les matériaux basiques tels que les calcaires.
- Les émulsions les plus utilisées actuellement sont des émulsions cationiques, qui permettent d'obtenir la rupture sur des matériaux aussi bien acides que basiques.
- Le liant de base peut être soit du bitume pur soit du bitume fluxé ou amélioré.
- Des procédés ont été mis au point pour maîtriser la rupture des émulsions utilisées pour les enduits superficiels. Ils permettent de les réaliser dans des conditions telles que les procédés traditionnels conduiraient à des échecs, en raison, soit de la faible température, soit de l'humidité du support. Ce procédé consiste, soit à pulvériser en même temps que le répandage de l'émulsion un agent de rupture, soit à utiliser des émulsifiants spéciaux.

A.VII.1. Fabrication

Les constituants de l'émulsion (eau, bitume préalablement réchauffé et émulsifiant) sont introduits par des pompes doseuses entre le stator et rotor d'une turbine tournant à grande vitesse. Les produits sont laminés mélangés et émulsifiés par le cisaillement ainsi obtenu.

Ces opérations se font dans des usines de fabrication. Les émulsions produites sont stockées dans des cuves en attendant leur livraison.

A.VII.2. Principales caractéristiques

Les émulsions sont caractérisées par un certain nombre d'essais :

- Teneur en eau, déterminée par distillation dans des conditions normalisées et pH de la phase aqueuse.
- Indice de rupture, que l'on mesure en introduisant régulièrement des fines siliceuses normalisées dans 100 g d'émulsion. L'indice de rupture s'exprime par le poids de fines qui conduit à l'agglomération du bitume de l'émulsion.
- Pseudo-viscosité appréciée soit avec le viscosimètre STV déjà cité, soit avec le pseudo-viscosimètre Engler dont le principe est de mesurer le temps d'écoulement de 200 cm³ d'émulsion à 20° C et à le diviser par le temps d'écoulement de 200 cm³ d'eau.

A.VII.3. Utilisation

Du point de vue de la vitesse de rupture, on utilise :

- les émulsions à rupture rapide pour les enduits et les emplois partiels au point à temps.
- Des émulsions à rupture lente pour les enrobés denses à froid et semi denses, les graves émulsions, les matériaux destinés aux coulis bitumineux, les granulats prè-enrobés, les retraitements, stabilisation et imprégnation.

ANNEXE « B » : ESSAI DE DE COMPRESSION SIMPLE SUR ENROBES HYDROCARBONES (Essai Duriez LPC) [11]

B.I. Objet et domaine d'application

B.I.1. Définition et but de l'essai

L'essai de compression simple type LPC a pour but de déterminer, pour un compactage donné, la résistance à la compression d'une éprouvette d'enrobé de poids et de section déterminés.

Il permet également de définir la teneur à l'eau de l'enrobé par le rapport des résistances à la compression après et avant immersion de l'éprouvette dans un bain d'eau thermostatique.

Cet essai, applicable à tous les enrobés à base de bitume, est effectué :

- Soit avec un moule de 8 cm de diamètre, dit « moule normal » destiné aux matériaux ne comportant pas d'éléments égaux ou supérieurs à 14 mm ;
- Soit avec un moule de 8 cm de diamètre, dit « moule dilaté » destiné aux matériaux comportant des éléments égaux ou supérieurs à 14 mm et inférieurs à 31,5 mm.

Cet essai est communément appelé « Essai Duriez LPC ».

B.I.2. Principe de la méthode à chaud

➤ Confection

(jour J)

➤ Maturation

1^{er} jour : conservation à sec à température ambiante (J+1)

➤ Conservation

7 jours : conservation à sec à 0 – 18 ou 50° C – hygrométrie constante à 50%
pour 18 à 50° C (J+8)

Ou

7 jours : immersion – température donnée : 18 ou 50° C (J+8)

➤ Compression

L'essai est effectué à la vitesse théorique de 1 mm/s, 8 jours après confection
des éprouvettes (J+8)

Soit R la résistance à la compression après conservation à sec.

Soit r la résistance à la compression après conservation avec immersion.

Le rapport $\frac{r}{R}$ exprime la tenue à l'eau de l'enrobé.

B.II. Matériel utilisé dans la formulation à chaud

B.II.1. Matériel spécifique à chaque essai

Presse

La multipresse de compactage LPC, si l'on dispose pas de cette presse, il faut utiliser une presse permettant de maintenir une charge de 180 kN pendant 5mn. Dans ce cas, on aura besoin également de deux pistons et un système de jeu de cales permettant le remplissage des moules et le compactage par double effet.

Moules LPC

Pour les enrobés inférieurs à 14mm, il faut un minimum de 12 moules de compactage composés d'un cylindre creux de 80 mm \pm 0,1 (diamètre intérieur) et de 195 mm de hauteur, muni d'une plaque de base et d'une pastille supérieure ayant chacune 27,5 mm d'épaisseur.

Pour les enrobés supérieurs ou égaux à 14 mm, il faut un minimum de 10 moules de compactage composés d'un cylindre creux de 120 mm \pm 0,1 (diamètre intérieur) et de 275mm de hauteur, muni d'une plaque de base et d'une pastille supérieure de 27,5 d'épaisseur chacune.

Disques

Une série de disques en carton très rigides de 3 mm d'épaisseur, environ (3 kg/m²).

Deux dimensions selon les diamètres de l'éprouvette : 100×100 et 150×150.

B.II.2. Matériel non spécifique

Appareillage commun aux deux essais

- Une balance de précision moyenne, de portée \geq 5kg et d'échelon 1 g ;
- Une balance hydrostatique de précision fine, de portée \geq 3,5 kg et d'échelon 0,1g ;
- Une étuve pour la mise en température et le séchage des granulats et le préchauffage du bitume, ayant la possibilité d'une gamme de température de 50 à 250° C \pm 1° C, à vide ;
- Un entonnoir métallique ;
- Deux mains métalliques pour la manutention des mélanges ;
- Un malaxeur mécanique, équipé de deux cuves ;
- Un couteau de vitrier pour le nettoyage des pales du malaxeur ;
- Un pied à coulisse au 1/10 ;
- Une armoire à température et humidité réglable capable d'assurer dans le volume utile une température de 18° C \pm 0,5° C et une humidité de 50% \pm 5% ;
- Une armoire à température réglable capable d'assurer dans le volume utile une température de 0° C \pm 0,5° C ;
- Un bain thermostatique capable d'assurer une température de 18° C \pm 0,5° C ;
- Un bain thermostatique capable d'assurer une température de 50° C \pm 0,5° C ;

- Une presse à avancement contrôlé réglée à la vitesse de 1 mm/s, équipée d'un enregistreur et d'un peson permettant de mesurer l'effort en cours d'essai ;
- Un thermomètre métallique fréquemment calibré aux valeurs utiles.

Produits

- Paraffine de masse volumique réelle connue.

Matériel spécifique aux essais à chaud

- Un récipient métallique (1litre) pour le liant ;
- Un thermomètre métallique pour le contrôle de la température du liant ;
- Deux paires de gants de cuir ignifugés, 5 doigts, avec manchettes de 40 cm ;
- Oléate de soude glycéринé ;
- Une cloche à vide double entrée, équipée d'une pompe à moteur, pompe à vide. 2000 l/h, vide limite : à,002 mmHg, 1/8 ch, 1400 tr/mn.

B.III. Préparation du matériau

B.III.1. Préparation des prises d'essais

Chacun des granulats entrant dans la composition de l'enrobé est relevé à partir de lots homogénéisés, selon la norme NF-P 186553 "préparation d'un échantillon pour essai".

La quantité prélevée doit permettre de confectionner :

- Une gâchée de 13kg de granulats dans le cas d'un enrobé <14mm, ce qui correspond à 12 éprouvettes ;
- Ou deux gâchées comprenant 19kg chacune dans le cas d'un enrobé \geq 14mm, ce qui correspond à s fois 5 éprouvettes.

Les pesées de chaque classe granulaire sont lues au gramme près.

Essai à chaud

Au moment du malaxage, les températures des granulats, du bitume et de la cuve du malaxeur et des moules sont définies comme suit :

- | | |
|----------------------------------|--------|
| ➤ Enrobé à base de bitume 80/100 | 140° C |
| ➤ Enrobé à base de bitume 60/70 | 150° C |
| ➤ Enrobé à base de bitume 40/50 | 160° C |
| ➤ Enrobé à base de bitume 20/30 | 180° C |

Tous les granulats prélevés et pesés, y compris les fines, sont versés doucement dans la cuve du malaxeur de préférence, sinon, dans un récipient de capacité analogue. L'ensemble devra séjourner 12 heures minimum à la température de malaxage définie plus haut. Les différents matériels cuves de malaxeur, moules de compactage, doivent être entreposés à la même température, ce qui nécessite un séjour de 3 heures minimum à l'étuve.

Préparation du liant

On prépare également dans un récipient métallique la quantité de bitume nécessaire à l'enrobage de la gâchée, plus une marge de sécurité de 50g environ. Le chauffage du liant s'effectue en deux phases :

- a) ramollissement à l'étuve, à la température de malaxage, pendant une demi-heure environ ;
- b) mie en température sur plaque chauffante à gaz. Pour éviter tout risque de surchauffage, et afin de permettre une homogénéisation de la température, le bitume est agité constamment à l'aide d'un thermomètre métallique. Lorsque la température du liant est à 10° C en dessous de la température requise, le chauffage est diminué afin de ne pas dépasser cette température.

B.III.2. Malaxage

La cuve contenant les granulats est centrée sur le malaxeur mécanique, réglé sur une vitesse moyenne (environ 32 tr/mn). On actionne le malaxeur « à blanc » quelques tours, afin de mélanger les différents granulats. On verse la quantité de liant nécessaire par différence de pesé du récipient contenant le liant. Si un excès de liant est introduit. Il ne devra pas dépasser 1% du liant, sinon la gâchée devra être rejetée.

La durée de malaxage n'est pas imposée : elle est appréciée visuellement par le technicien jusqu'à homogénéisation correcte. Elle est généralement de l'ordre de la minute.

Après malaxage, les palettes du malaxeur sont grattées à l'aide d'un couteau de vitrier. Tout l'enrobé doit être alors remélangé au moyen d'une main métallique qui servira aux prélèvements.

B.III.3. Remplissage des moules

Enfin de malaxage, les 12 moules d'essais (enrobé <14mm) ou les 5 moules d'essai (enrobé ≥14mm) sont sortis de l'étuve dans l'ordre 1, 2, 3, ... jusqu'à 12 ou 5, qui sera l'ordre de remplissage et de démoulage.

Pesée : avant chaque pesée, le technicien mélange la gâchée à l'aide de sa pelle, afin d'éviter toute ségrégation.

On pèse alors des prélèvements de :

- 1 kg ± 1 g dans le cas des enrobés < 14 mm ;
- 3,5 kg ± 1,5 g dans le cas des enrobés ≥ 14 mm.

Cette précision est particulièrement nécessaire lorsqu'on dispose d'une multipresse ; en effet, la hauteur des éprouvettes étant identique, une différence de poids entre éprouvettes entraîne des différences de compacité.

Remplissage : le prélèvement est introduit en une seule fois dans le moule très légèrement graissé au moyen d'un pinceau enduit d'oléate de soude glycérine. Les 12 ou 5 prélèvements sont introduits successivement dans l'ordre de remplissage. Les moules pleins sont ensuite introduits dans une étuve à la température du malaxage, et doivent y séjourner ½ heure.

B.IV. Conditions d'essai

B.IV.1. Confection des éprouvettes à chaud

Les moules repérés de 1 à 12 ou de 1 à 5 sont sortis de l'étuve

La pastille supérieure est placée sur la surface de l'enrobé. Les moules sont alors déposés sur le plateau porte-moule de la presse, la montée et le positionnement se font automatiquement.

Pression appliquée :

- Pour les enrobés < 14 mm : 60 kN
- Pour les enrobés \geq 14 mm : 180 kN

La pression est maintenue pendant 5 minutes. Au bout de ce temps, la mise en pression est interrompue ; le plateau revient à sa position initiale.

On relève la pastille supérieure après compactage.

Démoulage : Les éprouvettes sont démoulées après complet refroidissement – durée minimale : 4 heures – et placées sur une surface plane à température ambiante, afin d'éviter toute déformation.

Remarque : Il est nécessaire que la fabrication des éprouvettes soit assurée par deux techniciens, afin de procéder le plus rapidement possible aux manipulations et d'éviter au maximum les déperditions de température.

B.IV.2. Essais préliminaires (à chaud)

Après démoulage, les éprouvettes soigneusement numérotées sont pesées à 1g près, soit P. on procède ensuite aux mesures géométriques pour contrôler la fabrication des éprouvettes. Elles sont mesurées au moyen d'un pied à coulisses au 1/10 mm, à raison de 3 mesures pour le diamètre et de 3 mesures pour les hauteurs, ces mesures devant être répartie sur la hauteur et la périphérie de l'éprouvette.

On calcul ensuite la masse volumique apparente MVA à partir des mesures géométriques. Les résultats des masses volumiques apparentes doivent être tels que la différence ne doit pas excéder $\pm 0,02$ par rapport à la moyenne. Si une différence plus importante apparaît, il est préférable de rejeter soit l'éprouvette, soit la série complète.

Essai Commun – Calcul de la masse volumique apparente au moyen d'une balance hydrostatique (MVA) : afin d'effectuer les calculs ultérieurs, on détermine la masse volumique apparente au moyen de la balance hydrostatique sur deux éprouvettes. Ces deux éprouvettes sont prélevées au hasard dans la série de 12, dans le cas des enrobés < 14mm, et à raison d'une par série de 5, dans le cas des enrobés \geq 14mm.

La pesée dans l'eau se fait après paraffinage de l'éprouvette, la paraffine étant à 70° C. on doit vérifier la densité de la paraffine.

B.IV.3. Maturation des éprouvettes

Durant les premières 24 heures après la fabrication des éprouvettes, celles-ci conservées à température ambiante sur une surface plane.

Distribution des éprouvettes (commune aux deux essais)

Pour les enrobés < 14 mm, 5 éprouvettes sont prélevées au hasard pour la conservation à sec ; sur les 7 éprouvettes restantes, 5 sont destinée à la conservation avec immersion, ceci pour une température donnée, et 2 à la mesure de la masse volumique apparente par la méthode de la balance hydrostatique.

Pour les enrobés ≥ 14 mm, 2 éprouvettes sont prélevée au hasard dans chacune des deux séries pour conservation à sec ; sur les 6 éprouvettes restantes, 4 sont destinées à la conservation avec immersion, ceci pour une température donnée, et 2 à raison d'une par série, sont préservées à la mesure de la masse volumique apparente par la méthode de la balance hydrostatique.

Conservation des éprouvettes

Conservation à sec : J étant le jour de confection des éprouvettes, on commence la conservation au jour (J+1)

- Essai à 18° C : les éprouvettes sont placées sur un plateau de l'enceint de conservation, réglée à 18° C \pm 0,5° C et à 50% \pm 5% d'humidité relative. Cette conservation dure 7 jours.
- Essai à 50° C : les éprouvettes sont placées sur un plateau de l'enceint de conservation, réglée à 18° C \pm 0,5° C et à 50% d'humidité relative. Cette conservation dure 6 jours. Les éprouvettes sont ensuite placées dans une enceinte réglée à 50° C \pm 0,5° C et à 50% \pm 5% d'humidité relative jusqu'au lendemain.
- Essai à 0° C : les éprouvettes sont placées sur un plateau de l'enceint de conservation, réglée à 0° C \pm 0,5° C. Cette conservation dure 7 jours.

Quelle que soit la température de l'essai (18° C ou 50° C), les éprouvettes sont soumise à un traitement de dégazage, 24 heures après confection, les éprouvettes sont introduites dans une cloche à vide après avoir été lavée rapidement afin d'enlever l'oléate de soude glycerinée. La cloche doit être absolument hermétique. On raccorde une des deux entrées avec une pompe à moteur et on assure une pression résiduelle de 350 mmHg pendant 1 heure. Après ce premier temps, on relie la deuxième entrée de la cloche à vide à un robinet d'eau et, tout en maintenant la pression résiduelle de 350 mmHg, on introduit de l'eau jusqu'à immersion totale de éprouvettes.

On maintient ainsi les éprouvettes immergées, sous pression réduite, pendant deux heures. Au bout de ce temps, on arrête le maintien de la pression résiduelle, on ouvre la cloche, on sort les éprouvettes que l'on essuie légèrement en les roulant sur un chiffon humide, et on les pèse ensuite à $\pm 0,5$ g près, soit P_{j+1} .

- Essai à 18° C : après la pesée précédente, les éprouvettes sont introduites dans un bain thermostatique, réglé à 18° C \pm 0,5° C. Cette conservation dure 7 jours.
- Essai à 50° C : après la pesée précédente, les éprouvettes sont introduites dans un bain thermostatique, réglé à 18° C \pm 0,5° C. Cette conservation dure 6 jours. Pendant les dernières 24 heures de conservation, les éprouvettes sont placées dans un bain thermostatique à 50° C \pm 0,5° C.

Quelle que soit la température de l'essai, les éprouvettes sont pesées après essuyage rapide sur un chiffon humide avant l'essai au bout de 2 (ou 4) jours, soit P_{j+3} (ou P_{j+5}) et 7 jours d'immersion, soit P_{j+8} .

Pour l'essai à 50° C, il est recommandé de remettre les éprouvettes dans le bain thermostatique à 50° C au moins 1 heure avant l'essai, afin que l'éprouvette soit à la température requise.

B.IV.4. Essai de compression simple (à chaud)

Au jour j+8, les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression, qu'elles aient subi une conservation à sec de 7 jours, ou une conservation avec immersion de 7 jours.

Les éprouvettes sont sorties une à une des enceintes de conservation.

Les éprouvettes sont placées entre le plateau supérieur de la presse et le peson relié à l'enregistreur dont la sensibilité est choisie en fonction de la charge de rupture des éprouvettes.

On interpose entre le plateau, le peson et l'éprouvette deux disques en carton.

On déclenche le mécanisme d'avancement de la presse. La vitesse du plateau est réglée à 1 mm/s. on enregistre la courbe d'effort en fonction du temps.

On arrête l'essai lorsque la courbe atteint son maximum ; ce maximum correspond à la résistance à la compression simple à la vitesse d'avancement de 1 mm/s. cette résistance exprimée en 10^5 Pa. Elle s'obtient en divisant l'effort à la rupture exprimé en daN par la surface de l'éprouvette, soit 50 cm² dans le cas des enrobés < 14 mm, soit 113 cm² dans le cas des enrobés ≥ 14 mm.

B.V. Exploitation des résultats.

La résistance à la compression simple à une température donnée, avec ou sans immersion, est exprimée en 10^5 Pa et représente la moyenne de quatre ou cinq mesures suivant le diamètre des moules employés.

On établit également le rapport à la résistance avec immersion : r, à la résistance à sec : R, le rapport $\frac{r}{R}$ est exprimé en 0,01 près.

Si :	P :	pois de l'éprouvette après démoulage
	P _{j+1} :	pois de l'éprouvette après traitement par le vide
	P _{j+3 ou 5} :	pois de l'éprouvette après 2 ou 4 jours d'immersion
	P _{j+8} :	pois de l'éprouvette après 7 jours d'immersion

On a :

- Pourcentage d'imbibition :

- Après 1 heure sous vide et 2 heures sous vide dans l'eau,

$$W_{j+1} = \left(\frac{P_{j+1} - P}{P} \right) \times 100$$

- Après 2 ou 4 jours d'immersion,

$$W_{j+3} \text{ ou } W_{j+5} = \left(\frac{P_{j+3 \text{ ou } 5} - P}{P} \right) \times 100$$

- Après 7 jours d'immersion,

$$W_{j+8} = \left(\frac{P_{j+8} - P}{P} \right) \times 100$$

Calcul :

- Masse volumique apparente obtenue par des mesures effectuées avant l'essai, moyenne obtenue à partir de deux éprouvettes, soit MVA ;
- Masse volumique apparente obtenue par la méthode de la balance hydrostatique, moyenne obtenue à partir de l'ensemble des éprouvettes, soit MVA ;
- Masse volumique réelle des granulats, compte tenu de la masse volumique réelle de chacun d'entre eux et de leur proportions dans le mélange des granulats, soit MVRg ;

En appelant P_1, P_2, P_n les pourcentages en masse des différents granulats et $MVRg_1, MVRg_2, MVRg_n$, les masses volumiques réelles correspondantes, on a :

$$MVRg = \frac{100}{\frac{P_1}{MVRg_1} + \frac{P_2}{MVRg_2} + \frac{P_n}{MVRg_n}}$$

- Masse volumique réelle de l'enrobé, compte tenu de la masse volumique réelle des granulats et de la masse volumique réelle du liant, ainsi que de leur proportion dans l'enrobé, soit MVR

En appelant P_1 le pourcentage en masse du liant et MVR_1 sa masse volumique réelle, on a :

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

- Compacité de l'éprouvette, soit c :

$$C = \frac{MVA}{MVR} \times 100$$

- Pourcentage de vide résiduels, soit V_R :

$$V_R = 100 - C$$

- Masse volumique apparente du granulat dans l'éprouvette, appelée également « densité sèche », soit MVAg :

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

P_1 étant le pourcentage en poids du liant en négligeant le poids de l'air des vides.

- Pourcentage des vides occupés par l'air et le liant, soit V_1 :

$$V_1 = \frac{V - V_R}{V} \times 100$$

**ANNEXE « C » MODE OPERATOIRE DE L'ESSAI MARSHALL (matériaux enrobés : béton bitumineux et enrobé denses)
ESSAI DE STABILITE MARSHALL [12]**

C.I. OBJET

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

C.I.1. Etude préalable

Les essais Marshall donnent des indications de qualité globale de l'enrobé ou du béton dont le choix et le dosage des constituants ont fait l'objet d'une série préliminaire d'essais :

Essai de qualité des agrégats (Deval ou Amédée Mannheim, équivalent de sable, teneur en argile et fillers, analyses granulométriques, etc)

L'essai Marshall a donc en partie le même objet que l'essai Duriez, dont il diffère cependant par deux caractéristiques importantes :

- Température de l'essai, qui est de 60°C au lieu de 18°C dans l'essai Duriez ;
- Mode d'application de la contrainte, qui est diamétrale dans l'essai Marshall et axiale dans l'essai Duriez.

On constatera en fait que les renseignements fournis par les deux essais ne sont pas obligatoirement en corrélation. Il est recommandé de compléter l'étude Duriez par une étude Marshall notamment dans le cas des mélanges présentant un faible frottement interne.

Il faut également noter que la forte dispersion des résultats de l'essai Marshall incite à le considérer comme un essai complémentaires, et non comme l'essai fondamental des études de matériaux enrobés.

Une application intéressante de l'essai Marshall consiste à étudier l'évolution des caractéristiques des mélanges enrobés mesurées dans cet essai, notamment la stabilité et la densité « sèche » de l'agrégat en fonction des variations de la teneur en liant. On admet pour de pareille études, que le compactage des éprouvette Marshall, plus énergique que celui de l'éprouvette Duriez, est analogue par ses effets à celui que subissent les matériaux enrobés sur la route, et que, par conséquent, les maxima observés (correspondant d'ailleurs à des teneurs

en liant variables selon la caractéristique étudiée) donnent une indication sur la teneur en liant optimal à choisir pour le matériau enrobé.

Remarque

Nous signalons que la compacité de l'« essai Duriez » a été choisie pour donner la compacité exacte du revêtement routier correctement cylindré ou compacté dans les travaux de chantier, juste au moment où le revêtement est livré à la circulation. La compacité Marshall est celle qui correspond à la compacité sur chaussée après un an ou dix-huit mois de circulation. A noter que nous avons prévu l'essai à 60°C sur nos éprouvettes, 60°C étant la plus haute température atteinte en France par le revêtement l'été : la cohésion étant très diminuée, il met mieux en valeur le frottement interne dû aux granulats.

C.I.2. Contrôles de Fabrication

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

C.II. PRINCIPE ET DEFINITION

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

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

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

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

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

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

C.III. LE DOMAINE D'APPLICATION

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

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

C.IV. APPAREILLAGE

- 1 presse développant 2 tonnes, sensible au Kilogramme, équipée d'un dispositif d'application de la compression à la vitesse de 0,846 mm/s ;

- Généralement on emploie une presse C.B.R. équipée d'un anneau dynamométrique d'une tonne (dans le cas où la pression d'écrasement est supérieure à une tonne, on utilisera de préférence un anneau des 2 tonnes, plutôt que d'extrapoler la courbe de l'étalonnage de l'anneau d'une tonne), d'un piston de compression à appui à billes, d'un indicateur de cadence à 0,846 mm/s complété par un « contrôleur de cadence »

- 1 appareillage Marshall ou mieux, 2 moules de compactage, 2 dames, 1 piston extracteur, 2 appareils de stabilité, d'un appareil pour mesurer la déformation (indicateur de fluage).

L'appareillage Marshall comprend :

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

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

- 1 piston extracteur ;

- 1 dame de comptage

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

- 1 appareil de stabilité Marshall.

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

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

- 1 indicateur de fluage petit appareil à vernier coulissant, gradué en 0,5mm, qui s'adapte lors de la mesure à une des tiges de guidage.
- Bain d'eau thermostatique réglé à 60 °C. +/- 0,5 et pouvant contenir simultanément sur un support perforé au moins 4 éprouvettes complètement immergées et 2 appareils de stabilité Marshall.
- 2 étuves, l'une réglée entre 175 °C et 190 °C, l'autre réglée à 140 °C ;
- Récipients de 2 000 m³ de capacité pour le chauffage et le malaxage des agrégats et du liant ;
- Spatules ou grandes cuillers en métal ;
- 1 balance de portée minimum 3 Kg et sensible à 5 dg ;
- 1 paire de gants appropriée à la manipulation à chaud du matériel
- Disques papier filtre de diamètre 10 cm, texture moyenne de préférence ;
- Glycérine technique ;
- Oléate de soude glycérine ;
- Pétrole pour le nettoyage ;
- 1 thermomètre industriel 0°C à 200 °C avec tige plongeante et 13 cm pour le contrôle de la température de l'enrobé ;
- 1 pied à coulisse au 1/50^e.

C.V. MODE OPERATOIRE

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

C.V.1. Préparation du mélange et confection des éprouvettes

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

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

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

On retire d'abord de son étuve, le récipient contenant le liant, puis les agrégats, et l'on verse ceux-ci dans le récipient du liant. On mélange la totalité à la cuiller. La température du mélange ne doit pas être tombée au dessous de 150 °C à la fin du malaxage. Si la température tombe au dessous de cette valeur, on ne doit en aucun cas réchauffer le mélange, qui doit être rebuté.

Variante Tolérée

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

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

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

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

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

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

On enlève la base.

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

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

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

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

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

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

C.V.2. Détermination de la Densité apparente

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

C.V.3. Essai de stabilité et de déformation

Après confection des éprouvettes, celles-ci sont conservées pendant 5 heures ($\pm 1/2$ heure) à la température ambiante puis on les immerge dans le bain thermostatique réglé à $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec l'appareil d'essai, pour une durée de 30 mn (± 1 mn).

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

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

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

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

On règle le comparateur au zéro. On adapte l'indicateur de fluage sur l'une des tiges de guidages, en assurant fermement son contact avec la mâchoire supérieure. On note la division indiquée. Deux opérateurs sont nécessaires pour cette phase de l'essai ; l'un manœuvre la presse à la cadence imposée, l'autre surveille le comparateur de l'anneau dynamométrique tout en maintenant appuyé l'appareil pour la mesure de la déformation.

Quand tout est prêt, on manœuvre le volant de la presse pour suivre la cadence. La rupture se produit au moment où le comparateur de l'anneau dynamométrique indique un maximum. En lisant ce maximum, il faut libérer en même temps, l'appareil de mesure de déformation.

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

Cette valeur est corrigée, pour tenir compte du volume de l'éprouvette, il suffit de la multiplier par un coefficient de corrélation, celui-ci correspond à la hauteur de l'éprouvette.

Volume de l'éprouvette en cm ³	Hauteur de l'éprouvette en mm	Coefficient de corrélation
471-482	58,74	1,14
483-495	60,32	1,09
496-508	61,91	1,04
509-522	63,50	1,00
523-535	65,08	0,96
536-546	66,67	0,93
547-559	68,26	0,89

La nouvelle valeur obtenue est celle de la stabilité Marshall.

On lit sur l'appareil de mesure de déformation la nouvelle division. La différence entre les deux divisions, en dixièmes de millimètres arrondis à 0, et 5, donne la déformation Marshal.

C.V.4. Calcul du pourcentage de vides occupés par le bitume

Pour ce calcul, il faut connaître la densité apparente de l'éprouvette la densité du bitume, la densité de chacun des agrégats, les pourcentages en poids de chacun des constituants rapportés à 100 (liant et filler compris). Ces déterminations, sauf celle de la densité apparente de l'éprouvette, font l'objet des essais préliminaires à l'étude de l'enrobé ou du béton hydrocarboné.

Soit d_m la densité apparente de l'éprouvette ;

D_b la densité du bitume ;

D_{a1} la densité de l'agrégat 1 ;

D_{a2} , D_{a3} etc. celle des agrégats 2,3 etc.

P_b le pourcentage en poids du bitume ;

P_{a1} , P_{a2} , P_{a3} , ceux des agrégats.

C.V.4.1. Densité vrai de l'éprouvette

$$D_m = \frac{100}{\frac{P_b}{D_b} + \frac{P_{a1}}{D_{a1}} + \frac{P_{a2}}{D_{a2}} + \frac{P_{a3}}{D_{a3}} + \dots}$$

C.V.4.2. Pourcentage volumétrique des vides résiduels ou vides de l'éprouvette : V_m

$$V_m = 100 \frac{(D_m - d_m)}{D_m}$$

$\frac{d_m}{D_m}$ est le volume vrai des agrégats dans l'éprouvette de volume 1.

C.V.4.3. Compacité C ou pourcentage volumétrique des pleins

$$C = 100 - V_m$$

C.V.4.4. Densité apparente de l'agrégat dans l'éprouvette ou densité sèche : d_A

Dans le densité apparente de l'éprouvette, le bitume intervient pour P_b % et l'agrégat pour $(100 - P_b)$ % (en négligeant le poids de l'air des vides).

$$d_A = d_m \left(1 - \frac{P_b}{100} \right)$$

C.V.4.5. Poids spécifique de l'agrégat : D_A

$$D_A = \frac{\text{Poids del 'agrégat}}{\text{Volumevrai del'agrégat}} = \frac{100 - P_b}{\frac{Pa1}{Da1} + \frac{Pa2}{Da2} + \frac{Pa3}{Da3} + \dots}$$

C.V.4.6. Pourcentage volumétrique des vides occupés par l'air et par le bitume dans l'éprouvette (vide de l'agrégat) : V_A

$$V_A = 100 \frac{(D_A - d_A)}{D_A}$$

$\frac{d_A}{D_A}$ volume vrai de l'agrégat dans l'unité de volume de l'éprouvette.

C.V.4.7. Pourcentage de vides comblés par le bitume : R_b

R_b est le pourcentage volumétrique des vides de l'agrégat comblés par le bitume, c'est-à-dire 100 fois le rapport du volume du bitume au volume des vides de l'agrégat dans l'éprouvette.

$$V_b = V_A - V_m$$

V_b étant le volume des vides occupés par le bitume, en fait le volume du bitume lui-même.

$$R_b = 100 \frac{V_b}{V_A} = 100 \frac{V_A - V_m}{V_A}$$

Les valeurs consignées dans le procès verbal sont :

- Déformation en 1/10 (1)
- Stabilité en Kg..... (2)
- Densité apparente de l'éprouvette (3)
(par la détermination des mesures)..... d_m
- Densité vrai de l'éprouvette D_m
- % des vides résiduels V_m
- Compacité de l'éprouvette C
- Densité apparente de l'agrégat dans l'éprouvette
ou densité sèche d_A
- Poids spécifique de l'agrégat D_A
- % des vides occupé par l'air et le bitume dans l'éprouvette V_A
- % des vides comblés par le bitume R_b

**ANNEXE « D » : ESSAI DE STABILITE HUBBARD-FIELD SUR MORTIERS ET
BETONS BITUMINEUX
(Méthode du laboratoire central des ponts et chaussées
dérivée de la méthode Hubbard-Field) [12]**

D.I. But de l'essai

Cet essai, qui n'est pas exactement l'essai américain Hubbard Field, a pour but de donner des indications sur la stabilité, c'est-à-dire sur la résistance à la déformation d'un mortier ou d'un béton bitumineux.

D.II. Principe de l'essai :

Cet essai consiste à mesurer sous quelle pression une éprouvette de mortier ou de béton bitumineux, dont les dimensions et la confection sont normalisées, peut fluer à travers un orifice calibré.

Suivant le béton bitumineux à examiner, il est utilisé deux appareils différents, dont les indications ne sont pas comparables.

D.III. Appareillage pour l'essai de stabilité des mortiers et des bétons bitumineux à éléments fins (bétons contenant des éléments de dimension maximum ne dépassant pas 16mm et ne contenant pas plus de 35% en poids d'éléments retenus au tamis de 2mm). Il faut (figure D.1) :

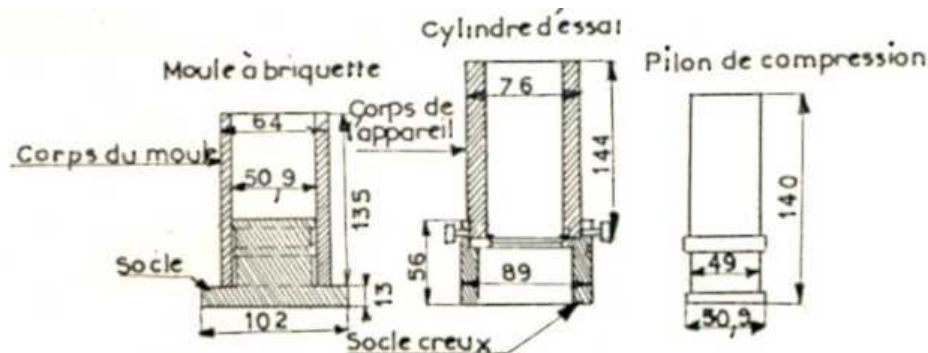


Figure D.1 : Appareils Hubbard Field petit modèle pour l'essai de stabilité des bétons bitumineux préparés à chaud

- Une presse hydraulique pouvant développer un effort de compression de 5t ;
- Un moule cylindrique pour la confection des éprouvettes ;
- Un cylindre d'essai avec pilon de compression et anneau de base ;
- Deux pilons de damage, référence n°1 et n°2.

Pour la confection des mélanges et la conservation des éprouvettes, l'appareillage est le même que celui utilisé pour l'essai de résistance à la déformation par compression simple des bétons bitumineux (Duriez) à savoir :

- L'appareillage qu'on vient de citer ;
- Deux récipients en métal de 1000 cm³ ;
- Un récipient en métal de 500 cm³ ;
- Une spatule ou une cuillère en métal ;
- Une balance sensible u décigramme ;
- Une salle à température constante (18°C) ;
- Une étuve réglée à 140°C ;
- Une étuve réglée à 100°C ;
- Un comparateur à tige et cardan gradué au 1/100 de mm.

D.IV. Mode opératoire

Connaissant la granulométrie de l'agrégat minéral et la teneur en liant, on pèse dans un récipient de 1000 cm³ les différentes portions granulométriques. Les pesées sont calculées de façon à obtenir 200g d'agrégats.

Dans un autre récipient on pèse la quantité de liant correspondant à 200g d'agrégats. Le récipient contenant les agrégats est conservé pendant 1 heure dans une étuve chauffée à 140°C. Le récipient contenant le liant est maintenu pendant 1 heure à 100°C dans une étuve. Au bout de ce temps, les agrégats sont versés dans le récipient contenant le liant et malaxé à l'aide d'un malaxeur, sinon à l'aide d'une spatule ou cuillère métallique.

Les agrégats un fois enrobés, on place 100g du mélange dans le moule préalablement chauffé à 100°C et légèrement graissé (par un mélange d'oléate de soude et de glycérine) .

On dame le mélange de 60 coups énergiques avec le pilon de damage n°1, puis de 15 à 20 coups avec le pilon N°2 ; on introduit ensuite le pilon de compression et l'on place le moule sur le plateau de la presse.

On applique sur le pilon une pression de 210 kg/cm² (soit un effort de 4200kg pour une surface de 20cm² environ) ; cette pression est maintenue pendant 5mn. On revient lentement à l position initiale, l'éprouvette est démoulée, celle-ci exposée pendant 24 heures à 18°C et l'essai de stabilité est effectué de la façon suivante :

On introduit l'éprouvette dans le cylindre d'essai en la plaçant au-dessus de l'anneau d'essai préalablement fixé sur son support.

L'ensemble est placé sur le plateau de la presse, on exerce une pression sur l'éprouvette et on règle la pression à une vitesse de 1,56 mm/s. il se produit d'abord une distorsion de l'éprouvette à travers l'orifice de l'anneau d'essai. La pression enregistrée au manomètre de la presse s'élève rapidement pour atteindre un maximum après lequel elle diminue brusquement lorsque l'éprouvette flue à travers l'orifice.

La valeur maximale de la charge totale appliquée sur l'éprouvette est par définition la valeur de la stabilité. Cette valeur donnée en kilogrammes par centimètre carré pour une

température de 18°C. L'essai peut aussi être effectué à la vitesse de déformation de 0,21 mm/s.

Enfin, l'essai est effectué soit à 18°C soit à 60°C en utilisant une vitesse de déformation de 1mm/s.