

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère De L'Enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'études

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

THEME

*Modélisation du Comportement
d'un Enrobé Bitumineux
Modifié à la Poudrette de Caoutchouc*

Réalisé par :

- BENCHEKROUN Yacine.

Proposé par :

Mme R. Kettab

Dédicaces

A ma mère,

A mon père,

A ma grand-mère,

Ainsi qu'à mon oncle sidahmed



Remerciements

Je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé à finaliser ce modeste travail, en commençant par mes parents , et à ma tante et son mari « MONCEF ».

Je remercie vivement Madame R.KETTAB pour sa disponibilité et son aide durant cette année e et les années précédente.

Je remercie toute l'équipe du LCTP ,et en particulier atik.

Ma reconnaissance à Mrs A.BRARA et Mrs DOUKALI pour leur précieuse aide .

Enfin, je remercie Mrs BALI et les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de faire partie du jury.

ملخص:

تتمحور دراستنا هاته حول تأثير إضافة المسحوق المطاطي إلى الخرسانة الزيتية, المسحوق يضاف مباشرة داخل الخليط.

تتمثل دراستنا في:

- دراسة إحصائية لنتائج متحصل عليها من خلال التجارب MARSHALL و DURIEZ بتغيير مناسب للخليط و للمسحوق بالإضافة إلى دراسة التصرف الريولوجي للخرسانة المغيرة بالمسحوق المطاطي و الخرسانة الغير مغيرة.

المفاتيح: الخرسانة الزيتية, نمذجة التصرف الريولوجي, المسحوق المطاطي, دراسة إحصائية.

Résumé :

Dans notre travail, nous avons étudié les caractéristiques d'un béton bitumineux semi-gremie modifié par l'ajout de 2% de poudre de caoutchouc incorporée directement dans le squelette granulaire .

Ce travail à porter sur une étude statistique des résultats d'essai Duriez et Marshall à partir de dosage optimal en liant et en poudre, dosage qui est issu de d'une étude de formulation réalisée au sein du Laboratoire Construction et Environnement à l'ENP, et une étude du comportement rhéologique de nos deux enrobés bitumineux, modifiés et témoins.

Les résultats statistiques obtenues sur les bétons bitumineux ainsi que les paramètres rhéologiques calculés montrent un réel avantage par rapport à l'enrobé traditionnel, ces résultats peuvent contribuer à l'amélioration des méthodes de dimensionnement.

Mots clefs : *béton bitumineux, modélisation du comportement, poudre de caoutchouc, étude statistique*

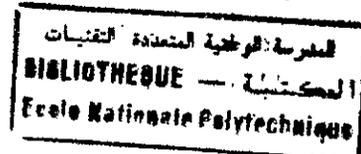
Abstract :

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

To realize our study, we employed the optimum mixture of crum tyre rubber and bitumen , and we studied the statistic results to confirm the difference between the two mixture and the rheologic parameters in order to quantify the rheological parameters of our mixture.

Key words: *asphalt concrete mixture, rheological models, crumb tyre rubber ,statistic studie*

Sommaire



1

Chapitre I : « INTRODUCTION GENERALE »

PARTIE A : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre II : « HISTORIQUE DES BITUMES MODIFIES »

II.1. INTRODUCTION	3
II.2. LE DEVELOPPEMENT DES ENROBES AVEC LIANT MODIFIE ET ADDITIFS	3
II.2.1. Les inconvénient des bitumes purs	3
II.2.2. Avantages des bitumes modifiés	4
II.2.3. Inconvénients des bitumes modifiés	4
II.3. AJOUT DU POLYMERE DANS LE SQUELETTE SOLIDE	4
II.4. BUT RECHERCHE	5

Chapitre III : « LES DIFFRENTS AGENTS MODIFIANTS »

III.1. INTRODUCTION	6
III.2. PRICIPAUX AGENTS CHIMIQUES UTILISES DANS LA MODIFICATION DU BITUME	6
III.2.1. Les polymères thermodurcissables	6
III.2.2. Les polymères thermoplastiques	6
III.2.3. Les élastomères et les plastomères	6
III.3. AUTRES AGENTS MODIFIANTS	6
III.3.1. Terpolymères	7
III.3.2. Mélange d'élastomère et de plastomère	7
III.3.3. Polyoléfine	7
III.3.4. Caoutchouc	7
III.3.5. Les latex	7

Chapitre VI : « ETUDE MECANIQUE DES BETONS BITUMINEUX »

IV.1. INTRODUCTION	9
IV.2. OBJECTIF DU TRAVAIL	9
IV.3. COMPOSITION DES FORMULES	9
IV.4. LES ESSAIS SUR ENROBES BITUMINEUX	10
IV.5. ESSAIS REALISEES DANS LE CADRE DE NOTRE TRAVAIL	10
IV.5.1. Essai Marshall	11
IV.5.1.1. Quelques renseignements d'ordre général sur l'essai Marshall	11
IV.5.1.2. Appareillage	11
IV.5.1.3. Fabrication de l'enrobé	12
IV.5.1.3.1. Préparation des prises d'essais	12
IV.5.1.3.2. Malaxage	12
IV.5.1.3.3. Remplissage des moules de Malaxage	12
IV.5.1.3.4. Mode opératoire	13
IV.5.1.3.5. Expressions des résultats	14

IV.5.2. Essai Duriez	18
IV.5.2.1. Généralités	18
IV.5.2.1.1. Définition	18
IV.5.2.1.2. Principe de l'essai	18
IV.5.2.1.3. Appareillage	18
IV.5.2.1.4. Préparation des éprouvettes	18
IV.5.2.1.4.1. Remplissage des moules	18
IV.5.2.1.4.2. Compactage des éprouvettes	18
IV.5.2.1.4.3. mode opératoire	18
IV.5.2.1.5. Expression des résultats	18
IV.5.2.1.5.1. Résistance en compression	18
IV.5.2.1.5.2. Calcul du pourcentage des IVdes	18
IV.5.3. Essai de traction indirecte répétée au NAT	23
IV.5.3.1. Principe de l'essai	23
IV.5.3.2. Matériel utilisé	24
IV.6. AUTRES ESSAIS POUVANT ETRES EFFECTUES SUR BETONS BITUMINEUX	25
IV.6.1. Essai de fluage en compression simple sous charge constante	25
IV.6.1.1 Exploitation des résultats	26
IV.6.1.2. L'essai de traction indirecte	27
IV.6.1.3. Essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG)	28
IV.6.1.4. utilisation de la PCG	29
IV.6.2. Fatigue des enrobés bitumineux	30
IV.6.2.1. Introduction	30
IV.6.2.2. Fatigue des enrobés	30
IV.6.2.3. Essai de fatigue par flexion alternée sur éprouvette trapézoïdale	32
IV.6.2.4. Essai de compression répétée.	33
IV.6.2.5. Essai d'orniérage LPC	35
IV.6.3. Le module complexe	36
IV.7. Étude du comportement	37

Chapitre V : « RESULTATS BIBLIOGRAPHIQUE »

V.1. INTRODUCTION	38
V.2. COMPORTEMENT AU FLUAGE STATIQUE	38
V.2.1. Introduction	38
V.2.2. Appareillage utilisé	39
V.2.3. Chargement de l'éprouvette	
V.3. CONDITIONS PARTICULIÈRES DE L'ESSAI	39
V.4. MODE OPÉRATOIRE	39
V.5. VALEURS À DÉTERMINER	39
V.6. RÉSULTAS DE L'ESSAI DE FLUAGE STATIQUE	40
V.7. Conclusion	42

PARTIE B: ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre VI : « IDENTIFICATION DES MATERIAUX »

VI.1. SQUELETTE MINERAL	43
VI.1.1 Introduction	43
VI.1.2. Echantillonnage	43
VI.2. ANALYSE GRANULOMETRIQUE	44
VI.3. ESSAI DE PROPETE	57
VI.3.1. Equivalent de sable (E.S) (NF P 18-597)	57
VI.3.1. Poids spécifique :(NFP 18-555)	57
VI.3.2. Valeur de bleu de méthylène (VBS) (NF P 94-068)	57
VI.3.3. Analyse chimique	57
VI.4. LES PARAMETRES DE COMPORTEMENT MECANIQUE	58
VI.4.1. Coefficient d'aplatissement (NF P – 18 -561)	58
VI.4.2. Coefficient de friabilité des sables (NF P – 18 -576)	58
VI.4.3. Essai D'usure MICRO-DEVAL (NF P – 18 -572)	59
V.4.4. Essai Los Angeles (NF P – 18 -573)	59
V.5. L'ADDITIF (POUDRETTE DE CAOUTCHOUC)	60

Chapitre VII : « FORMULATION DES BETON BITUMINEUX »

VII.1. INTRODUCTION	61
VII.2. CRITERES DE FORMULATIONS	61
VII.3. METHODOLOGIE A SUIVRE POUR L'ETUDE D'UNE FORMULATION	61
VII.3.1. La composition granulométrique	61
VII.3.2. La teneur en liant	63
VII.3.3. Les caractéristiques de l'enrobé	64

Chapitre VIII : « ETUDE STATISTIQUE »

VIII.1. INTRODUCTION	65
VIII.2. COMPARAISON DE L'EGALITE DES VARIANCES	65
VIII.2.1. Principe	65
VIII.3. RESULTATS DE L'ESSAI MARSHALL	65
VIII.3.1. Résultats des tests d'égalité des variances (F-Test)	66
VIII.3.1.1. Stabilité Marshall	66
VIII.3.1.2. Fluage Marshall	66
VIII.3.1.3. Compacité Marshall	67
VIII.4. RESULTATS DE L'ESSAI DURIEZ	67
VIII.5. CONCLUSION	68

Chapitre IX : « ETUDE DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES BETONS BITUMINEUX »

IX.1. Introduction	69
IX.1.1. Les Lois rhéologiques	69

IX.1.2. Le comportement rhéologique	69
IX.1.3. Loi de comportement	69
IX.1.4. Approche théorique	69
IX.2. L'application de la rhéologie aux enrobés bitumineux	70
IX.2.1. Concept de visco-élasticité	70
IX.2.1.1. Le ressort (modèle de comportement élastique)	70
IX.2.1.2. L'amortisseur (modèle de comportement visqueux)	71
IX.3. Exigences du fonctionnement élastique	72
IX.4. Modèles de corps	72
IX.5. Comparaison entre le modèle de Kelvin-Voigt et le modèle de maxwell	78
IX.6. La complaisance	80
IX.7. Remarque Générale concernant le test de fluage	81
IX.8. Relaxation des solides de Bingham	81
IX.8.1. Expérience de GAUER	81
IX.8.2. Expérience de RUBIO et KLUG	82
IX.8.3. Expérience de LEMPE	82
IX.9. Résumé	82
IX.10. APPLICATION DU MODELE DE BURGER A NOTRE CAS	83
IX.10.1. Méthode de calcul	83
IX.10.2. Fluage	83
IX.10.2.1. Déformation élastique instantané due au ressort de Maxwell (saut élastique)	83
IX.10.2.2. Partie viscoélastique des composants de Kelvin-voigt (réarrangement des grains)	
IX.10.2.3. Déformation purement visqueuse	
IX.10.2. Conclusion	

Chapitre X : «CONCLUSION GENERALE» 87

ANNEXES

ANNEXE 1 : RESULTATS DE L'ESSAI MARSHALL	88
ANNEXE 2 : RESULTATS DE L'ESSAI DURIEZ	95

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PARTIE A
ETUDE THEORIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHÈQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

CHAPITRE I INTRODUCTION GENERALE

De nos jours la route devient un outil incontournable pour le déplacement des véhicules, engins, et autres moyens de transport à travers toute la planète ; Sachant que l'agressivité du trafic ne cesse d'augmenter et que la construction des chaussées obéit à des critères qualité-cout de plus en plus exigeants , de nouveaux procédés de réalisation de chaussées , assurant un comportement mécanique convenable et durable sont de plus en plus utilisés de part le monde.

On a assisté depuis une vingtaine d'années dans les pays développés, à un intérêt particulier pour les nouveaux liants hydrocarbonés (bitumes modifiés). Le liant est amélioré par l'ajout d'additifs tel que les caoutchoucs ou les polymères dans le but de le faire travailler dans des conditions de plus en plus sévères.

Ces possibilités ne peuvent pas être exploitées à l'échelle industrielle, du fait de leur coût de mise en œuvre élevé, et du problème de faisabilité à une échelle industrielle (fabrication, stockage et transport).

Notre travail consiste à évaluer l'apport de cet ajout directement dans le squelette granulaire d'un béton bitumineux semi- grenu destiné à être utilisé comme couche de roulement d'abord par une étude statistique comparative qui montre la représentativité des résultats des bétons bitumineux modifiés à 2% par rapport à ceux de 0% ; ensuite par une étude de comportement et particulièrement de fluage statique.

Ces essais sont effectués sur un enrobé avec des granulats de même nature minéralogique, ainsi qu' un dosage optimal en liant et en poudrette auxquels des travaux au sein du Laboratoire Construction et Environnement ont abouti.

L'additif en question provient de déchets à base de caoutchouc (tapis de voitures) broyés sous forme de poudrette.

Une étude du comportement rhéologique sera particulièrement faite sur les deux enrobés bitumineux cités ci-dessus, visant à étudier leur comportement dans les différentes phases de sollicitations.

Notre étude comprend de grandes parties :

La première est une synthèse bibliographique qui traite des différentes manières de modification des enrobés bitumineux par différents agents modifiant , ainsi que les essais

classiques et les essais spécifiques sur enrobés donnant le comportement de ces derniers vis-à-vis des différentes sollicitations .

La deuxième partie comprend des résultats d'essais d'identification des matériaux , une étude statistique comparative , et enfin une étude du comportement rhéologique de nos bétons bitumineux.

Les essais Marshall et Duriez ont été réalisés au laboratoire central de travaux public (L.C.T.P).

CHAPITRE II
HISTORIQUE DES
ENROBES MODIFIES

II.1. INTRODUCTION :

Les recherches d'amélioration des propriétés du béton bitumineux, soit par modification de la structure du liant soit par ajout d'additifs ; sont des techniques plus ou moins anciennes. Ainsi par exemple, BENCOVITZ et BOE publiaient en 1938 dans la revue de l'ASTM, sur l'addition du soufre aux mélanges bitumineux.

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

Le développement significatif des liants modifiés peut être situé dans les années 70 en Europe et particulièrement en Allemagne. Ensuite, en Autriche puis en Italie, apparaissent sur chaussées autoroutières de nouveaux revêtements bitumineux à base de polyéthylène introduit au niveau du malaxeur. En France ce n'est qu'en 1972 que la première application a eu lieu sur un pont à dalles avec un bitume modifié aux polymères.

II.2. LE DEVELOPPEMENT DES ENROBES AVEC LIANTS MODIFIES ET ADDITIFS :

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

II.2.1. Les inconvénient des bitumes purs:

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

Cependant, les conditions de trafic, devenues de plus en plus agressives, alliées à des impératifs d'économie (investissements plus durables dans le temps, couche de plus en plus mince) ont amené les bitumes purs à certaines limites d'emplois :

- Le bitume pur ne permet plus à l'enrobé de type traditionnel, même en choisissant un grade dur (35 /50), d'assurer dans tous les cas une résistance satisfaisante sous trafic très lourd et canaliser pour des températures durablement élevées ;
- Un grade plus dur, s'il apporte à l'enrobé un meilleur comportement à l'orniérage accroît à l'inverse les risques de fissuration thermique à basses températures ;
- Certains mélanges enrobés de granularité ouverte n'auront pas la résistance mécanique souhaitée du fait de la cohésivité et de l'adhésivité obtenues avec un bitume pur, ni même une durabilité satisfaisante du fait d'une richesse en liant faible ;
- Les enduits superficiels sous trafic élevé et lourd ne présentent pas la même durabilité lorsqu'ils sont formulés avec un bitume pur pour les mêmes raisons de qualités mécaniques et d'adhésivité .

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

II.2.2. Avantages des bitumes modifiés:

Les objectifs recherchés par l'amélioration du liant dépendent bien entendu des domaines d'applications et des techniques (enduits superficiels, tapis minces, enrobés drainant, couche de roulement pour routes à trafic intense, couche d'assise pour route à trafic intense, membrane anti-fissures, etc.). Nous examinerons successivement ces divers cas.

II.2.3. Inconvénients des bitumes modifiés :

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

Il est important de souligner ici que cet ajout ne doit pas être confondu avec la notion de bitumes modifiés, même si le processus de fabrication entraîne la fusion du polymère. En effet, dans ces cas d'addition, les polymères recristallisent pendant la phase de refroidissement pour former une dispersion, éventuellement un réseau fibreux plus au moins homogène et continu; ces polymères ne se combinent pas, ou très peu, avec certaines fractions de bitume.

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

II.3. AJOUT DU POLYMERE DANS LE SQUELETTE SOLIDE :

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

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

granulaire

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

II.4. BUT RECHERCHE :

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

Cependant, les conditions de trafic devenues de plus en plus agressives alliées à des impératifs d'économie qui exigent un investissement plus durable dans le temps et des couches beaucoup plus minces ont emmené les bitumes purs à certaines limites d'emploi

- Le bitume pur ne permet plus à l'enrobés de type traditionnel (béton bitumineux 0/10 0/14 à granularité continue, grenue ou semi-grenue) d'assurer dans tous les cas une résistance à l'orniérage satisfaisante sous trafic très lourd et canalisé pour des températures durablement élevés
- Un bitume plus dur s'il apporte à l'enrobés un meilleur comportement à l'orniérage (avantage à hautes températures) accroît à l'inverse le risque de fissuration thermique à basse température
- Certains mélanges enrobés de granularité ouverte n'auront pas la résistance mécanique souhaité du fait de la cohésivité et de l'adhésivité obtenue avec un bitume pur ni même une durabilité satisfaisante du fait d'une richesse en liant faible.

CHAPITRE III
LES DIFFRENTS
AGENTS
MODIFIANTS

III.1. INTRODUCTION :

L'emploi d'un agent chimique dans le bitume de base modifie la structure chimique et les propriétés (physiques et mécaniques).

III.2. PRINCIPAUX AGENTS CHIMIQUES UTILISES DANS LA MODIFICATION DU BITUME :

Les polymères constituent la famille d'agents modifiants chimiques la plus utilisée pour la modification des bitumes. Ils se présentent sous forme de macro molécules caractérisées par la répétition, un très grand nombre de fois, du même groupe d'atomes, motif constitutif formé d'un ou plusieurs monomères. On classe les polymères en deux grandes catégories :

III.2.1. Les polymères thermodurcissables :

Ils durcissent de façon irréversible à une température qui dépend de leur nature chimique. L'enchaînement de leurs molécules forme un réseau tridimensionnel qui s'oppose à toute mobilité thermique. Ils sont relativement peu utilisés en association avec le bitume en technique routière.

III.2.2. Les polymères thermoplastiques :

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

Les polymères thermoplastiques sont subdivisés en deux familles :

III.2.3. Les élastomères et les plastomères :

Qui se distinguent, aux températures d'usage par des comportements différents, en particulier, leur rigidité, déformabilité et leur résilience.

Pour les plastomères, la déformation élastique s'accompagne d'une déformation permanente qui peut être relativement importante. Il convient toute fois de noter qu'entre ces deux situations il y a une gamme de matériaux dont le caractère élastomère ou plastique est gradué suivant la proportion des phases souple et rigide présentes dans la matrice du polymère.

III.3. AUTRES AGENTS MODIFIANTS :

La modification du bitume peut être obtenue avec d'autres polymères tels que les Terpolymères ; « les mélanges d'élastomères et de plastomères », et polyoléfinés, et aussi avec d'autres agents modifiants que les polymères de synthèse, il s'agit notamment de la poudre de caoutchouc et des latex.

III.3.1. Terpolymères :

Les terpolymères éthylène propylène diène appelés plus communément EPDM présentent de bonnes résistances à l'oxygène, l'ozone, la chaleur, la lumière ainsi que des bonnes propriétés mécaniques en résilience élastique et flexibilité à froid.

III.3.2. Mélange d'élastomère et de plastomère :

Le bitume peut aussi être modifié par adjonction d'un élastomère et d'un plastomère. Ainsi certains industriels ont cherché à tirer bénéfice des avantages spécifiques de chaque grande famille de modifiant en ajoutant au bitume simultanément des EVA et SBS.

III.3.3. Polyoléfine :

Les polyoléfines sont des copolymères saturés d'éthylène, propylène et butène. Les polyoléfines sont largement utilisés pour la fabrication de membranes d'étanchéité. En revanche, ils sont moins utilisés en applications routières en raison de difficultés à assurer un mélange homogène avec le bitume aux températures habituelles de mise en œuvre.

III.3.4. Caoutchouc :

L'utilisation de granulats de caoutchouc recyclé comme un additif dans les enrobés bitumineux est une idée explorée depuis une trentaine d'années dans les pays développés, avec comme objectif secondaire d'éliminer des pneumatiques usagés et donner un aspect environnemental à la démarche ainsi que des considérations économiques (liées au coût des polymères), ont conduit à tenter de modifier les propriétés du bitume par incorporation de ces déchets. Il faut noter que le caoutchouc utilisé pour la fabrication des pneumatiques a été « vulcanisé », ce qui entraîne une modification chimique de sa structure et lui confère des caractéristiques différentes de solubilité et de gonflement de celles du caoutchouc non vulcanisé.

Le caoutchouc provient donc en général de pneumatiques usagés réduits à l'état de poudrette de taille au plus millimétrique. Introduit dans le bitume chaud, le caoutchouc réagit et gonfle par absorption de fractions huileuses de bitume.

L'indemnisation du caoutchouc issu du recyclage des pneumatiques, fait que les polymères formant la poudrette ne se dissolvent pas bien dans le bitume chaud et que le mélange est généralement instable. Donc le mélange doit être utilisé immédiatement en raison de son instabilité.

III.3.5. Les latex :

Les latex sont des agents de modification utilisés pour les émulsions. Les latex sont des suspensions aqueuses de polymères naturels ou synthétiques sous la forme de particules extrêmement fines (en général $\phi < 1\mu\text{m}$).

CHAPITRE IV
ETUDE MECANIQUE DES
BETONS BITUMINEUX

IV.1. INTRODUCTION :

L'amélioration du liant modifié vis-à-vis des caractéristiques offertes par un bitume pur, permet en général d'accroître le niveau et la durabilité du mélange bitumineux. La fabrication des bétons bitumineux doit répondre à certaines règles de composition.

IV.2. OBJECTIF DU TRAVAIL :

Le premier objectif de ce travail est d'effectuer des essais mécaniques complémentaires afin de mettre en valeur l'ajout de la poudrette de caoutchouc dans le squelette solide. La nature minéralogique des granulats est basaltique ; ils sont prélevés de la carrière de CAP DJINET. L'ajout de poudrette de caoutchouc améliore les performances d'une manière plus significative qu'avec des granulats de nature calcaire (répulsion chimique entre le liant et les granulats carbonatés).

IV.3. COMPOSITION DES FORMULES :

Les formules utilisées dans le cas du présent travail sont des formules optimales obtenues suite à une étude de formulation réalisée par Mrs BRARA l'ors de l'élaboration de son travail de magister. Les compositions sont les suivantes :

- Choix d'un mélange granulaire composé de 3 fractions granulométriques (0/3, 3/8, 8/15). Ce mélange s'insère parfaitement dans les fuseaux de référence (fuseau SETTRA/ LCPC BB 0/14).
- A partir de la teneur optimale en bitume, plusieurs gâchées seront faites afin de mettre en évidence les modifications qui peuvent se produire l'orsqu'on ajoute de la poudrette de caoutchouc. On compare les résultats entre les gâchées témoins et modifiées.

L'étude de la formulation des bétons bitumineux effectués, à partir des granulats et du bitume de classe 40/50 (caractérisé dans la partie étude expérimentale sur les bitumes modifiés, conformément aux spécifications en vigueur dans les laboratoires algériens) a donné les résultats suivants :

TABLEAU IV.1 : Composition des formules optimales avec 0% d'ajout

Fraction granulaire	0/3	3/8	8/15
Pourcentage du Mélange (%)	36	28	36
Teneur en liant(%)	6.02		

TABLEAU IV.2 : composition des formules avec 2 % d'ajout

Fraction granulaire	0/3	3/8	8/15
Pourcentage du Mélange (%)	34	28	36
Teneur en liant (%)	6.02		

Teneur en poudrette (%)	2
-------------------------	---

IV.4. LES ESSAIS SUR ENROBES BITUMINEUX :

Le mot enrobé bitumineux est suffisamment vague pour englober une grande variété de matériaux dont le comportement varie suivant la sollicitation. C'est pourquoi les propriétés de l'enrobé sont encore mal connues, malgré l'importance des moyens mis en oeuvre pour son développement. On sait toutefois que c'est un matériau hétérogène dont le bitume lui confère un caractère visqueux, alors que sa partie minérale (squelette) lui donne l'aspect résistant.

Pour cerner donc les propriétés des enrobés, de nombreux laboratoires de recherche ont mis au point des méthodes d'essais dans le souci d'une meilleure connaissance de certaines propriétés, soit pour chercher l'explication des désordres constatés et tenter d'y apporter remède en affinant les règles de formulation, soit pour essayer de prévoir leur comportement à long terme et fournir des données indispensables aux calculs du dimensionnement des chaussées.

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

- L'essai Marshall ;
- L'essai Duriez ;

Il existe aussi des essais récemment développés pour pallier les insuffisances de solution des problèmes d'utilisation des enrobés bitumineux et que les essais classiques n'ont pu résoudre.

Nous énumérons ci-après quelques essais particuliers développés dans plusieurs pays pour combler les vides relevés par les essais classiques.

- L'essai de fluage dynamique, dans la formulation des enrobés et le dimensionnement des chaussées ;
- L'essai d'ornièreur LCPC ;
- L'essai de traction directe aux enrobés bitumineux ;
- L'essai de module (intrinsèque) ;
- L'essai de compression diamétralement appliquée aux enrobés hydrocarbonés ;
- L'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) ;
- L'essai de fatigue par flexion alternée sur éprouvettes trapézoïdales (Intrinsèque) ;

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

IV.5. ESSAIS REALISES DANS LE CADRE DE NOTRE TRAVAIL :

IV.5.1. Essai Marshall :

IV.5.1.1. Quelques renseignements d'ordre général sur l'essai Marshall :

L'essai Marshall est un essai destructif, effectué en laboratoire sur des éprouvettes cylindriques selon un mode opératoire bien précis. Il permet de comparer des formules diverses de mélange hydrocarboné, et d'évaluer leurs performances à des niveaux de compactage différents. Il permet aussi, dans certaines mesures, de prévoir si, sous le trafic routier, un mélange hydrocarboné sera stable ou aura tendance à fluer.

L'essai consiste à compacter à chaud dans un moule cylindrique de 10 cm de diamètre, par 50 coups de dame sur chaque face, une éprouvette, cylindrique de 63mm de hauteur ; cette éprouvette est portée à 60°C.

Après séchage l'éprouvette est écrasée, sous presse Marshall à une vitesse de 0,86mm/s.

La pression est appliquée au moyen d'une tête spéciale suivant la génératrice de l'éprouvette, et on mesure la pression maximale appelée stabilité Marshall ainsi que la déformation de l'éprouvette correspondant à la pression maximale.

Cet essai est applicable à tous les enrobés à chaud ne comportant pas des dimensions supérieures à 20mm

Les spécifications concernant l'essai Marshall (NF P-251-2) sont données par le tableau 3 suivant :

IV.5.1.2. Appareillage :

L'essai Marshall nécessite :

- Des moules de compactage comportant chacun une base, un corps de moules, une hausse ; s'adaptent aux deux extrémités du corps de moules.
- Des pistons extracteurs de diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du moule.
- Une dame de compactage comportant un marteau pesant (4536 ± 5) g. Ce marteau coulisse librement sur une tige de guidage en chute libre de $(457 \pm)$ mm sur la base de la dame.
- Un bloc support de moules en chaîne dont les dimensions sont les suivantes : largeur 300 mm, longueur 300 mm, hauteur 450 mm. Ce bloc est muni de deux boulons avant pour le calage du moule.
- Des mâchoires d'écrasement, chacune étant composée de deux demi-mâchoires ayant un rayon de courbure intérieur compris entre (50.9 et 51 mm).
- Un dispositif des mesures de fluage à 0.1 mm près.
- Une presse à avancement moyen à vide réglée à la vitesse de $(0,85 \pm 0,1)$ mm/s, équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort au cours de l'essai.

- Un bain thermostatique.

IV.5.1.3. Fabrication de l'enrobé :

IV.5.1.3.1.Préparation des prises d'essais :

Cette opération consiste à:

- Prélever chacun des granulats entrant dans la composition de l'enrobé à partir des lots de granulats secs parfaitement homogénéisés. La quantité prélevée doit permettre de confectionner une gâchée de 6 Kg.
- Préparer dans un récipient métallique, la quantité de liant nécessaire à l'enrobage de cette gâchée plus ou moins 5% environ (prendre en compte la quantité qui va coller aux parois du récipient) .
- Au moment du malaxage, pour les enrobés à chaud à base de bitume pur, les températures des granulats, du bitume et du matériel sont définies comme suit :

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

- Placer tous les granulats y compris le filler dans un récipient. L'ensemble devra séjourner au moins 4heures dans une étuve à la température de malaxage définie plus haut.
- Les différents matériels, cuve de malaxeur, récipients, moule de compactage, pistons doivent être mis à la même température et cela s'effectue par un séjour minimal de 2 heures à l'étuve.
- Effectuer le chauffage du liant à la température de la mise en œuvre.

IV.5.1.3.2. Malaxage :

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

IV.5.1.3.3.Remplissage du moule de malaxage :

Le remplissage des moules s'effectue comme suit :

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

- Pour assurer un bon état de surface latérale de l'éprouvette et pour éviter une dispersion trop grande des résultats, introduire la spatule (chauffée préalablement à la température de malaxage) le long de la paroi du moule et effectuer environ 30 fois un mouvement de haut en bas, en décrivant trois fois le tour et ceci sur toute la hauteur de l'enrobé.
- Assurer le surfaçage supérieur à l'aide du piston extracteur chaud, en faisant pivoter celui-ci trois ou quatre fois au contact de l'enrobé.
- La dame étant maintenue perpendiculairement au moule, le mélange est compacté en appliquant 50 coups de marteau de la dame en (55 ± 5) s. Le moule est retourné après avoir retiré la hausse afin de présenter la face inférieure de l'éprouvette au compactage. L'opération précédente est renouvelée pour chaque éprouvette.
- La durée de compactage ne doit pas excéder trois minutes.
- Le moule est placé pendant au moins quinze minutes, sous un jet circulaire d'eau froide maintenue de telle façon qu'on ne mouille pas l'éprouvette. Le moule est conservé une heure au moins à température ambiante ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) avant démoulage.
- Le démoulage est effectué en faisant passer l'éprouvette du moule dans la hausse à l'aide d'un piston extracteur.

IV.5.1.3.4. Mode opératoire :

- Après démoulage, les éprouvettes sont pesées à 1g près. Les dimensions des éprouvettes sont mesurées à 0.1 mm près, en trois zones différentes.
- La masse volumique apparente M. V. A. est calculée à partir des mesures géométriques.
- On effectue des pesées hydrostatiques pour déterminer la masse volumique apparente.
- Si le M.V.A d'une éprouvette s'éloigne de la masse volumique apparente moyenne des éprouvettes de $\pm 2\%$, la série est rejetée. Pour chaque éprouvette la moyenne des mesures de hauteurs doit être comprise entre (62.5 et 65) mm avec une tolérance pour chaque mesure de ± 1.5 par rapport à la moyenne, sinon la série est rejetée ;
- Les éprouvettes sont conservées 5 heures au moins à température ambiante après le compactage.
- Les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement sont immergées dans l'eau à $(60 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant (30 ± 1) minute.
- Les éprouvettes sont placées dans les mâchoires d'écrasement. L'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression. La vitesse du plateau de l'essai est réglée à (0.85 ± 0.1) mm/s. Ces opérations doivent être réalisées en moins d'une minute.

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

IV.5.1.3.5. Expressions des résultats:

$$MVRg = \frac{100}{\frac{P1}{MVRg1} + \frac{P2}{MVRg2} + \dots + \frac{Pn}{MVRgn}}$$

MVRg : masse volumique réelle du mélange.

Pi : pourcentage en poids des différentes fractions du mélange.

MVRgi : masse volumique réelle des différentes fractions du mélange.

$$MVR = \frac{100 + P1}{\frac{100}{MVRg} + \frac{P1}{MVR1}}$$

MVR : masse volumique réelle de l'enrobé.

P1 : pourcentage en poids du liant.

MVR1 : masse volumique réelle du liant.

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

$$V_R = 100 - C \quad V_R : \text{pourcentage des vides .}$$

- La stabilité Marshall est exprimée en déca-newton (daN).
- Le fluage Marshall est exprimé en dixième de mm (1/10 mm).

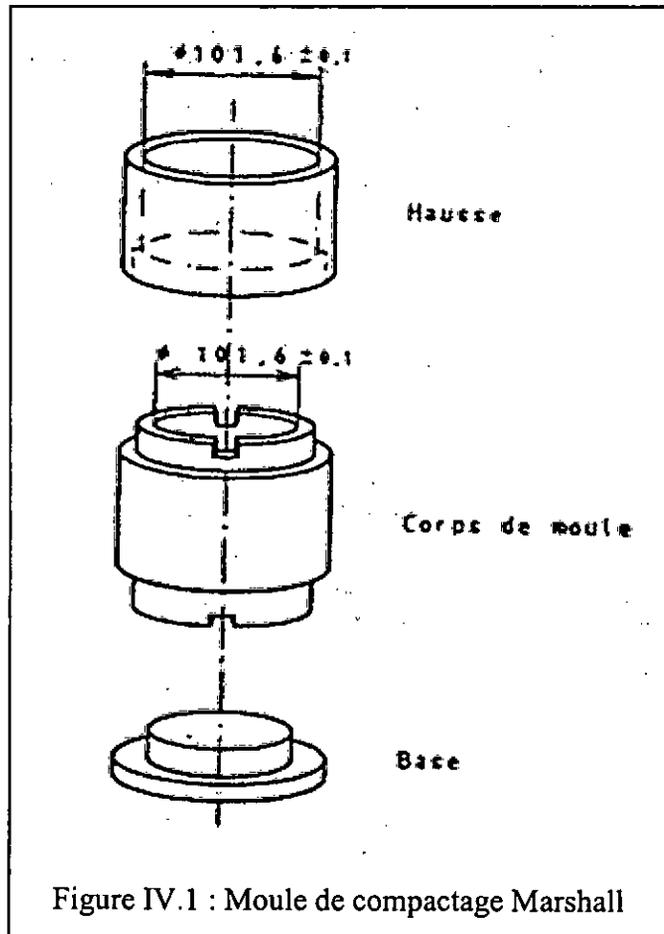
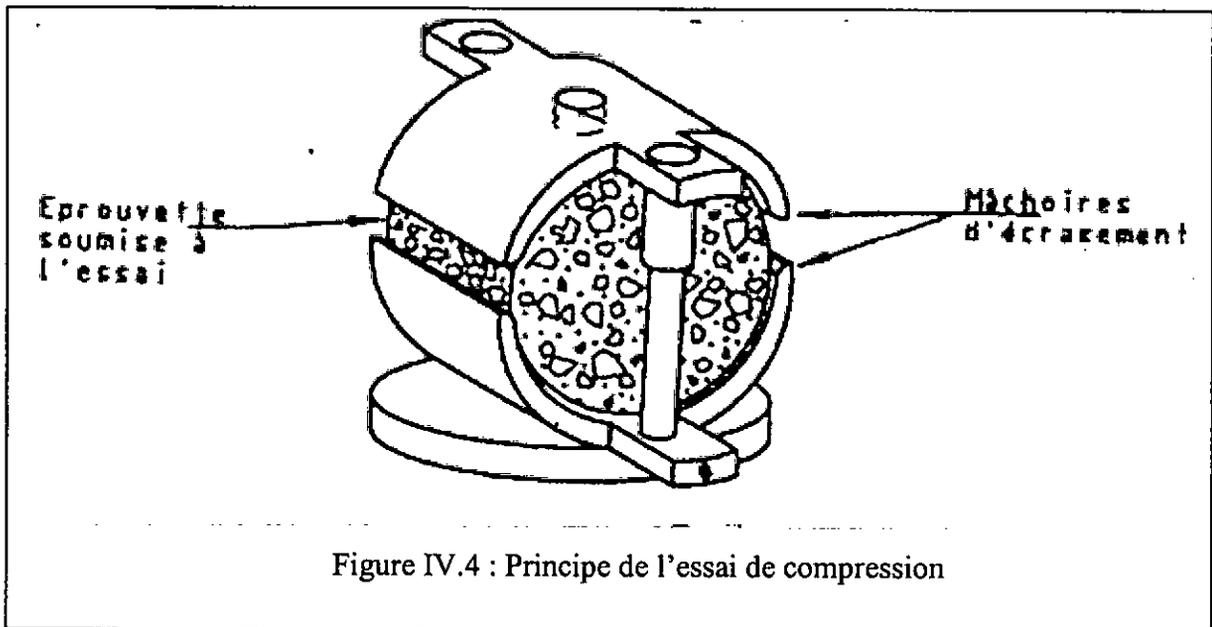
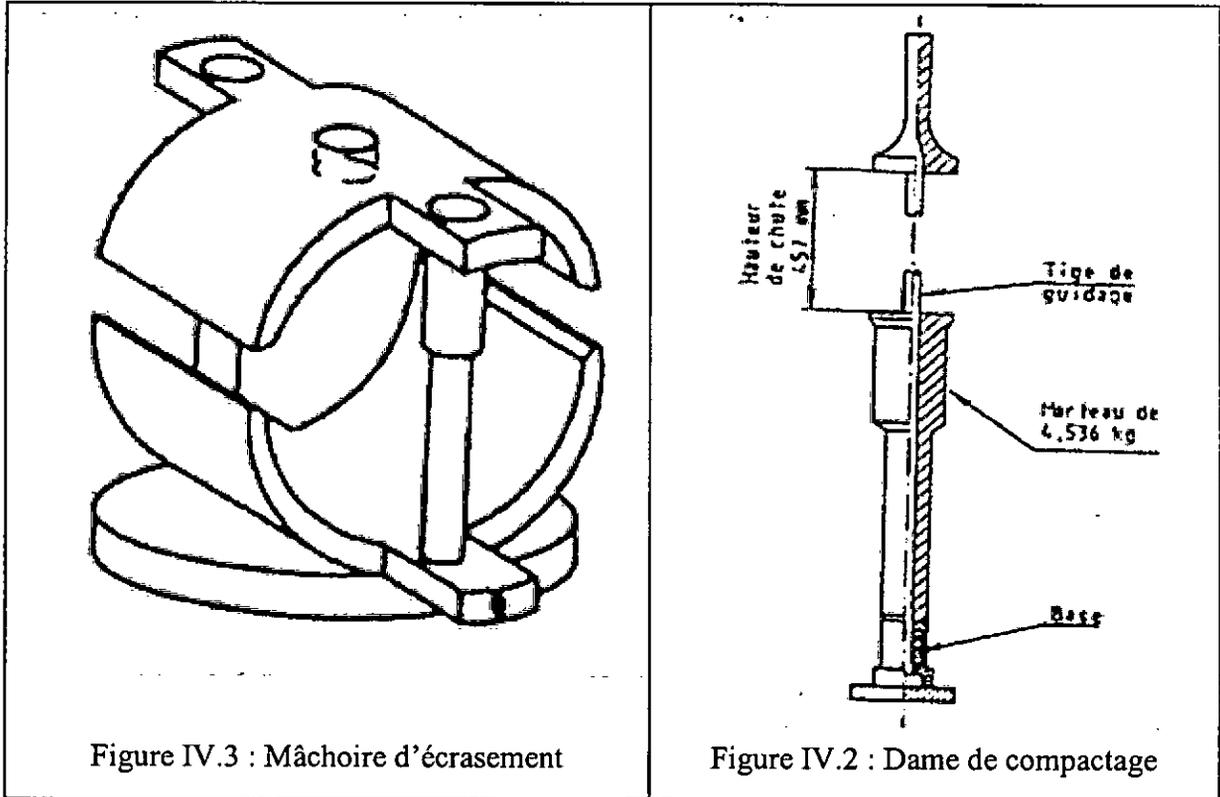


Figure IV.1 : Moule de compactage Marshall



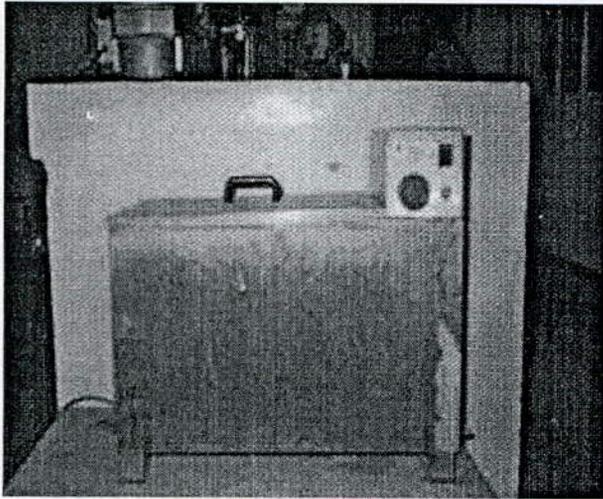


Figure IV.9 : Bain thermostatique

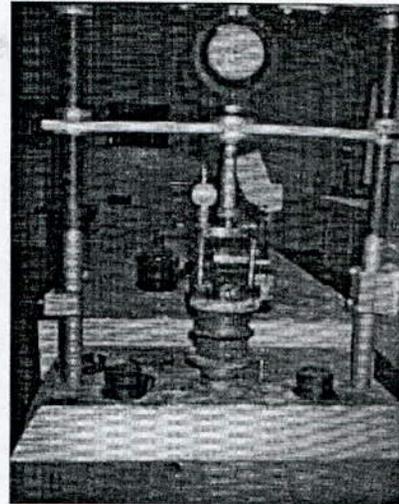


Figure IV.10: Presse d'écrasement à
avancement constant avec l'éprouvette
MARSHALL en place



Figure IV.5: Malaxeur

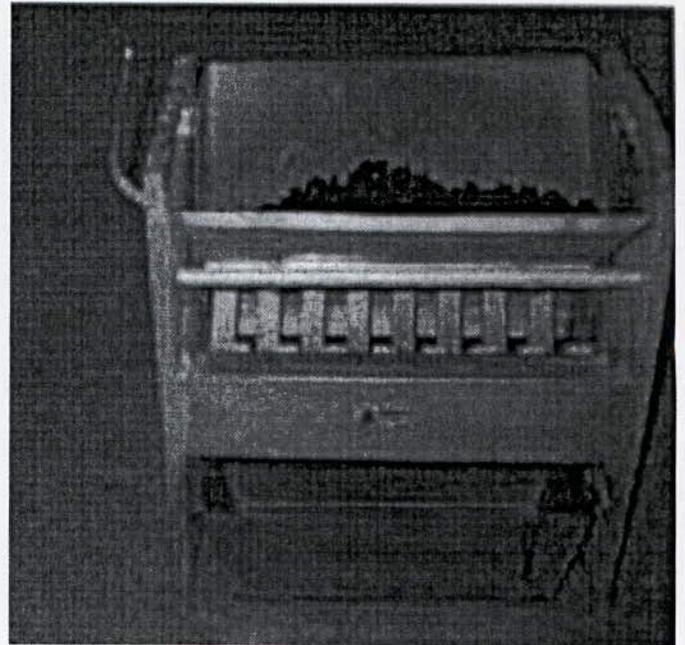


Figure IV.6 : Echantillonneur



Figure IV.8: Compactage des éprouvettes



Figure IV.7 :Remplissage des moules

IV.5.2.Essai Duriez :

IV.5.2.1. Généralités :

IV.5.2.1.1. Définition :

L'essai Duriez a pour but de déterminer, pour une température et un compactage donnés, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud à partir du rapport des résistances à la compression avec et sans immersion des éprouvettes. Il permet également de déterminer le pourcentage de vides du mélange hydrocarboné dans les conditions de compactage définies et d'appréhender une forme de susceptibilité thermique.

IV.5.2.1.2. Principe de l'essai :

Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai sont fabriquées par compactage statique à double effet. Deux éprouvettes sont destinées à la mesure de la masse volumique par pesée hydrostatique pour calculer le pourcentage des vides.

Les autres éprouvettes sont soumises à l'essai de compression après conservation dans les conditions définies : à l'air pour certaines éprouvettes, en immersion pour d'autres.

L'essai se pratique généralement à 18 °C ; cependant il peut être aussi réalisé à trois températures : à 0°C, 18°C et 50°C, pour permettre d'appréhender une forme de susceptibilité thermique du mélange hydrocarboné.

IV.5.2.1.3. Appareillage :

Moules :

- Dans notre cas le mélange hydrocarboné est constitué de diamètre $D < 15$ mm : un minimum de 12 moules métalliques cylindriques de diamètre intérieur (80 ± 0.1) mm et de hauteur minimale de 190 mm et des pistons de diamètre extérieur (79.8 ± 0.05) mm.

Presse :

- Une presse permettant le compactage à double effet et le maintien :

- d'une charge de 60 KN pendant 5 minutes sur chaque éprouvette pour les mélanges hydrocarbonés dont les granulats ont un diamètre $D < 15$ mm.

- Une presse vitesse d'avancement moyen à vide réglée à la valeur de (1 ± 0.1) mm/s équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort en cours d'essai.

IV.5.2.1.4. Préparation des éprouvettes :

IV.5.2.1.4.1. Remplissage des moules :

- Le prélèvement est de 1000g dans le cas des mélanges hydrocarbonés de diamètre $D < 14$ mm.

- Le prélèvement est introduit en une seule fois dans le moule.
- Les moules sont ensuite introduits dans une étuve réglée à la température de référence, et doivent y séjourner entre une demi heure et deux heures.

IV.5.2.1.4.2. Compactage des éprouvettes :

- Le compactage des éprouvettes doit être réalisé par double effet. Les opérations doivent être menées de manière à éviter au maximum les déperditions de température.
- La charge appliquée doit être atteinte en 60s maximum et maintenue entre 300s et 305s .Au bout de ce temps, la mise en charge est interrompue.
- Les éprouvettes sont démoulées après retour à la température ambiante (durée minimale 4heures).

IV.5.2.1.4.3. mode opératoire:

- Après démoulage, les éprouvettes numérotées sont pesées à 1g près, la hauteur et le diamètre sont mesurés à 0.1 mm près, en trois zones différentes. En calculant ensuite la masse volumique apparente M.V.A, à partir des mesures géométriques.
- A partir des MVA, les éprouvettes sont réparties en trois lots homogènes.
 - o Deux éprouvettes sont destinées à la mesure des masses volumiques apparentes hydrostatiques.
 - o 5 éprouvettes sont destinées à la conservation sans immersion dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D < 14$ mm.
 - o Les éprouvettes restantes sont destinées à la conservation en immersion.
- Conservation des éprouvettes: durant les premières 24 heures après fabrication, les éprouvettes sont conservées à température ambiante (15 à 25 °C) sur une surface plane.
- Conservation sans immersion: après les premières 24 heures, les éprouvettes sont conservées à (18 ± 1) °C et dans une ambiance à (50 ± 10) % d'humidité relative pendant 7jours.
- Conservation avec immersion: après les premières 24 heures, les éprouvettes sont soumises à un traitement de dégazage. Pendant 1heure, les éprouvettes sont soumises à une pression résiduelle de 350mmHg. Ensuite, l'eau est introduite jusqu'à immersion complète des éprouvettes tout en maintenant la pression résiduelle de 350mmHg. Les éprouvettes sont maintenues immergées pendant 2 heures sous la même pression.

A la fin de cette opération, les éprouvettes sont essuyées légèrement et pesées. Après cette pesée, les éprouvettes sont immergées dans de l'eau à (18 ± 1) °C pendant 7jours.

- Essai de compression simple :

8 jours après avoir confectionné les éprouvettes, elles seront soumises à l'essai de compression, qu'elles aient été conservées avec ou sans immersion. La vitesse du plateau de la presse est réglée à (1 ± 0.1) mm/s. La résistance à la compression simple est déterminée à partir de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette d'essai.

IV.5.2.1.5. Expression des résultats:

IV.5.2.1.5.1. Résistance en compression:

La résistance à la compression simple à une température donnée, avec ou sans immersion, est le rapport de la charge maximale à la section circulaire des éprouvettes. Elle est exprimée en méga pascals et représente la moyenne de quatre ou cinq mesures suivant la dimension D du mélanges hydrocarboné soumis à l'essai.

On établit également le rapport de la résistance avec immersion « r » à la résistance sans immersion « R » ; le rapport r/R est exprimé avec des chiffres significatifs.

IV.5.2.1.5.2. Calcul du pourcentage des vides:

- Pourcentage des vides : $V\% = 100 \left\{ 1 - \frac{MVA}{MVR} \right\}$

2

MVA : masse volumique calculée par pesée hydrostatique.

MVR : masse volumique réelle du mélange hydrocarboné.

-masse volumique apparente des granulats dans l'éprouvette (MVAg) :

$$MVAg = MVA \left[1 - \frac{TL}{100 + TL} \right]$$

TL : teneur en liant.

-pourcentage des vides occupés par l'air et le liant (V0%) :

$$V0\% = \frac{MVRg - MVAg}{MVRg} \times 100$$

MVRg : masse volumique réel des granules.

- pourcentage des vide comblés par le liant (VL) :

$$VL = \frac{V0\% - V\%}{V0\%} \times 100$$

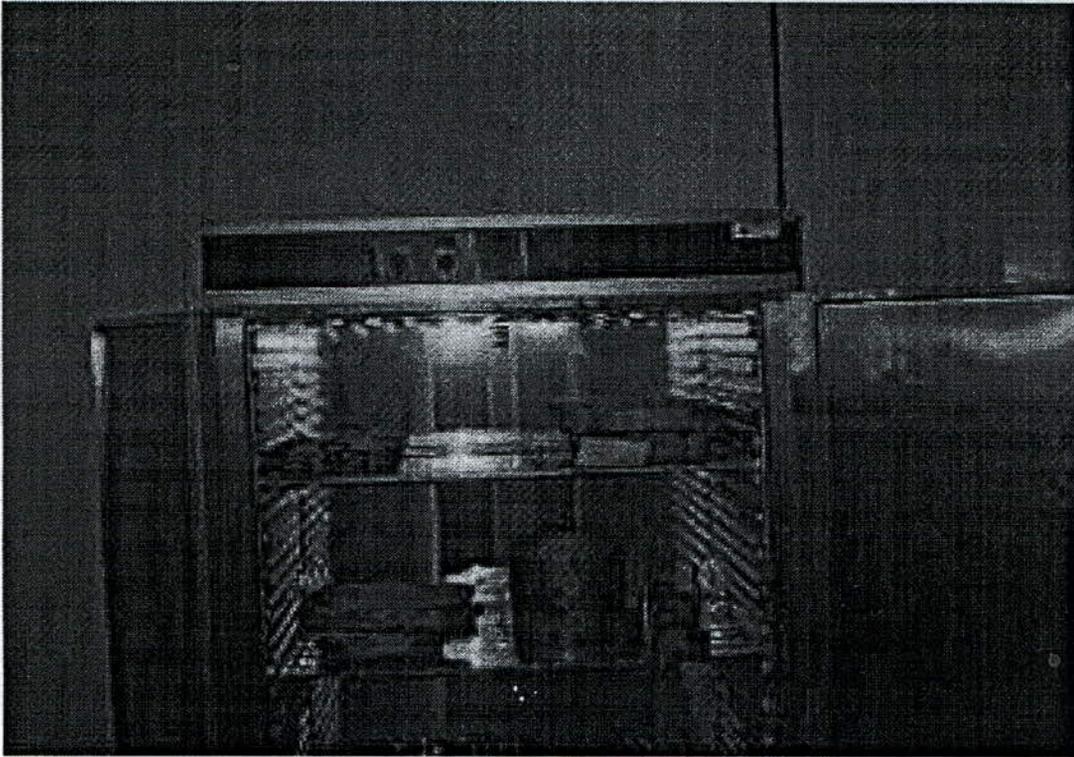


Figure IV.11: Etuve contenant des gâchées maintenues à la température de 160°C

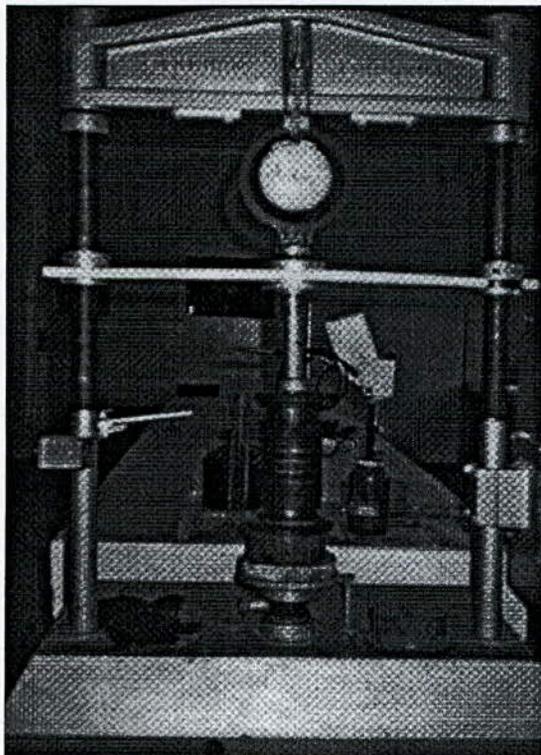


Figure IV.12: Compactage statique à double effet de l'éprouvette DURIEZ

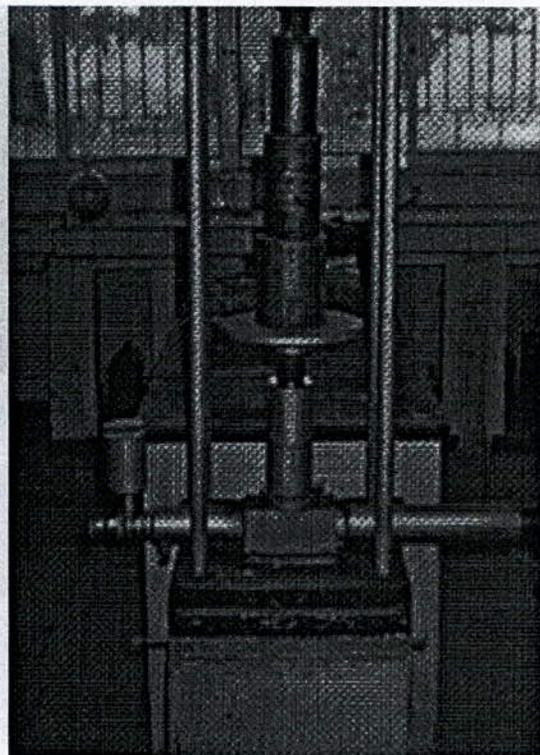


Figure IV.13 : Démoulage de l'éprouvette DURIEZ

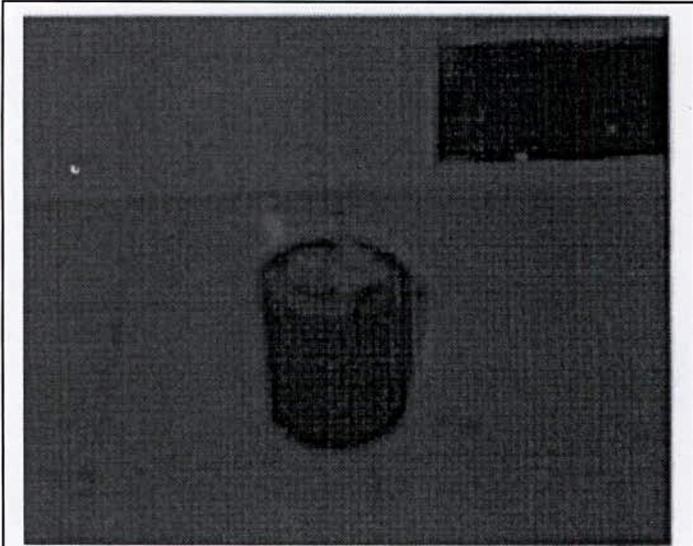


Figure IV.14: Epreuve DURIEZ

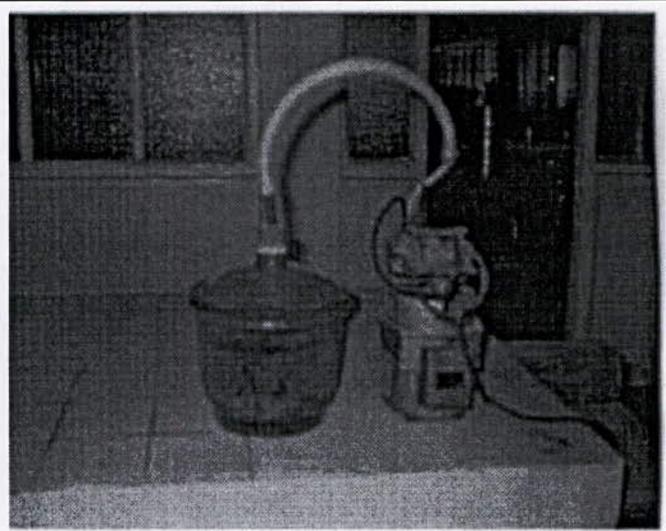


Figure IV.15: Dégazage des épreuves

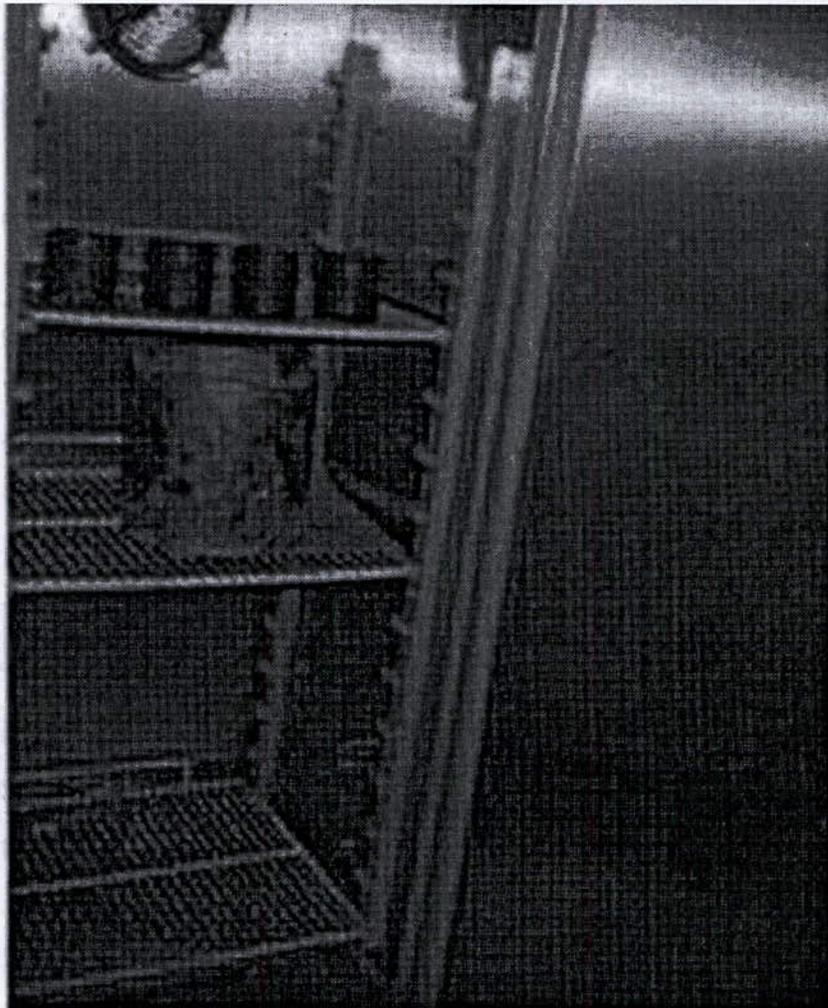


Figure IV.16: Conservation des épreuves DURIEZ à 18°C

IV.5.3. Essai de traction indirecte répétée au NAT :

IV.5.3.1. Principe de l'essai

Le principe de l'essai de traction indirecte répétée (figure VI.17) 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 :

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

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

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.

ν : coefficient de Poisson

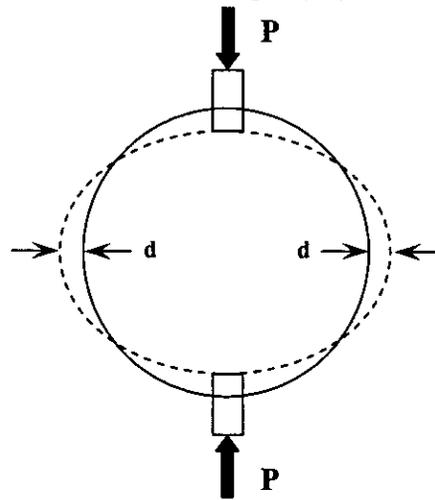


Figure IV.17: Déformation d'une éprouvette Essai de traction indirecte NAT

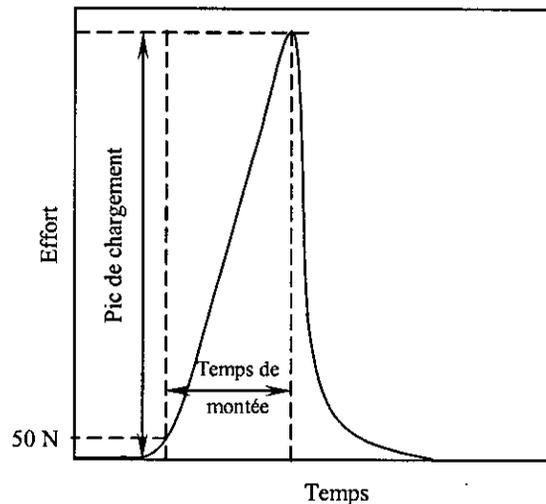


Figure IV.18 : Evolution de l'effort de déformation en fonction du temps.

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 VI.18) 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 qui est de 0,35 à 20°C et de 0,25 à 10°C.

IV.5.3.2. Matériel utilisé :

La (figure VI.19) 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

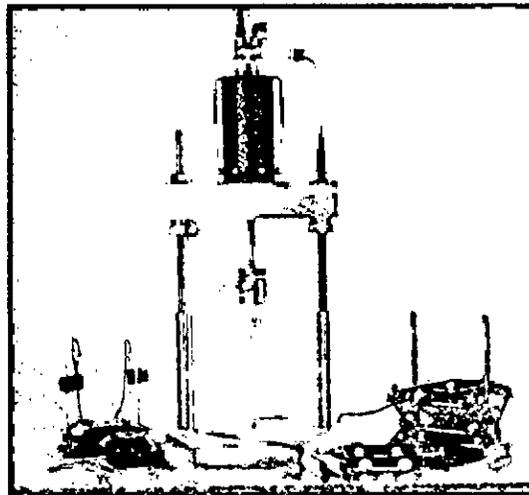
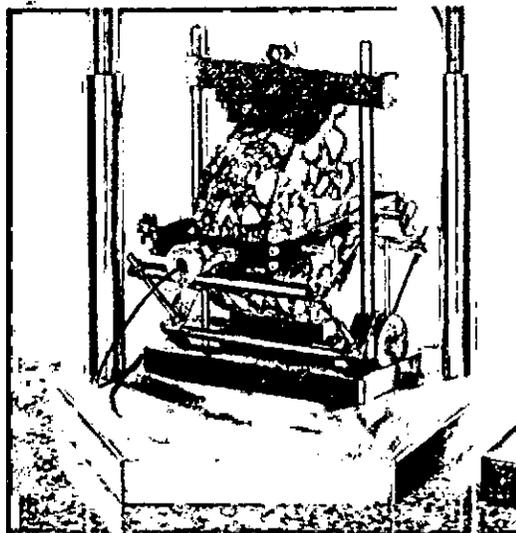
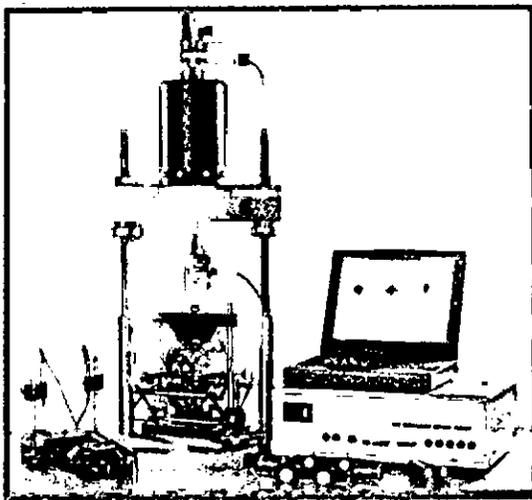


Figure IV.19 : Matériel utilisé dans l'essai de traction indirecte répétée au NAT

l'épaisseur), le niveau de déformation de traction 5 à 10 microns, le temps de montée en charge 60 à 160 milli secondes ainsi que le coefficient de poisson sont des saisies comme données d'entrée.

Les éléments constitutifs du système de montage de l'éprouvette et des capteurs de déformation sont représentés par les figures 24 et 25. 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.

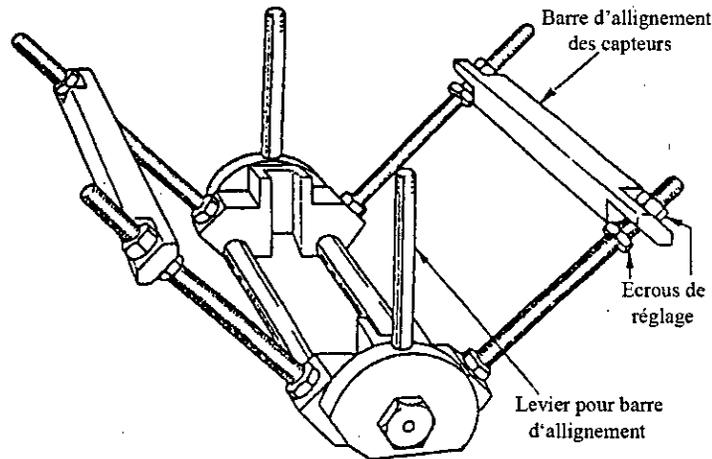


Figure IV.20 : Dispositif de montage de l'éprouvette

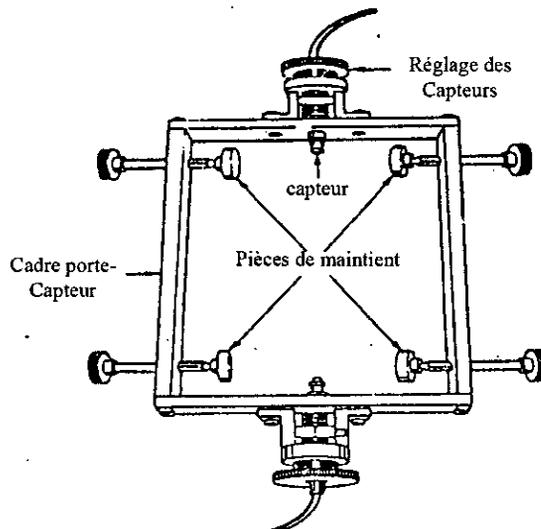


Figure IV.21 : Capteurs de déformation

IV.6. AUTRES ESSAIS POUVANT ETRES EFFECTUES SUR BETONS BITUMINEUX

IV.6.1. Essai de fluage en compression simple sous charge constante :

Cet essai consiste à soumettre une éprouvette d'enrobé à une charge constante et à mesurer sa déformation en fonction du temps.

Sur une éprouvettes cylindriques de section S et de hauteur H , on applique une force F (Figure VI.22). L'éprouvette se déforme sous l'action de cette charge et on enregistre la réduction de hauteur ΔH en fonction du temps.

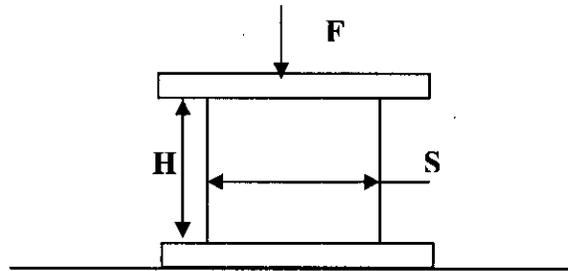


Figure VI.22: essai de fluage en compression simple

Les deux bases de l'éprouvette doivent être bien parallèles et lubrifiées pour éviter les efforts parasites.

L'élancement des éprouvettes est voisin de 1, c'est-à-dire que le diamètre de la base est sensiblement égal à la hauteur H. Généralement le diamètre est égal à 8 cm.

La force F de 500 N, la pression appliquée est très voisine de 10^5 Pa .

La température de l'essai est fixée à 40°C .

On mesure la déformation à des temps prédéterminés, à savoir $t = 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 600, 900 \dots$ secondes.

IV.6.1.1 Exploitation des résultats :

Tous les enrobés ont à peu près le même comportement caractérisé par une croissance rapide de ϵ au départ de l'essai, puis par une période de croissance lente ou modérée, enfin par une rapide augmentation de ϵ au voisinage de la rupture (Figure VI.23). Cette dernière partie n'est pas toujours atteinte au cours de l'essai.

Les parties de la courbe de fluage qui sont généralement prises en compte pour l'étude de fluage sont la première et la seconde.

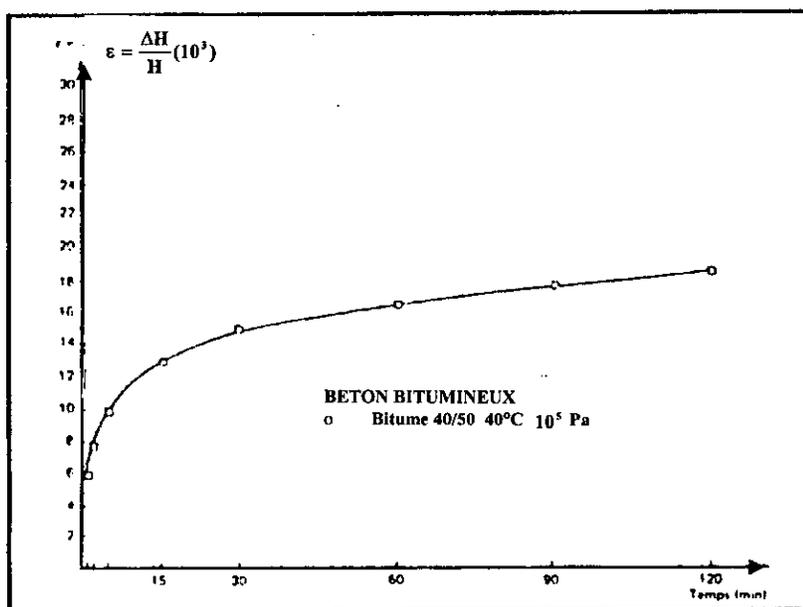


Figure IV.23 : Variation de la déformation relative en fonction du temps.

IV.6.1.2. L'essai de traction indirecte:

Cet essai est aussi essai de compression diamétrale ou essai brésilien.

L'éprouvette a une forme cylindrique de rayon r et de hauteur h . L'axe de l'éprouvette est horizontal et les deux plateaux d'une presse exercent une compression dans le sens d'un diamètre vertical.

Le contact entre les plateaux et l'éprouvette se fait par l'intermédiaire de deux plaques de façon à répartir l'effort de compression pour ne pas amorcer la rupture au voisinage des zones de contact (Figure VI.24).

Au sein de l'éprouvette se développent, lors de l'essai, des contraintes de traction et également de compression.

Si le matériau est linéairement élastique, il en résulte, sur le plan diamétral vertical, des contraintes normales de traction.

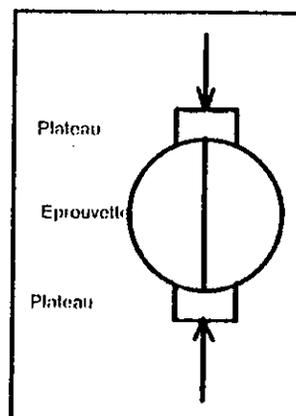


Figure IV.24: principe de l'essai brésilien.

L'essai brésilien repose sur les hypothèses suivantes :

- o Le comportement est élastique linéaire jusqu'à la rupture.
- o Il existe une courbe intrinsèque, régissant le phénomène de rupture, ayant une forme assez particulière pour que la rupture se produise dans la zone centrale sous l'effet de la seule contrainte de traction.

En comparant les essais de traction directe et de traction brésilienne, on peut faire la remarque suivante (Figure IV.25) :

- o À la même vitesse de la presse, l'essai brésilien donne un temps de charge beaucoup plus long que l'essai de traction directe, des résistances à la rupture quelquefois voisines et

souvent bien plus fortes, une vitesse de déformation, en traction, sans doute nettement plus faible.

- o À même temps de charge, l'essai brésilien fournit toujours une résistance plus élevée, surtout à température élevée.

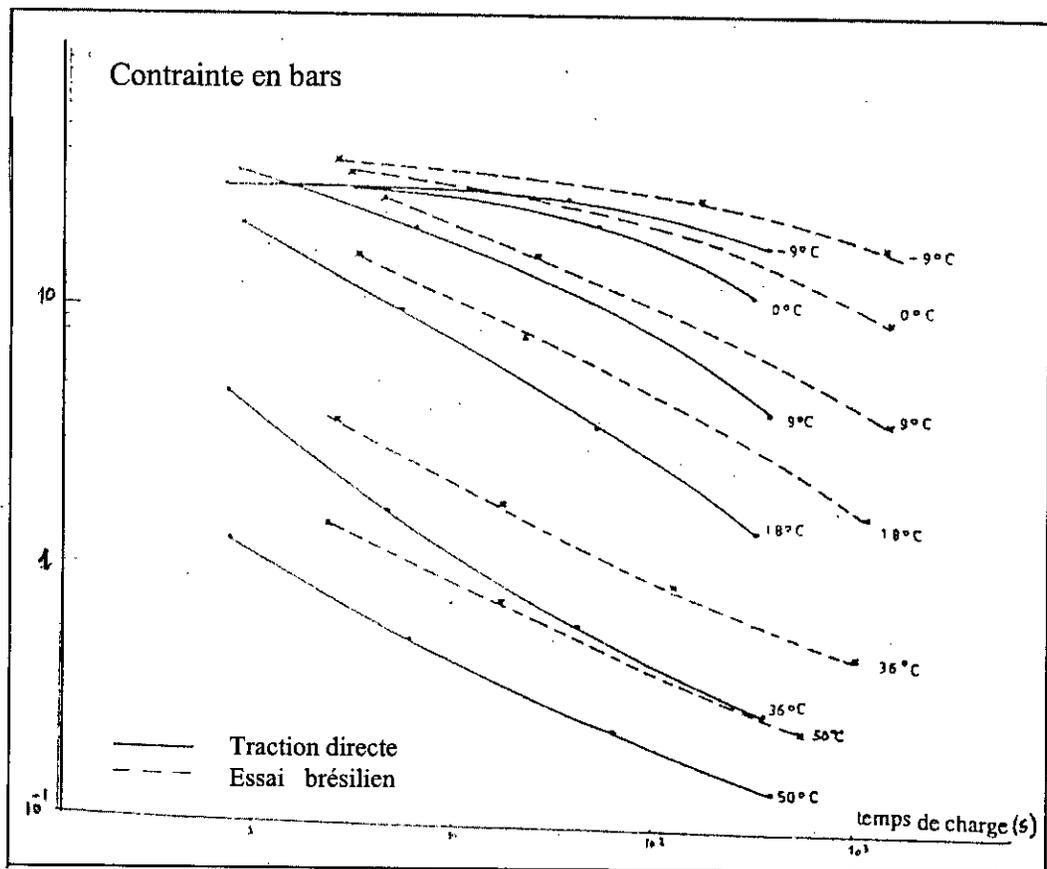


Figure IV.25: contrainte à la rupture en traction à vitesse de déformation imposée.

IV.6.1.3. Essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG):

L'essai PCG a été créé pour étudier l'aptitude au compactage des mélanges hydrocarbonés. Il permet d'estimer la teneur en vides, en fonction de l'épaisseur, que l'on pourra obtenir in situ.

L'enrobé est enfermé dans un moule cylindrique dont l'axe décrit un cône pendant l'essai (Figure VI.26). la forme de l'éprouvette est un cylindre oblique a ses cercles de base parallèles dont l'un est fixe et l'autre décrit un cercle.

Les valeurs des deux principaux paramètres imposés pendant l'essai sont :

- l'effort vertical de compression qui permet d'obtenir une pression verticale moyenne appliquée de 0.6 MPa ;
- l'angle d'inclinaison ϕ qui est de 1° ;

Par ailleurs, la température est régulée pendant l'essai et la vitesse de rotation est fixée à 6 trs/minute. Le diamètre des moules est de 160 mm et la hauteur de l'éprouvette finale avoisine les 150 mm.

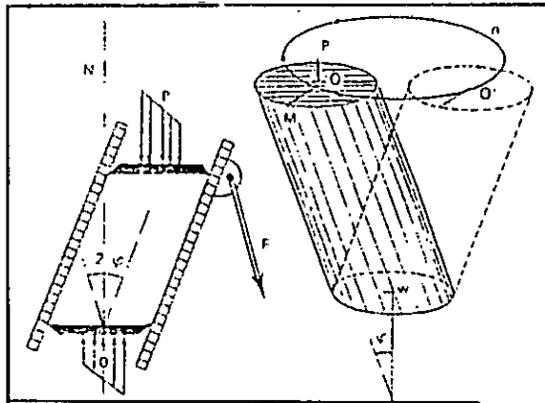


Figure IV.26: Principe de compactage à la presse à cisaillement giratoire.

Au cours de l'essai, en mesure :

- la diminution de la hauteur de l'éprouvette, ce qui permet de connaître le pourcentage des vides V (%) en fonction du nombre n de tours (Figure VI.27).
- l'évolution de la force d'inclinaison F qui est l'effort nécessaire pour maintenir l'angle ϕ constant et égal à 1° (si F devenait nulle, le moule reprendrait une position verticale).

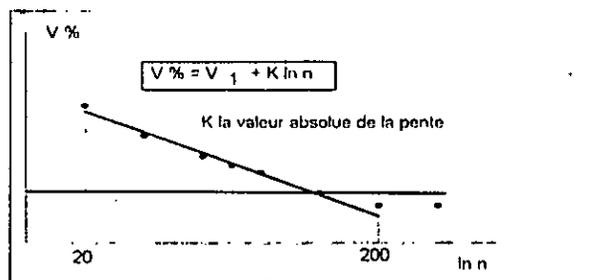


Figure IV.27: variation de la teneur en vides avec le nombre de giration

L'essai est automatiquement après 200 tours. À titre indicatif, il faut une demi-journée, pour effectuer quatre répétitions.

IV.6.1.4.utilisation de la PCG:

L'épaisseur de la couche d'enrobé étant une donnée commune du formulateur, celui-ci se fixe a priori un objectif de compacité in situ en fonction du type de l'enrobé, du trafic, de la

région. C'est ainsi que l'on cherchera une teneur en vide de l'ordre de 3 à 4 % pour un enrobé devant être soumis à de fortes sollicitations hivernales (par exemple une route dans une montagne). L'objectif sera un peu différent pour un enrobé mis en œuvre dans une région chaude avec la nécessité de formuler un mélange plus raide, conduisant à des teneurs en vides de l'ordre de 6 à 7 %.

IV.6.2. Fatigue des enrobés bitumineux :

IV.6.2.1.Introduction :

Si un matériau est soumis à des contraintes répétées pendant un certain temps, il se peut qu'il y ait fissuration, même si la valeur de la contrainte est nettement plus faible que celle qui provoque la rupture en traction. Ce phénomène est désigné par « fatigue ». Chaque sollicitation endommage le matériau en diminuant sa résistance. La fatigue est donc un endommagement engendré par la répétition des sollicitations.

En 1852, WÖHLER a effectué les premières études fondamentales de fatigue sur les métaux et, après quinze années, a réussi à présenter la loi principale de fatigue. La majeure partie des études de fatigue ont été faites sur les métaux et, dans ce domaine, on dispose d'importantes connaissances. Tandis que pour les matériaux granulaires, la prise en considération de la fatigue est venue beaucoup plus tard, et jusqu'à l'heure actuelle elle est d'actualité.

IV.6.2.2. Fatigue des enrobés :

C'est en 1942 que les premières constatations des fissures de fatigue des chaussées souples ont été observées. C'est dans les années 1950 que ce phénomène a été pris en compte dans le dimensionnement des chaussées.

Sous le trafic, l'enrobé est sollicité de façon discontinue puisque le passage des essieux avant et arrières est interrompu par des périodes de repos.

Les couches bitumineuses subissent à leur base, du fait du trafic, des arrangements répétés générateurs de dommages de fatigue.

La résistance à la fatigue détermine le moment où la rupture par fissuration se produit. Cette fissuration peut commencer en bas ou à la surface de la couche d'enrobé.

Un revêtement de chaussées doit supporter le trafic et répartir les efforts mécaniques sur le terrain de fondation. Des dégradations peuvent apparaître à la surface du tapis de roulement telles que des déformations localisées, ornières ou fissures. La plupart de ces défauts sont engendrés par des contraintes qui dépassent localement la résistance mécanique du matériau. Ces déformations sont également liées à des insuffisances dans le dimensionnement ou à des manques de stabilité des matériaux qui composent ces revêtements.

On considère, en général, que l'apparition de la déformation permanente, avec les applications de charge, correspond, avant tout, à un phénomène de fluage.

Rappelons très succinctement les constatations faites par certains auteurs.

F.BONHAUR, A.HUIBER, A.BOONDER remarquent que :

- les temps de repos ont un effet bénéfique sur la durée de vie. Cet effet s'amortit avec l'allongement des périodes de repos.
- l'élévation de la température accroît cet effet.
- les bitumes mous augmentent cet effet.

R.GODDARD et W.D. POWEL ont mis en évidence les observations suivantes :

- un matériau, à teneur en liant moindre, offre une bien moins grande résistance à la fissuration due à la fatigue.
- des modifications de la teneur en vide, dues soit à un compactage, soit à une teneur en liant différente, exercent une forte influence sur la rigidité.
- la température d'essai en laboratoire influe sur le comportement à la fatigue des matériaux bitumineux étudiés à contrainte imposée.

P.UGE et P.J.VANDELOO remarquent que la résistance aux déformations permanentes des enrobés bitumineux est améliorée par :

- l'augmentation du frottement interne du squelette minéral.
- l'utilisation des granulats anguleux, en particulier dont les éléments sont fins.
- l'emploi d'une courbe granulométrique choisie en fonction des travaux à faire.
- le choix d'une teneur en filler adaptée à l'ensemble de la courbe granulométrique.
- la diminution de l'épaisseur des films de liant :
 - o teneur en liant faible,
 - o surface spécifique des granulats importante.
- l'augmentation de la viscosité des liants, à haute température, en choisissant :
 - o Des bitumes purs,
 - o des bitumes à faible susceptibilité thermique.

P.UGE, A.GRAVOIS et J.N.LEMAITRE ont tiré des conclusions suivantes :

- le nombre de répétitions de charges, conduisant à une fissuration du matériau, dépend essentiellement de l'effort appliqué.
- les contraintes admissibles pour garantir 10^6 répétitions de charges sont d'autant plus grandes que le liant est rigide.
- des enrobés denses sont à préférer dans la plupart des cas.
- une compaction énergétique est toujours favorable.

S.F.BROWN note qu'aux températures élevées, une teneur en liant plus faible est nécessaire pour réduire la déformation permanente, au détriment d'un compactage légèrement plus faible.

Quel que soit l'appareillage utilisé, l'essai consiste toujours à soumettre un échantillon de matériaux à tester à des sollicitations répétées et identiques qui sont, soit à contraintes imposées, soit à formations imposées.

IV.6.2.3. Essai de fatigue par flexion alternée sur éprouvette trapézoïdale:

A.H.ASSEF-VAZIRI du LAVOC de l'EPFL, a mis au point cet essai dont le but est de déterminer des déformations admissibles pour des durées de vie données en formulant une loi de fatigue.

Comme domaine d'applications, on peut citer :

- Les études de formulation et de comparaisons des enrobés hydrocarbonés.
- Les calculs du dimensionnement des chaussées.
- L'entretien des chaussées.

Les éprouvettes trapézoïdales sont découpées dans des plaques fabriquées en laboratoire prélevées dans la chaussée.

Lors du sciage, il faut apporter une attention particulière au parallélisme et à la planéité des surfaces. Les plaques sont numérotées dans l'ordre de fabrication (Figure VI.28).

Les éprouvettes ont les dimensions suivantes :

- hauteur de 250 mm.
- épaisseur 25 mm,
- petite base 25 mm,
- grande base 56 mm (pour un diamètre maximal des grains < 20 mm), ou
75 mm (pour un diamètre maximal des grains > 20 mm).

Les éprouvettes sont conservées au moins trois mois à températures ambiantes, à l'abri de la lumière. Elles doivent être stockées sur une surface totalement plane et rigide.

Les choix des éprouvettes sont basés sur des critères :

- homogénéité et représentativité en compacité,
- homogénéité de la géométrie caractérisée par le facteur K_g (K_g est un coefficient ne dépendant que des dimensions des éprouvettes).

Des conditions de l'étude sont simplifiées et consistent en une limitation du niveau de sollicitation, une diminution du nombre de répétitions par niveau de sollicitations, et l'exécution de l'essai à une seule température et à une seule fréquence. Différentes études montrent que la relation entre la déformation et la durée de vie est indépendante de la température et de la fréquence.

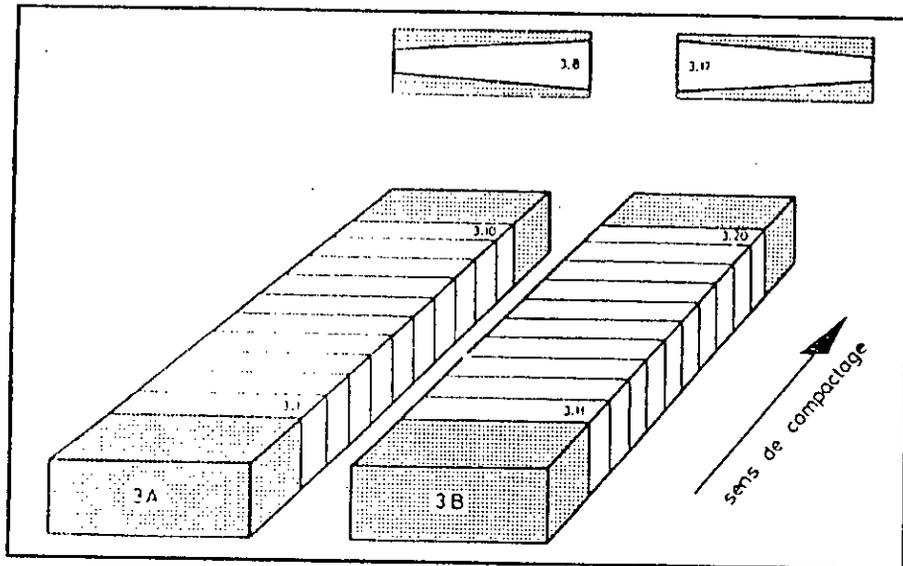


Figure IV.28: Sciage et numérotage des éprouvette.

Les conditions simplifiées sont les suivantes :

- une seule température de +10 °C qui représente la moyenne annuelle de la région (Suisse),
- 5 niveaux de déformations engendrant des durées de vie de l'ordre de 10^4 à 2.10^6 cycles,
- de répétition par niveau de sollicitation,
- une seule fréquence de 25 HZ qui correspond à un temps de charges de 0.026 seconde, équivalant au passage d'un poids lourd à la vitesse de 55 km/h.

On admet comme durée de vie le nombre de cycles au terme desquels le troisième stade de dégradations du matériau («point d'inflexion» de la courbe de l'évolution de la force en fonction du nombre de cycles) est atteint. À plus des 10 °C, ce nombre correspond à peu près au nombre de cycles au terme desquels la force nécessaire pour imposer la déformation constante se réduit de la moitié de sa valeur initiale.

IV.6.2. 4. Essai de compression répétée :

Cet essai est décrit comme suit:

Une éprouvette de forme cylindrique, placée dans une enceinte isotherme, est soumise à une contrainte verticale sinusoïdale de compression, d'amplitude et de fréquence constantes. (Figure IV.29).

$$S_v = S_{v_0}(1 + \sin wt)$$

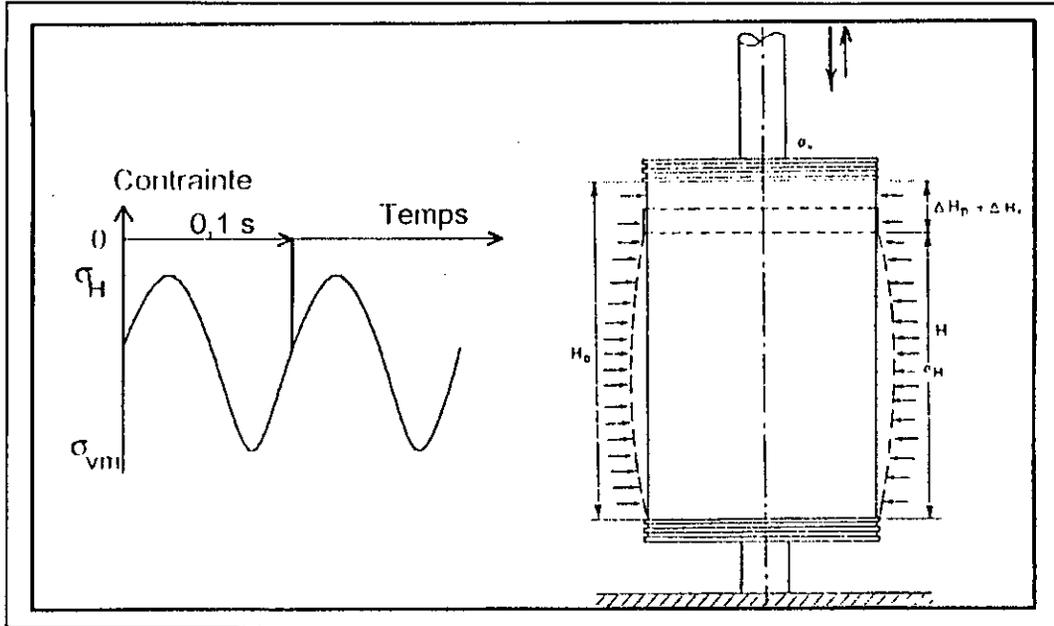


Figure IV.29: Principe de l'essai de compression répétée.

On peut y superposer une contrainte de compression statique et isotrope σ_H . Sous l'effet de ce chargement, l'éprouvette subit une déformation axiale. L'essai est suivi par l'enregistrement

en continu de la grandeur $\epsilon = \frac{\Delta H_p}{H_0}$ en fonction du nombre de cycles de chargements. H_0 et

ΔH_p représentant respectivement la hauteur initiale de éprouvettes et la variation de la hauteur associée à la partie permanente de la déformation .

D'une manière générale, le comportement des enrobés bitumineux, soumis à cet essai, se caractérise par une évolution initiale rapide de la déformation permanente, se ralentissant ensuite progressivement jusqu'à devenir quasi linéaire (Figure VI.30). Si l'essai est poursuivi assez longtemps pour atteindre de grandes valeurs de ϵ , on observe alors une nouvelle accélération de cette évolution, se terminant rapidement par la destruction de l'éprouvette. La courbe obtenue $\epsilon = f(N)$ est exploitée tant en niveau qu'en évolution.

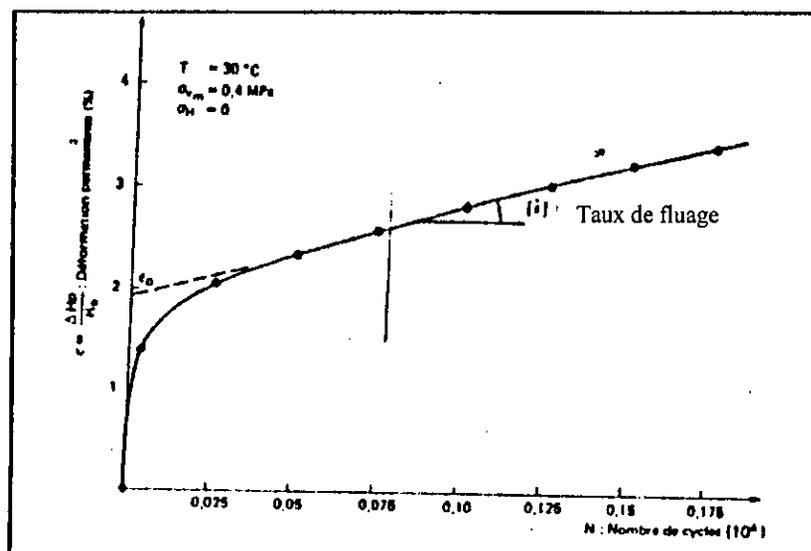


Figure IV.30: Evolution de la déformation permanente en fonction du nombre de cycles de chargement.

L'essai de compression répétée peut-être exploité de diverses façons suivant l'objectif visé.

Dans les études de déformations, il pourra s'agir essentiellement de comparer et de classer différents matériaux selon leur niveau de susceptibilité aux déformations permanentes.

Dans une étude plus approfondie, fondée sur un critère de résistance à l'orniérage, il sera nécessaire de pouvoir prédire quantitativement l'évolution du dommage en déformation permanente pendant une période donnée.

IV.6.2.5. Essai d'orniérage LPC:

L'essai consiste à mesurer l'ornière provoquée par le passage répété d'une roue sur une éprouvette prismatique d'enrobé.

Cet essai est lié à un appareil : l'ornière LPC qui permet d'essayer 2 éprouvettes simultanément à une températures fixée.

L'éprouvette est une plaque de 500× 180 et de 100 mm d'épaisseur. Elle est insérée dans un cadre métallique et repose sur une plaque d'acier ; l'ensemble est alors placé dans l'ornièreur.

Les roues sont équipées de pneumatiques lisses (400 × 8) gonflés à 6.10^5 Pa et chargés à 5000N.

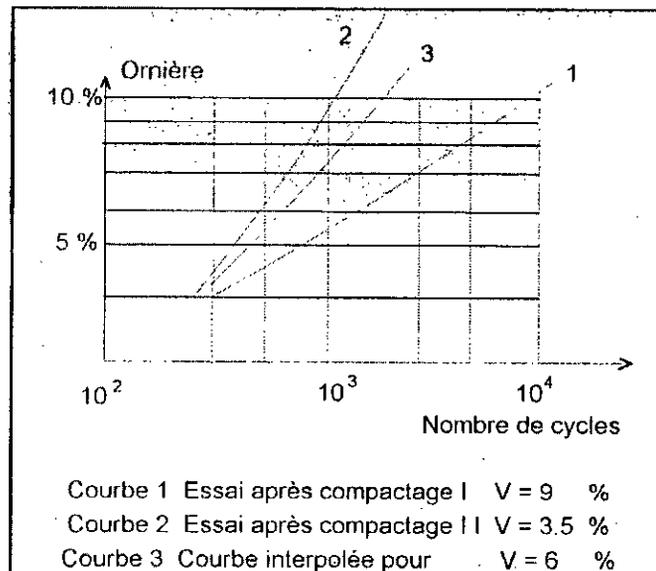
Elles passent deux fois par seconde au centre des éprouvettes qu'elles parcourent d'un mouvement alternatif d'amplitude 205 mm.

La température d'essai choisie est de 60 °C pour les enrobés des couches des surfaces . Cette température est assez élevée car on désire se placer dans les conditions routières les plus défavorables..

L'ornière est, pour une éprouvette, la moyenne de quinze mesures.

L'essai est terminé à 10^5 cycles, à moins que l'ornière ne dépasse 15 %. On l'interrompt après 30,100,300,1000,3000, 100000 cycles pour mesurer l'ornière.

Un exemple est donné à partir des résultats obtenus avec des éprouvettes à compactage fort ($v=3.5$ %) et faible ($v=9$ %) avec l'interpolation à teneur en vide prévue sur chantier ($v=6$ %) (Figure IV.31).



FigureIV.31 : évolution de l'ornière

IV.6.3. Le module complexe :

Les enrobés bitumineux sont des corps visco-élastiques, comme tous les corps de ce type, ils ont des propriétés mécaniques qui dépendent de la durée de la sollicitation qu'ils subissent et de la température à laquelle celle-ci s'exerce.

La caractéristique la plus couramment utilisée pour définir le comportement de tels matériaux est le module complexe.

À l'image de son équivalent élastique (le module de Young), le module complexe opérationnel, déterminé à partir d'un essai dynamique, s'obtient en faisant le rapport entre

La contrainte imposée $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t)$,
 et la déformation résultante $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$,

Qui, à cause du caractère visco-élastique du matériau, accuse un retard sur la contrainte se traduisant par un angle φ .

Le matériau conserve un comportement linéaire, les déformations étant suffisamment petites.

La contrainte et la déformation relative sont reliées par le nombre complexe E^* défini par

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

En notation imaginaire, le module complexe s'écrit donc :

$$E^*(t\omega) = |E^*| e^{i\varphi} = E_1 + iE_2$$

où

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

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

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

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

$\varphi = 0$ pour un corps purement élastique ;

$\varphi = \pi/2$ pour un corps purement visqueux.

Le rapport des amplitudes respectives de la contrainte et de la déformation relative est appelé module de rigidité et noté $|E^*|$ ou S (stiffness modulus).

$$|E^*| = S = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$$

S.F.BROWN note qu'aux températures élevées, une teneur en liant plus faible est nécessaire pour réduire la déformation permanente, au détriment d'un compactage légèrement plus faible.

Quel que soit l'appareillage utilisé, l'essai consiste toujours à soumettre un échantillon de matériaux à tester à des sollicitations répétées et identiques qui sont, soit à contraintes imposées, soit à formations imposées.

IV.6.2.3. Essai de fatigue par flexion alternée sur éprouvette trapézoïdale:

A.HASSEF-VAZIRI du LAVOC de l'EPFL, a mis au point cet essai dont le but est de déterminer des déformations admissibles pour des durées de vie données en formulant une loi de fatigue.

Comme domaine d'applications, on peut citer :

- Les études de formulation et de comparaisons des enrobés hydrocarbonés.
- Les calculs du dimensionnement des chaussées.
- L'entretien des chaussées.

Les éprouvettes trapézoïdales sont découpées dans des plaques fabriquées en laboratoire prélevées dans la chaussée.

Lors du sciage, il faut apporter une attention particulière au parallélisme et à la planéité des surfaces. Les plaques sont numérotées dans l'ordre de fabrication (Figure VI.28).

Les éprouvettes ont les dimensions suivantes :

- hauteur de 250 mm.
- épaisseur 25 mm,
- petite base 25 mm,
- grande base 56 mm (pour un diamètre maximal des grains < 20 mm), ou
75 mm (pour un diamètre maximal des grains > 20 mm).

Les éprouvettes sont conservées au moins trois mois à températures ambiantes, à l'abri de la lumière. Elles doivent être stockées sur une surface totalement plane et rigide.

Les choix des éprouvettes sont basés sur des critères :

- homogénéité et représentativité en compacité,
- homogénéité de la géométrie caractérisée par le facteur K_e (K_e est un coefficient ne dépendant que des dimensions des éprouvettes).

Des conditions de l'étude sont simplifiées et consistent en une limitation du niveau de sollicitation, une diminution du nombre de répétitions par niveau de sollicitations, et l'exécution de l'essai à une seule température et à une seule fréquence. Différentes études montrent que la relation entre la déformation et la durée de vie est indépendante de la température et de la fréquence.

$$|E^*| = S = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$$

La composante $|E^*|$ est la plus importante sur le plan pratique (dimensionnement) et l'angle de phase φ , par contre, intervient dans l'interprétation fondamentale du comportement des matériaux, et permet, notamment, l'estimation du frottement interne et le calcul de l'énergie dissipée dans la matière.

Plusieurs méthodes existent, pour le calcul du module complexe, et que l'on place en deux catégories :

- o Les méthodes empiriques :
 - méthode de Heukelom et Klomp
 - méthode de Saunier ;
 - méthode de Verstrateen ;
 - méthode de Francken.
- o Les méthodes expérimentales.

IV.7. Étude du comportement :

Ce sont des études qui vont contribuer, dans un proche avenir, à améliorer, certainement, le comportement, des mélanges hydrocarbonés.

Parmi ces études nous pouvons citer :

- étude du comportement des enrobés bitumineux, influence de la température,
- essais triaxiaux sur enrobés bitumineux en chargement répété ou en fluage.

CHAPITRE V
RESULTATS
BIBLIOGRPHIQUES

V.1. INTRODUCTION :

Une étude a déjà été faite par 'Mrs BRARA Ali' sur l'ajout de poudrette de caoutchouc dans le squelette solide d'un béton bitumineux semi-grenu, et parmi les essais les plus importants qui ont été réalisés l'essai de FLUAGE STATIQUE .

V.2. COMPORTEMENT AU FLUAGE STATIQUE :

V.2.1. Introduction :

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

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

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

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

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

V.2.2. Appareillage utilisé :

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

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

V.2.3. Chargement de l'éprouvette :

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

V.3. CONDITIONS PARTICULIÈRES DE L'ESSAI :

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

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

Les conditions de l'essai sont :

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

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

V.4. MODE OPÉRATOIRE :

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

V.5. VALEURS À DÉTERMINER :

La contrainte appliquée, ainsi que les composantes de la déformation mesurées durant l'essai sont représentées sur la figure suivante :

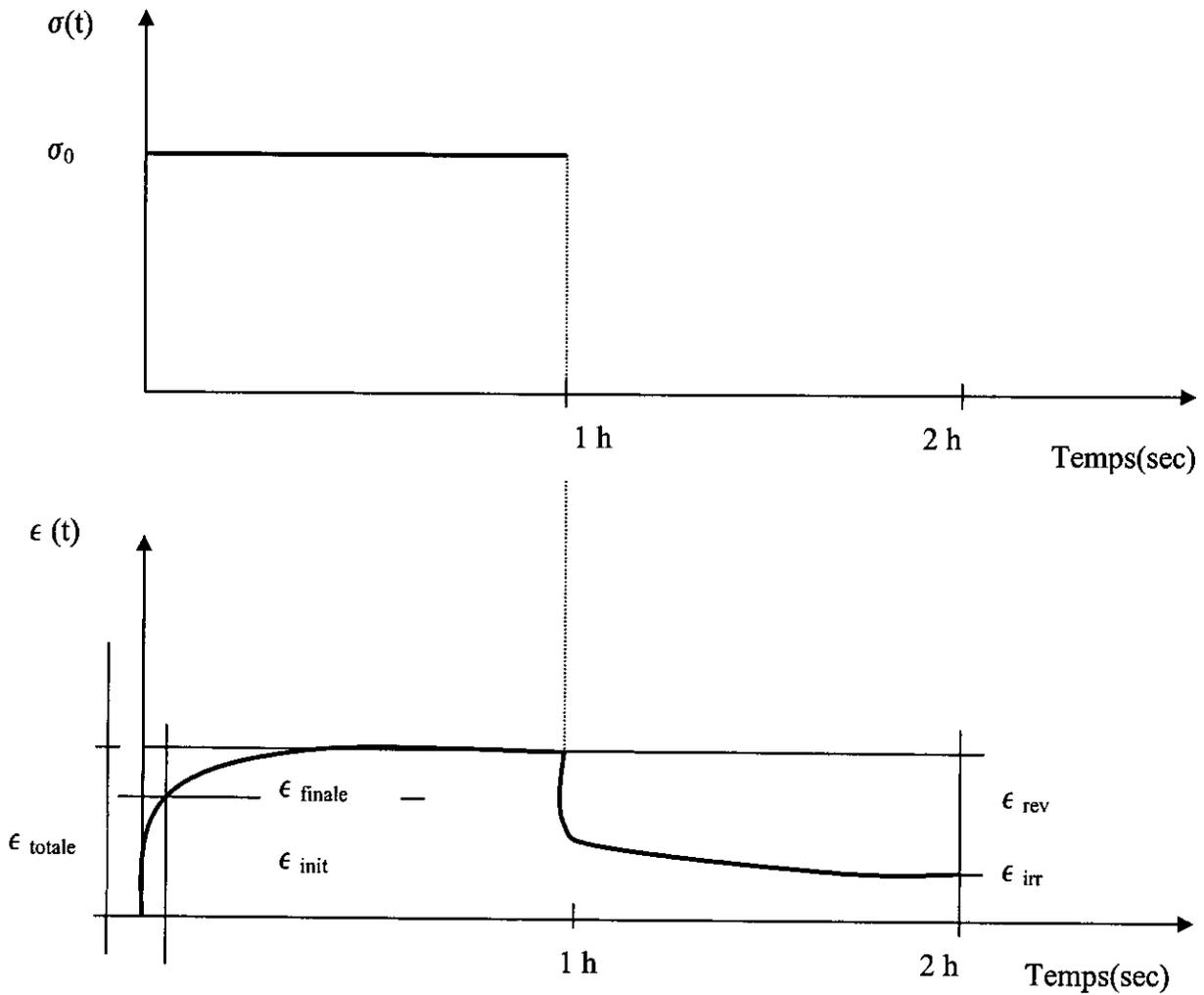


Figure V.1: Contrainte appliquée et composantes de la déformation lors de l'essai de fluage statique (chargement et déchargement)

σ_0 : Contrainte

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

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

ϵ_{finale} : Déformation finale complémentaire

ϵ_{irr} : Déformation irréversible ou permanente

ϵ_{rev} : Déformation réversible

Les déformations pendant l'essai sont calculées par :

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

avec :

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

h_0 : hauteur initiale de l'éprouvette.

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

Le module de rigidité en fluage statique est donné par :

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

avec :

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

- σ_0 : contrainte de compression appliquée

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

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

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

V.6. RÉSULTATS DE L'ESSAI DE FLUAGE STATIQUE :

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

Temps (secondes)	Déplacement (μ .m)	Déformation (%°)	Temps (Secondes)	Déplacement (μ .m)	Déformation (%°)
0	0	0	0	0,504	0,007300
15	0,681	0,010210	15	0,486	0,007286
30	0,696	0,010345	30	0,480	0,007196
45	0,703	0,010540	45	0,475	0,007124
60	0,708	0,010615	60	0,472	0,007076
120	0,721	0,010809	120	0,466	0,006986
180	0,726	0,010885	180	0,462	0,006926
240	0,729	0,010929	240	0,459	0,006882
300	0,732	0,010974	300	0,457	0,006852
360	0,734	0,011004	360	0,456	0,006836
420	0,736	0,011034	420	0,454	0,006806
480	0,738	0,011064	480	0,453	0,006781
540	0,739	0,011079	540	0,452	0,006766
600	0,741	0,011109	600	0,451	0,006716
1200	0,749	0,011229	1200	0,444	0,006657
1800	0,755	0,011319	1800	0,441	0,006612
2400	0,757	0,011349	2400	0,440	0,006597
3000	0,759	0,011379	3000	0,437	0,006552
3600	0,761	0,011409	3600	0,434	0,006507

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

Temps (secondes)	Déplacement (μ .m)	Déformation (%°)	Temps (Secondes)	Déplacement (μ .m)	Déformation (%°)
0	0	0	0	0,361	5,428
15	0,565	0,008496	15	0,350	5,263
30	0,577	8,677	30	0,347	5,218
45	0,583	8,767	45	0,345	5,188
60	0,585	8,797	60	0,344	5,173
120	0,590	8,872	120	0,341	5,128
180	0,596	8,962	180	0,338	5,083
240	0,598	8,992	240	0,337	5,067
300	0,600	9,022	300	0,337	5,067
360	0,602	9,052	360	0,336	5,052
420	0,604	9,083	420	0,335	5,037
480	0,605	9,097	480	0,335	5,037
540	0,606	9,113	540	0,334	5,022
600	0,607	9,128	600	0,333	5,007
1200	0,614	9,233	1200	0,322	4,842
1800	0,619	9,308	1800	0,329	4,947
2400	0,621	9,338	2400	0,328	4,932
3000	0,623	9,368	3000	0,326	4,902
3600	0,623	9,368	3600	0,325	4,887

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

Temps (secondes)	Déplacement (μ .m)	Déformation (%.°)	Temps (Secondes)	Déplacement (μ .m)	Déformation (%.°)
0	0	0	0	0,240	0,003609
15	0,388	0,005083	15	0,232	0,003488
30	0,408	0,006135	30	0,225	0,003383
45	0,417	0,006271	45	0,218	0,003278
60	0,423	0,006361	60	0,215	0,003233
120	0,436	0,006556	120	0,210	0,003158
180	0,440	0,006616	180	0,205	0,003083
240	0,445	0,006692	240	0,201	0,003022
300	0,448	0,006737	300	0,198	0,002977
360	0,450	0,006767	360	0,195	0,002932
420	0,452	0,006797	420	0,191	0,002872
480	0,453	0,006812	480	0,190	0,002857
540	0,454	0,006827	540	0,188	0,002827
600	0,455	0,006842	600	0,187	0,002812
1200	0,462	0,006947	1200	0,177	0,002662
1800	0,466	0,007007	1800	0,171	0,002571
2400	0,468	0,007037	2400	0,168	0,002523
3000	0,470	0,007067	3000	0,165	0,002481
3600	0,472	0,007098	3600	0,164	0,002406

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

Temps (secondes)	Déplacement (mm)	Déformation (%°)	Temps (Secondes)	Déplacement (μ.m)	Déformation (%°)
0	0	0	0	0,581	0,008607
15	0,650	0,009629	15	0,568	0,008415
30	0,693	0,010266	30	0,565	0,008370
45	0,715	0,010593	45	0,563	0,008341
60	0,730	0,010815	60	0,562	0,008326
120	0,765	0,011333	120	0,560	0,008296
180	0,775	0,011481	180	0,558	0,008266
240	0,782	0,011585	240	0,557	0,008252
300	0,789	0,011688	300	0,556	0,008237
360	0,793	0,011748	360	0,556	0,008237
420	0,797	0,011807	420	0,555	0,008222
480	0,800	0,011852	480	0,555	0,008222
540	0,802	0,011881	540	0,554	0,008207
600	0,804	0,011911	600	0,554	0,008207
1200	0,814	0,012059	1200	0,541	0,008015
1800	0,818	0,012185	1800	0,549	0,008133
2400	0,822	0,012177	2400	0,548	0,008188
3000	0,824	0,012207	3000	0,548	0,008118
3600	0,825	0,012222	3600	0,548	0,008118

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

Temps (secondes)	Déplacement (μ .m)	Déformation (%°)	Temps (Secondes)	Déplacement (μ .m)	Déformation (%°)
0	0	0	0	0,700	0,010401
15	0,717	0,010654	15	0,680	0,010104
30	0,753	0,011887	30	0,664	0,009866
45	0,769	0,011426	45	0,665	0,009881
60	0,781	0,011605	60	0,650	0,009658
120	0,809	0,012021	120	0,635	0,009435
180	0,826	0,012273	180	0,624	0,009272
240	0,833	0,012377	240	0,619	0,009198
300	0,842	0,012511	300	0,617	0,009168
360	0,848	0,012600	360	0,613	0,009108
420	0,855	0,012704	420	0,610	0,009064
480	0,860	0,012778	480	0,600	0,008915
540	0,867	0,012883	540	0,599	0,008900
600	0,871	0,012942	600	0,598	0,008885
1200	0,901	0,013388	1200	0,573	0,008514
1800	0,912	0,013551	1800	0,572	0,008499
2400	0,920	0,013670	2400	0,563	0,008365
3000	0,925	0,013744	3000	0,557	0,008276
3600	0,929	0,013803	3600	0,552	0,008202

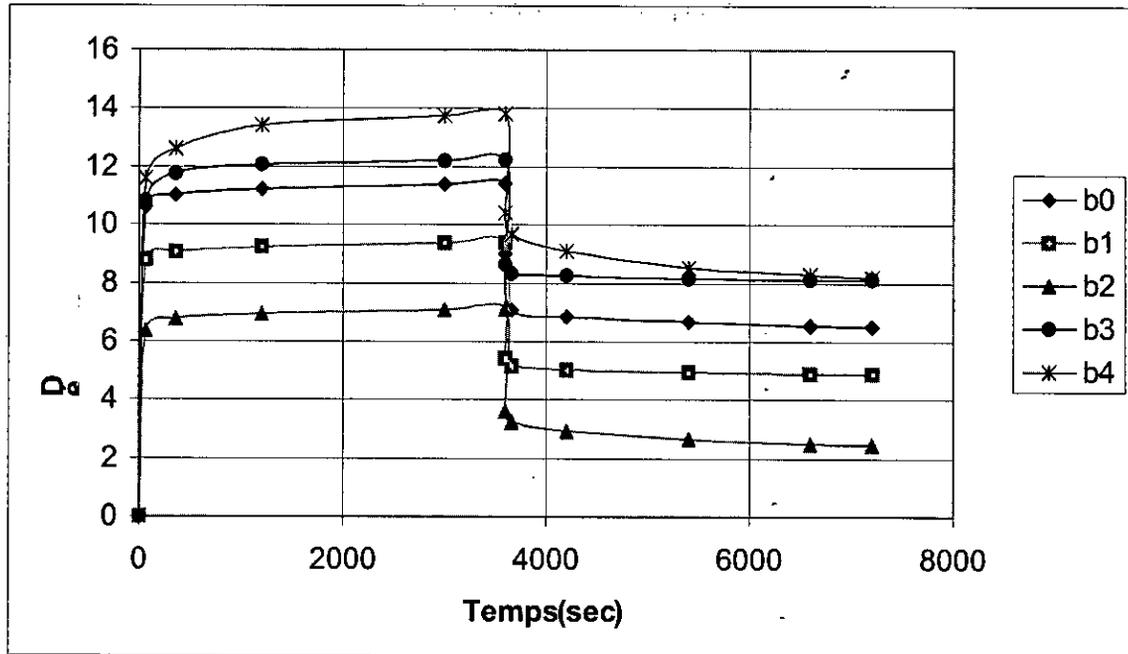


Figure V.2: Résultats du Fluage Statique

bi : béton bitumineux à i % d'ajout

V.7. Conclusion :

Les résultats de l'essai du Fluage statique à 60°C des bétons bitumineux avec différentes teneurs en poudre de caoutchouc montrent qu'il y a eu une nette diminution des déformations pour les bétons bitumineux avec 2 % de poudre, par rapport aux autres dosages en poudre,

Donc c'est pour cette raison que notre étude portera sur le dosage optimal en liant et en poudre et éventuellement sur un dosage en poudre de caoutchouc de 0% dans le but de faire une étude comparative.

PARTIE B
ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE VI
IDENTIFICATION DES
MATERIAUX

VI.1. SQUELETTE MINERAL :

VI.1.1 Introduction :

Le choix des matériaux et les possibilités d'emploi sont d'une importance primordiale ; aussi ce choix n'est jamais arbitraire, et il est nécessaire de faire entrer en ligne de compte les performances à atteindre. De plus, la connaissance des caractéristiques des granulats permet un gain certain en temps et en argent et aboutit à une exploitation économique des ressources en matériaux.

Pour une meilleure connaissance des caractéristiques des granulats employés, issus des roches massives généralement constituées par des roches de différentes natures (faciès), il convient de déterminer le plan pétrographique.

Pour cela il est nécessaire d'effectuer un certain nombre d'essais, obéissant à des normes les plus connues d'entre elles sont :

- La norme **AFNOR** : Association Française de Normalisation.
- La norme **ASTM** : American Society for Testing Materials

L'identification d'une roche est basée principalement sur:

- Sa composition minéralogique ;
- Son état d'altération ;
- Sa structure ;
- Son poids spécifique
- sa porosité et
- Son indice de continuité ;

Dans nos essais deux types de granulats ont été utilisés :

- 1- des **Gabbros** (basalte) : provenant de la carrière de CAP DJENET ;
- 2- des **Roches sédimentaires carbonatées** (calcaire) : provenant de la carrière JOBERT

Il faut noter aussi que vu que le but à atteindre est la **modélisation du comportement** et non pas de la **formulation**, nous nous sommes limités à des dosages optimaux en poudre et en liant auxquels 'MRS Brara', a abouti dans sa thèse de magister '**CONTRIBUTION à L'ETUDE DU COMPORTEMENT D'UN BETON BITUMINEUX MODIFIÉ à LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC**'. Pour cela il a fallu se procurer les mêmes agrégats et le même liant, et obtenir des valeurs d'essais d'identification de ces matériaux assez proches pour pouvoir prendre le dosage optimal et arriver aux mêmes résultats

VI.1.2. Echantillonnage :

L'échantillonnage a été effectué comme suit :

- Roche calcaire(C/JOBERT) :
- Fraction (6/12)
 - Fraction (3/8)
 - Fraction (0/3)

- Roche Basaltique(C/CAP DJENET) :
- Fraction (8/15)
 - Fraction (3/8)

- Fraction (0/3)

VI.2. ANALYSE GRANULOMETRIQUE:

L'analyse granulométrique figure parmi les paramètres les plus importants lors de l'identification de notre matériau, donc son allure peut s'avérer très significative.

Les granulats 0/3, 3/8, 8/15 ramenés des carrières de CAP DJINET et JOBERT ont été soumis après échantillonnage, à un lavage afin d'éliminer les fractions inférieures à 0,08 mm, puis séchés à l'étuve, et tamisés.

Pour les échantillons provenant de CAP DJINET, les résultats ont été les suivants :

Tableau VI.1. Granulométrie des trois fraction de CAPDJINET.

TAMIS	PASSANT EN % DES FRACTIONS		
	0/3	3/8	8/15
20	100,00	100,00	100
16	100,00	100,00	98,35
12,5	100,00	99,88	79,42
10	100,00	97,45	35,96
8	100,00	88,06	7,58
6,3	100,00	69,55	1,08
5	99,11	54,77	0,69
4	99,88	32,36	0,61
2	75,79	9,59	0,60
1	52,38	8,18	0,58
0,5	32,35	7,89	0,56
0,4	28,45	7,83	0,55
0,315	22,91	7,76	0,53
0,2	15,45	7,56	0,49
0,1	5,93	6,98	0,40
0,08	2,26	6,90	0,32

Pour les échantillons provenant de carrière JOBERT, les résultats sont :

Tableau VI.2 : Granulométrie des trois fraction la CARRIERE.

TAMIS	PASSANT EN % DES FRACTIONS		
	0/3	3/8	6/12
20	100,00	100,00	100,00
16	100,00	100,00	100,00
12,5	100,00	100,00	94.14
10	100,00	99,76	26.68
8	100,00	93.16	4.96
6,3	100,00	48.48	3.17
5	100,00	29.11	3.04
4	100,00	16.99	2.97
2	80.52	1.65	2.93
1	50.49	0.88	2.90
0,5	32.03	0.69	2.89
0,4	29.39	0.67	2.88
0,315	23.2	0.66	2.87
0,2	19.44	0.63	2.86
0,1	14.83	0.55	2.86
0,08	13.76	0.52	2.85

Figure VI.2 :COURBE GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION 3/8 (BASALTE)

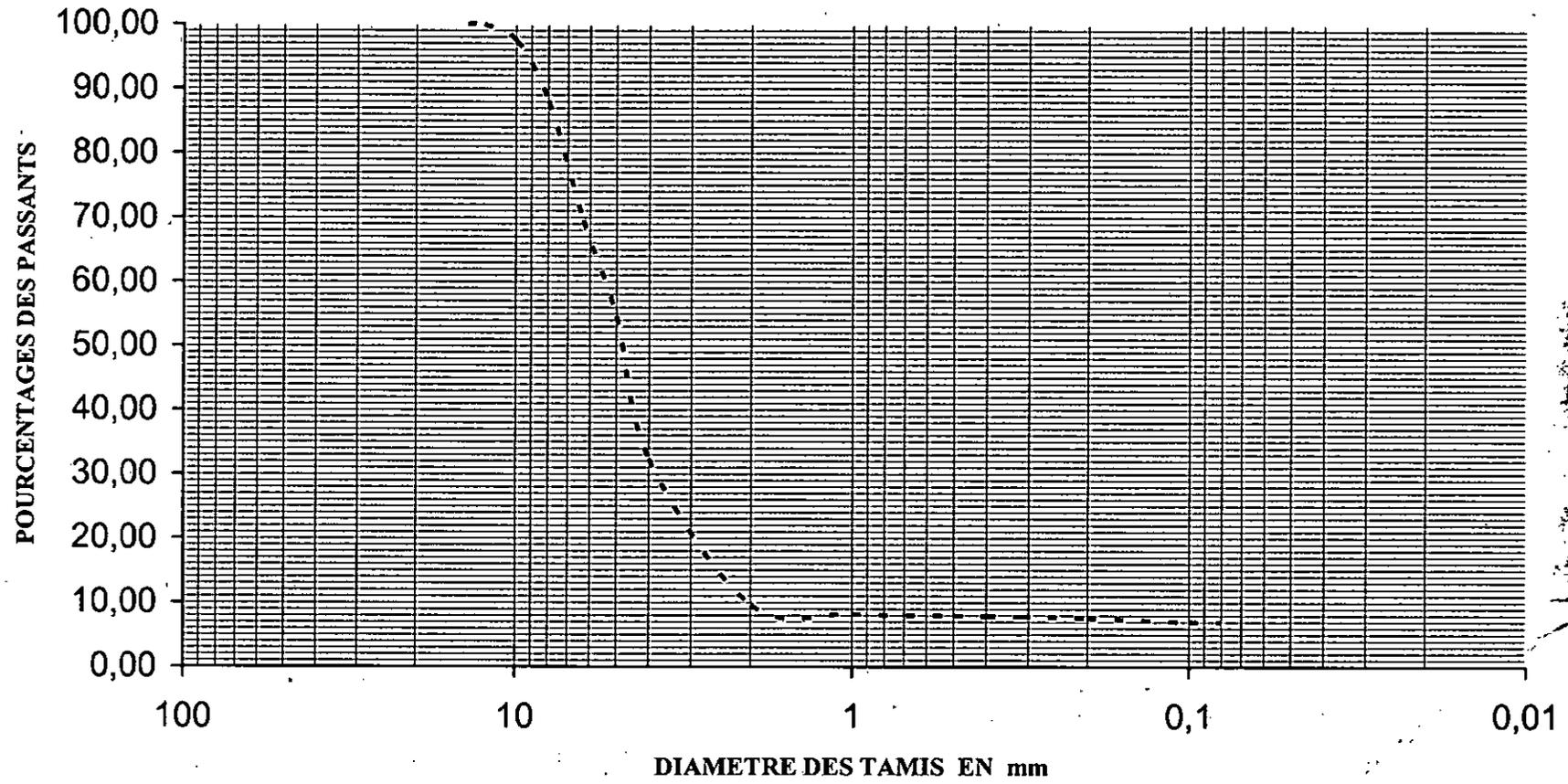


Figure VI.5 :COURBE GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION 3/8 (CALCAIR)

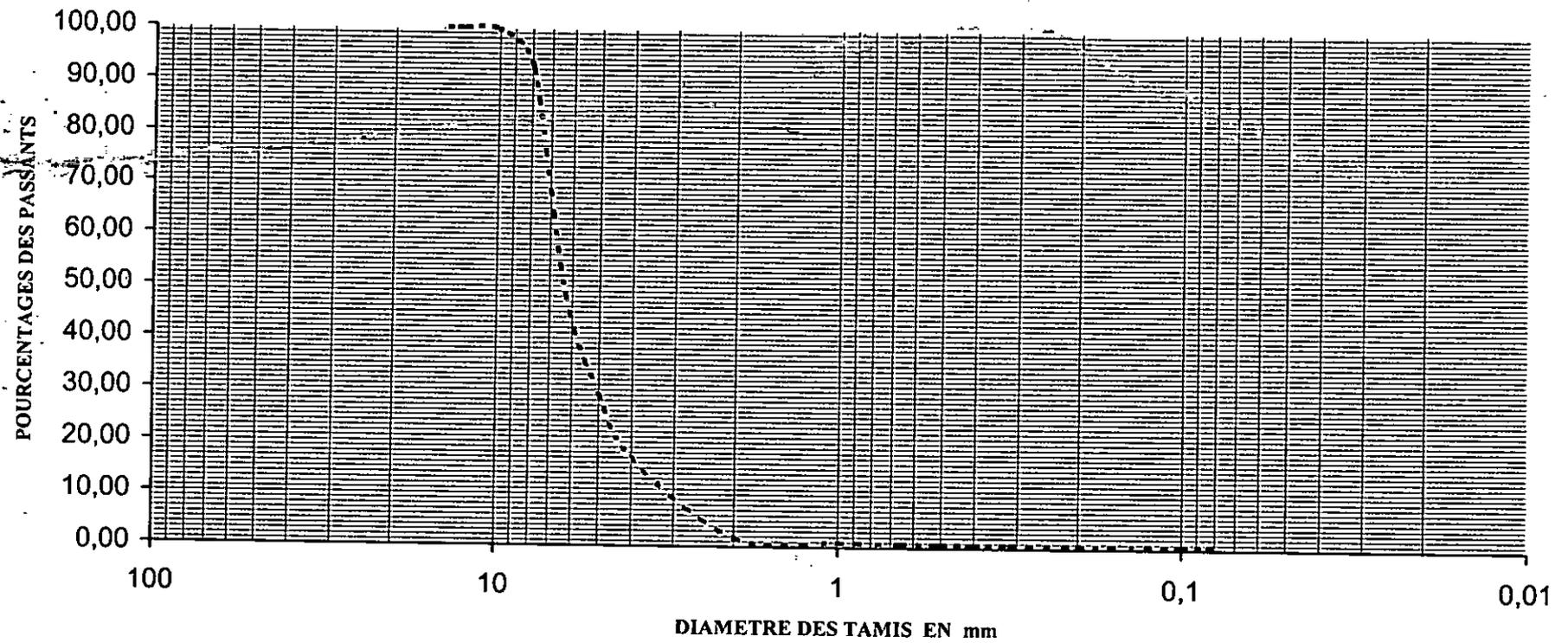


Figure VI.6:COURBE GRANULOMETRIQUE DE LA FRACTION 0/3 (CALCAIRE)

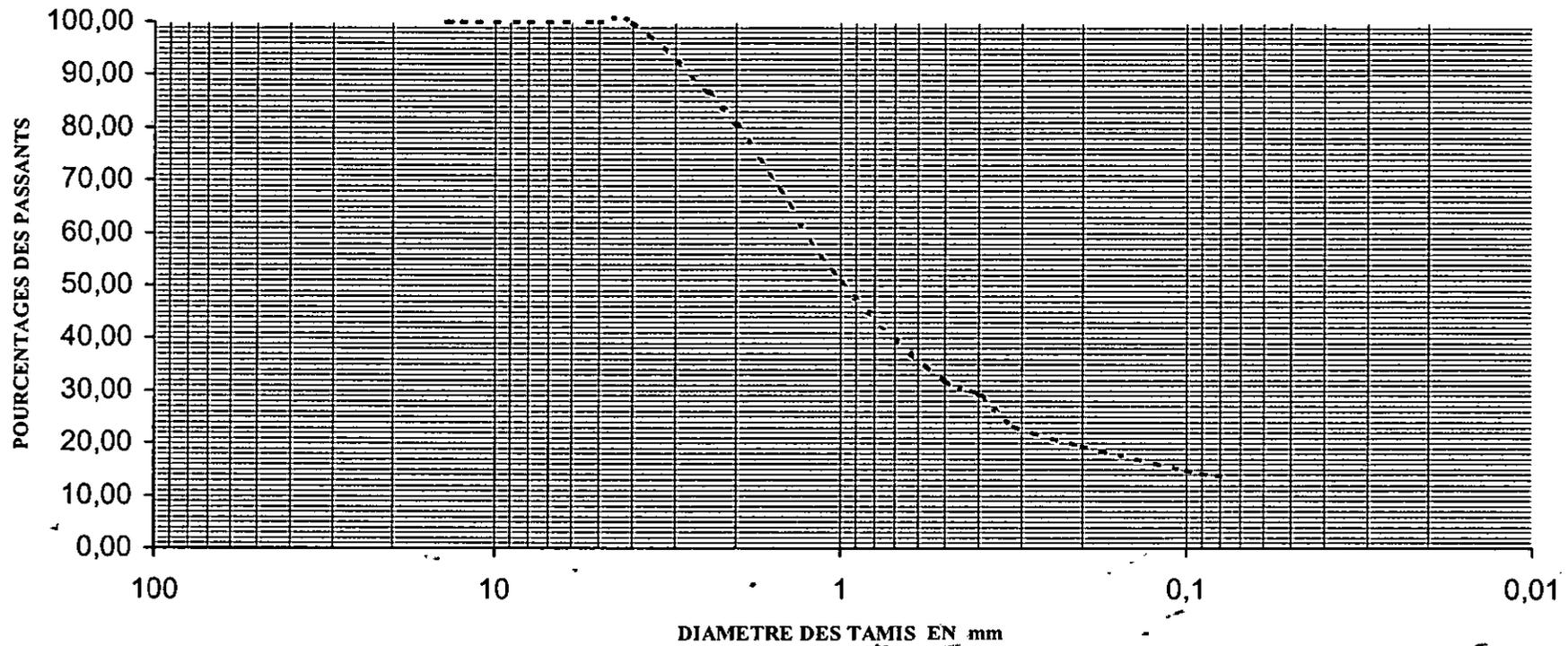


Tableau VI.3 ; Analyse chimique

Echantillons	Gravier 3/8 basalte	Gravier 8/15 Basalte	Gravier 0/3 Basalte	Gravier 0/3 calcaire	Gravier 3/8 calcaire	Gravier 6/12 calcaire
Insolubles (silice-Silicates)	5.04%	74.54%	69.37%	8.34%	9.43%	6.37%
Oxyde de Fer et D'alumine	2.2%	17.25%	24.58%	2.13%	1.18%	0.63%
Chlore (Nacl)	1.05%	0.35%	0.29%	0.47%	0.35%	0.35%
Sulfates (CaSO4-2H2O)	---	---	---	---	---	--
Carbonates (CaCo3)	90.35%	5.26%	5.31%	85.9%	86.84%	93.81%
Anhydride carbonique (Co2)	39.75%	2.31%	2.34%	37.82%	38.21%	41.27%
Perte au feu	41.49%	3.14%	4.47%	41.53%	38.25	42%
L'eau de constitution	1.94%	0.83%	2.13%	3.71%	0.4%	0.73%
Bilan chimique pondérale	100.58M	98.23%	101.39%	1.55%	98.2%	101.39%

VI.4. LES PARAMETRES DE COMPORTEMENT MECANIQUE :

Ces paramètres sont pris en considération pour juger de l'utilisation possible des sols en couche de forme. On distingue les matériaux, dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic d'une voirie et qui, de ce fait, peuvent être utilisés tels quels dans la construction de couche de forme, de ceux qui risquent de se fragmenter pour se transformer en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisable dans son état naturel sans dispositions particulières (traitement).

VI.4.1. Coefficient d'aplatissement (NF P – 18 -561) :

Le but de l'essai est la détermination du taux d'éléments plats des fractions supérieures à 4mm; avec un coefficient d'aplatissement dépassant les 30 %, le matériau peut s'avérer peu adhérent lors de son utilisation en couche de forme .

A) Granulats de CAP DJENET:

Tableau VI.4 : Coefficient d'aplatissement des granulats de CAP DJENET

Fractions	Classe référentielle	Coefficient d'aplatissement CA%
3/8	10-8-6.3-5-4	33.37
8/15	16-12.5-10-8-6.3-5-4	23.53

B) Granulats de la carrière JOBERT:

Tableau VI.5 : Coefficient d'aplatissement des granulats de Carrière JOBERT

Fractions	Classe référentielle	Coefficient d'aplatissement CA%
3/8	10-8-6.3-5-4	33.23
6/12	16-12.5-10-8-6.3-5-4	13.95

VI.4.2. Coefficient de friabilité des sables (NF P – 18 -576) :

CHAPITRE VI : Identification des matériaux

Cet essai se rapproche de l'essai d'usure MICRO-DEVAL, mais il est effectué uniquement sur les fractions 0/3, par cet essai, on détermine la résistance à la fragmentation des sables. Les éléments fins (< 0,2 mm) ainsi que les plus gros (2 mm à 4 mm) y sont exclus.

Tableau VI.6: Coefficient de friabilité des sables des granulats de CAP DJENET

Nature	Coefficient de friabilité des sables
Granulats carrière JOBERT	57%
Granulats de CAP DJENET	40.6 %

VI.4.3. Essai D'usure MICRO-DEVAL (NF P – 18 -572) :

Cet essai permet de mesurer la résistance à l'usure par frottement réciproque des éléments du sol ou du granulat dans un cylindre en rotation.

A) Granulats de CAP DJENET:

Tableau VI.7: Essai D'usure MICRO-DEVAL des granulats de CAP DJENET

Fractions	Classe référentielle	Micro-Deval Humide
3/8	4-6.3	2.24
8/15	14-10	2.04

B) Granulats de carrière JOBERT :

Tableau VI.8: Essai D'usure MICRO-DEVAL des granulats de carrière JOBERT

Fractions	Classe référentielle	Micro-Deval Humide
3/8	4-6.3	2.54
6/12	14-10	6.17

En technique routière, les critères de qualité pour l'attrition, sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau VI.9: Critères de qualités pour l'attrition

Micro-Deval (MDE)	Qualité
MDE < 13	Très bon
13 ≤ MDE < 20	Bon à moyen
20 ≤ MDE < 25	Moyen à faible
MDE ≥ 25	Médiocre

VI.4.4. Essai Los Angeles (NF P – 18 -573) :

Cet essai permet d'estimer l'évolution de la granularité due à la fragmentation des éléments du sol sous le choc des boulets métalliques dans la machine Los-Angeles

A) Granulats de CAP DJENET:

Tableau VI.9: Essai Los Angeles des granulats de CAP DJENET.

Fractions	Classe référentielle	LOS ANGELES
3/8	4-6.3	23.54
8/15	14-10	16.52

B) Granulats de carrière JOBERT :

Tableau VI.10: Essai Los Angeles des granulats de carrière JOBERT.

Fractions	Classe référentielle	LOS ANGELES
3/8	4-6.3	30.54%
6/12	14-10	23.7

En technique routière, les critères de qualité pour la dureté, sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau VI.11: critères de qualité pour la dureté

Los Angeles(LA)	Qualité
LA < 15	Très bon
15 ≤ LA < 20	Bon à moyen
20 ≤ LA < 30	Moyen à faible
LA ≥ 30	Médiocre

VI.5. L'ADDITIF (POUDRETTE DE CAOUTCHOUC) :

L'additif en question est une poudre de caoutchouc qui est fournie par la société d'application d'élastomère (SAEL) sise à la zone industrielle de Oued-Smar (Alger). Cette poudre provient du broyage de chutes de caoutchouc utilisé dans la fabrication de tapis de voitures ; elle est utilisée dans notre cas comme ajout dans le squelette solide du béton bitumineux. Ces chutes sont réduites en poudre de taille égale à 2mm maximum de densité égale à 0,5 .

CHAPITRE VII
FORMULATION
DES
BETONS BITUMINEUX

VII.1. INTRODUCTION:

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

VII.2. CRITERES DE FORMULATIONS :

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

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

VII.3. METHODOLOGIE A SUIVRE POUR L'ETUDE D'UNE FORMULATION:

Pour étudier une formulation d'un béton bitumineux pour une couche de roulement, trois étapes s'avèrent essentielles :

la composition granulométrique, la teneur en liant et les caractéristiques d'un enrobé.

VII.3.1. La composition granulométrique :

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

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

TABLEAU VII.1 : Fuseau de spécification

TAMISAT (mm)	BB 0/10		BB0/14	
	Inférieur	Supérieur	Inférieur	Supérieur
14	-	-	94	100
10	94	100	72	84
6.3	65	75	50	66
4	45	60	40	54
2	30	45	28	40
0.08 : couche de roulement	7	10	7	10
0.08 : couche de liaison	6	9	6	9

Tableau VII.2 : Courbes des modèles retenues

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

Y : le pourcentage des passants

X : les tamisas

VII.3.2. La teneur en liant :

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

$$PI = K.\alpha.(\Sigma)^{1/5}$$

- K : module de richesse, il est synonyme de l'épaisseur de la surface du film du liant qui couvre la surface des granulats.
- Σ : surface spécifique conventionnelle en m²/kg, elle est donnée par :

$$100 \Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 13f$$

avec :

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

- **s** : pourcentage des éléments passant aux tamis de 0.315 et retenus par les tamis de 0.08 mm.
- **f** : pourcentage des éléments passant aux tamis de 0.08 mm.
- **α** : coefficient correcteur de la masse volumique réelle des granulats (MV_r) par rapport à MV_r=2.65

$$\alpha = 2.65/MV_r$$

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

VII.3.3. Les caractéristiques de l'enrobé :

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

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

S'il s'agit de vérifier une formulation d'enrobé déjà étudiée, l'étude du laboratoire sera simplifiée (tableau VII.3).

Les enrobés réalisés doivent répondre aux exigences citées dans le tableau (VII.4) .

CHAPITRE VIII
ETUDE STATISTIQUE

VIII.1.INTRODUCTION :

Le but de notre étude statistique est une étude comparative qui vérifie la représentativité des résultats des essais DURIEZ et MARSHALL effectués sur plusieurs échantillons similaires, c'est à dire un dosage optimal en bitume de 6,02%, avec 0% et 2% de poudrette de caoutchouc (vu qu'en fluage statique c'est la teneur en poudrette qui a donné les meilleurs résultats).

Notre étude statistique se traduit par le « test Fisher » appelé plus communément «test F » pour traiter les résultats Marshall .

En ce qui concerne les résultats DURIEZ ,on ne peut traiter les résultats que par un graphique vu le nombre restreint de données (Figure VIII.1).

VIII.2. COMPARAISON DE L'EGALITE DES VARIANCES:

VIII.2.1. Principe :

1. Dans la situation de comparaison de groupes simples formés d'individus indépendants, la variabilité à l'intérieur du groupe total (c'est-à-dire le groupe formé par la réunion des groupes comparés) provient de deux sources :

- la variabilité des individus à l'intérieur de chacun des groupes (Within-group variability) ;
- la variabilité due aux différences entre les groupes (Between-group variability).

Soit, dans notre cas les 2 groupes suivants:

- les stabilités, fluage et compacité des formulations optimales à 0 % de poudrette de caoutchouc .
- les stabilités, fluage et compacité des formulations optimales à 2 % de poudrette de caoutchouc.

Les résultats sont illustrés dans le tableau suivant :

VIII.3. RESULTATS DE L'ESSAI MARSHALL :(Annexe 1)

Tableau VIII.1 : Formulation optimale à 0% de poudrette

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Stabilité	988	1194	1290	1178.8	1104	1056	1344	1392	950.3	859.8	814.5	814.5	802.5	856
Fluage	2	1	4.16	3.66	4.5	4.3	6	5.3	4.7	3.6	4.7	3.4	7.2	6.1
Compacité	96.76	96.76	96.76	96.76	98,7	98,7	98,7	98,7	97.1	97.1	97.1	97.1	97.6	97.6

Tableau VIII.2 : Formulation optimale à 2% de poudrette

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Stabilité	858.5	808	656.5	909	1959.8	1005	1306.5	1005	900	750	1121.3	1121.3	1072.5	1267.5
Fluage	2.3	2.9	2.6	3.4	5.8	3.7	5.6	4.6	3.1	4.4	2.6	2.5	4	4.3
Compacité	97.4	97.4	97.4	97.4	98.6	98.6	98.6	98.6	98.3	98.3	98.3	98.3	98.7	98.7

VIII.3.1. Résultats des tests d'égalité des variances (F-Test):

	0%	2%
Moyenne	1046,028	1052,921
Variance	43140,731	102915,245
Observations	14	14
Degré de liberté	13	13
F	0,419	
P(F<=f) unilatéral	0,064	
Valeur critique pour F (unilatéral)	0,388	

On constate que Le F calculé est hautement supérieur au F observé $F_{obs} < F_{cal}$ ($0,06 < 4,67$) à une probabilité de 1% ,

Le F bilatérale (le rapport des carrés moyens des deux échantillons) est également très hautement significatif ($F = 0,419 < F_{th} = 4,35$) pour un degré de liberté (ddl) de (27), aussi on remarque un écart considérable entre les variances d'un même groupe mais l'écart entre les deux groupes (modifié à 0% et 2%) est plus important.

VIII.3.1.2. Fluage Marshall :

	0%	2%
Moyenne	4,33	3,7
Variance	2,599	1,283
Observations	14	14
Degré de liberté	13	13
F(< f) bilatéral		2,026
P(F<=f) unilatéral		0,108
Valeur critique pour F (unilatéral)		2,576

Le F calculé est supérieur au F observé $F_{obs} < F_{cal}$ ($0,11 < 4,67$) à une probabilité de 1% ,

Le F bilatéral (le rapport des carrés moyens des deux échantillons) est également très hautement significatif ($F = 2,05 < F_{th} = 4,35$) pour un degré de liberté (ddl) de (27) aussi on remarque un écart considérable entre les variances des deux groupes (modifié à 0% et 2%) .

VIII.3.1.3. Compacité Marshall :

Tableau VIII.5. Compacité Marshall

	0%	2%
Moyenne	97,5314286	98,1857143
Variance	0,66127473	0,28747253
Observations	14	14
Degré de liberté	13	13
F	2,30	
P(F<=f) unilatéral	0,0730963	
Valeur critique pour F (unilatéral)	2,57692708	

Le F calculé est amplement supérieur au F observé $F_{obs} < F_{cal}$ ($0,07 < 4,67$) à une probabilité de 1% ,

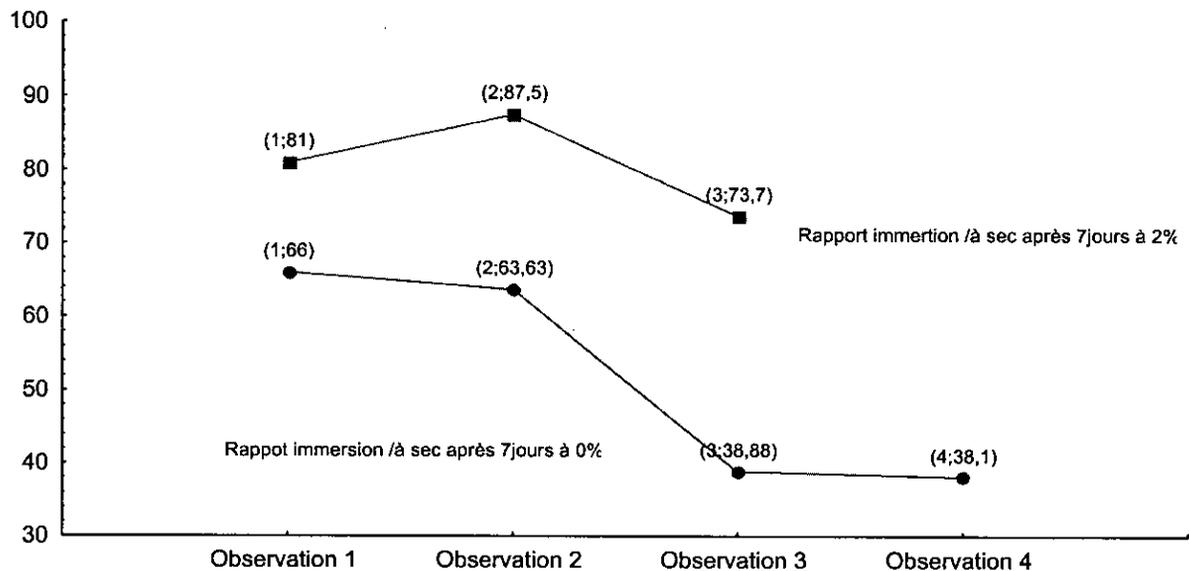
Le F bilatéral (le rapport des carrés moyens des deux échantillons) est également très hautement significatif ($F = 2,30 < F_{th} = 4,35$) pour un degré de liberté (ddl) de (27) également on remarque un écart considérable entre les variances des deux groupes (modifié à 0% et 2%) .

VIII.4. RESULTATS DE L'ESSAI DURIEZ :(Annexe 2)

Tableau VIII.6 : Rapport immersion/à sec après 7 jours à 18°C

	Rapport immersion/à sec après 7 j à 18°C(%)			
	1	2	3	4
0% de poudrette	66	63,6	38,8	38,1
2% de poudrette	81	87,5	73,7	

Figure VIII.1: graphique (résistance immersion/à sec) des essais Duriez



On remarque que quelque soit le nombre d'échantillons testés nous avons un rapport de résistances immersion /à sec à 18°C après 7jours à 2% toujours plus grand que celui de 0%

VIII.5. CONCLUSION :

On constate d'après l'étude statistique effectuée sur les deux dosages 0% et 2% que l'ajout de poudrette de caoutchouc , augmente considérablement la résistance de l'enrobé , ainsi que les compacités , tout en diminuant le fluage.

CHAPITRE IX
ETUDE DU
COMPORTEMENT
RHEOLOGIQUE DES
BETONS BITUMINEUX

CHAPITRE IX : Etude du comportement rhéologique des bétons bitumineux

IX.1. Introduction :

IX.1.1. Les Lois rhéologiques :

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement où les déformations des corps, sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, contenu de l'application de ces contraintes ou, plus généralement, de leurs variations en fonction du temps.

IX.1.2. Le comportement rhéologique :

C'est la manière dont les déformations d'un élément de volume d'un corps correspondent aux contraintes qui lui sont imposées (ou les contraintes aux déformations).

IX.1.3. Loi de comportement :

C'est une relation liant, les tenseurs de contraintes, de déformations, leur dérivées à différents ordres par rapport au temps, et éventuellement l'histoire de certaines variables et le temps « t » lui-même.

IX.1.4. Approche théorique :

Les principes et les axiomes introduits par l'analyse physique du phénomène permettant de construire des lois rhéologiques plus utilisables sont :

1°) Axiome de déterminisme :

Dés que l'on connaît l'histoire du mouvement d'un corps matériel, le tenseur de contrainte est déterminé de manière unique, à l'instant t , en tout point de ce corps. Cet axiome exclut de ce fait les effets quantiques.

2°) Axiome d'invariance matérielle (ou bien d'indifférence matérielle) :

Pour toute transformation du repère de référence qui respecte les conditions de symétrie matérielle au point X , la fonctionnelle réponse F doit être une forme invariante. Ces transformations doivent garder la densité inchangée en X .

Si la réponse ne dépend pas du corps matériel alors le matériau est homogène.

Si les tenseurs spécifiques sont isotropes dans un repère ils le resteront en dans n'importe quel repère.

3°) Axiome d'objectivité :

Les équations de comportement doivent être indépendantes du mouvement de l'observateur. En d'autres termes, les fonctionnelles réponses F doivent être des forme invariantes, pour un changement rigide arbitraire du repère spatial de référence, et une translation de l'origine dépend.

4°) Axiome de voisinage (ou bien localisation de voisinage) :

Les valeurs des variables indépendantes non incluses dans un voisinage (V_0) de x , n'affectent pas de façon appréciable les valeurs des fonctionnelles réponse en X .

CHAPITRE IX : Etude du comportement rhéologique des bétons bitumineux

Pour ces matériaux, le voisinage V_0 est infiniment proche de X ; la fonctionnelle réponse dépend donc de l'histoire du gradient des déformations au point matériel considéré. Ces milieux dits : « Milieux matériellement simples ».

5°) Axiome de causalité :

En excluant les forces, les quantités, autre que celles dérivant à du mouvement, sont les variables constitutives. Chaque phénomène est attribué au mouvement des particules par cet axiome $x = x(X, t)$.

6°) Axiome de mémoire :

Les valeurs des fonctionnelles réponses au temps t ne sont pas appréciables de façon appréciable par les valeurs antérieures des variables constitutives.

IX.2. L'application de la rhéologie aux enrobés bitumineux :

Les matériaux bitumineux présentent la particularité suivante :

- Pour un niveau de contrainte fixé, la déformation dépend du temps ; propriété qui se traduit par la dépendance du module à la fréquence de la charge ;
- Le module est élevé lorsque le matériau est soumis à une *sollicitation rapide* (c'est le cas lorsque la chaussée subit le passage d'un véhicule roulant à vitesse normale) ;
- Le module est faible voir très faible lorsque le matériau est soumis à une *sollicitation lente* (véhicule roulant à une faible vitesse, dans une côte par exemple)
- La deuxième variable qui influe sur le module d'un enrobé est là *température* qui joue un rôle symétrique de celui de la fréquence : aux fortes température correspond un faible module

Le comportement d'un enrobés bitumineux est donc un comportement visco-élastique.

IX.2.1. Concept de visco-élasticité :

Le terme visco-élastique renvoi à tout ce qui a des propriétés visqueuses et élastique en même temps.

IX.2.1.1. Le ressort (modèle de comportement élastique) :

Le ressort est parfaitement élastique, et n'importe quelle force qui lui est appliquée est proportionnelle à la déformation, son expression mathématique peut être exprimée comme suit :

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \quad t_0 \leq t \leq t_1 \quad (\text{fluage})$$

σ_0 : contrainte ancienne appliquée à l'instant $t=t_0$.

E : module d'élasticité du ressort.

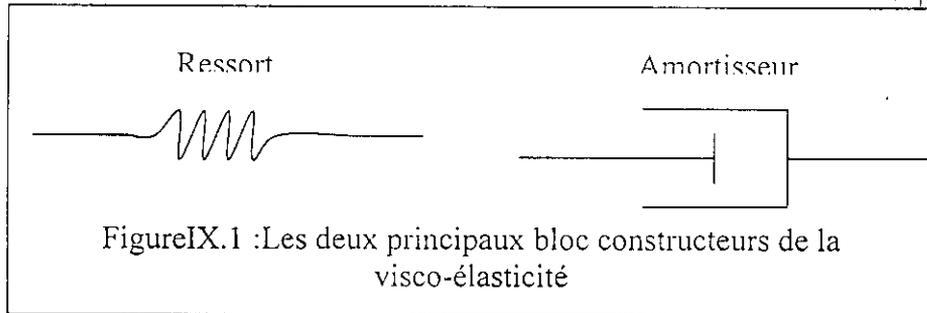
ε_E : la déformation résultante.

CHAPITRE IX : Etude du comportement rhéologique des bétons bitumineux

L'équation obéit à la loi de 'HOOK' cela veut dire que dès que la contrainte cesse d'être appliquée, le ressort revient à son point d'origine, et recouvre tout le chemin qu'il a parcouru en sens inverse :

$$\varepsilon_E = 0 \quad t < t_0 \text{ et } t < t_1 (\text{recouvrement})$$

Donc nous retiendrons que le ressort à une mémoire.



IX.2.1.2. L'amortisseur (modèle de comportement visqueux):

L'amortisseur contient un liquide dont la viscosité est η , son expression mathématique est :

$$\dot{\varepsilon}_v = \frac{\sigma_0}{\eta} \quad t_0 \leq t \leq t_1 \quad (\text{fluage})$$

$\dot{\varepsilon}_v$: vitesse de déformation résultante, et exprimée par $\dot{\varepsilon}_v = d\varepsilon/dt$.

La réponse de l'amortisseur, se traduit par une déformation tant que la contrainte est appliquée, la pente de la réponse de la déformation est équivalente à la vitesse de déformation. L'échantillons à tester peut être tester par les variantes du modèle visco-élastique .

$$\varepsilon_v(t) = 0 \quad t < t_0 \quad (\text{condition initiale})$$

$$\varepsilon_v(t) = \frac{\sigma_0(t - t_0)}{\eta} \quad t_0 \leq t \leq t_1 \quad (\text{fluage})$$

$$\varepsilon_v(t) = \frac{\sigma_0(t - t_0)}{\eta} \quad t > t_1 \quad (\text{recouvrement})$$

dés que la contrainte cesse d'être appliquée sur l'amortisseur, ce dernier revient à sa position initiale sans se rappeler du chemin parcouru (pas de mémoire), l'expérience du ressort exprime une déformation permanente.

Donc les différences entre le comportement élastique et visqueux sont les suivantes :

- Les composantes élastiques mémorisées énergie rencontrée et l'exhibent.
 - Les composantes visqueuses, absorbent l'énergie et n'exhibent aucune mémoire.
- Les résultats pour le ressort et l'amortisseur sont illustrés dans la figure qui suit :

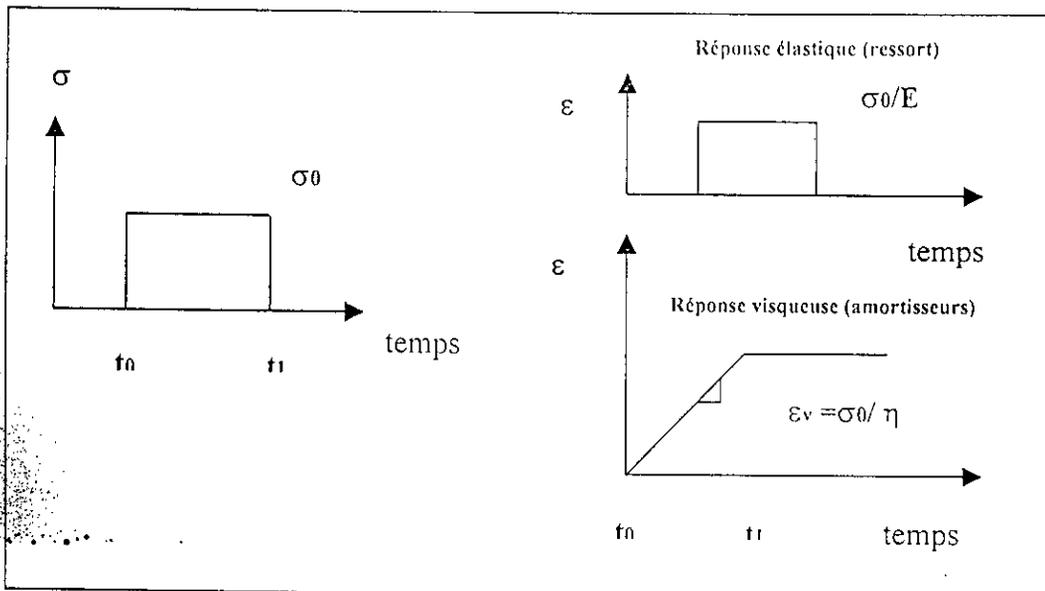


Figure IX.2. Diagramme du test de fluage et la réponse de déformation résultante du ressort est de l'amortisseur

IX.3. Exigences du fonctionnement élastique :

Les variations de la température extérieure (incluant les effets de l'ensoleillement au du

Le niveau de contrainte ou de déformation pourra, en certains endroits du revêtement, franchir sa limite élastique; à ces endroits, le revêtement subira alors une déformation visqueuse irréversible ; (en traction, il s'agira d'une striction, d'un pli en compression). Lorsque surviendra une sollicitation importante, quelque soit son origine, c'est en ces points que se concentreront les contraintes et, après répétition de sollicitations successives, c'est en ces points que se produiront tôt ou tard les cassures.

Il en résulte que le revêtement ne remplira ses conditions de services sans endommagement que si les contraintes et déformations qui y naissent sont en dessous de leur limite élastique, constat qui devient de ce fait le critère performanciel de la résistance du revêtement. Il importe donc de connaître ces paramètres pour concevoir correctement un revêtement qui résiste durablement aux efforts qui lui sont transmis par son support ou par le milieu extérieur.

La limite élastique est mesurable. Elle se caractérise par une contrainte critique σ_c et une déformation relative critique ϵ_c .

Le terme « contrainte limite d'élasticité σ_c » est préférentiellement attachée aux solides viscoélastiques (dans notre cas, enrobé bitumineux modifié), alors que l'on préférera le terme « seuil d'écoulement visqueux M » pour désigner le même critère dans un comportement viscoplastique (par exemple asphalte).

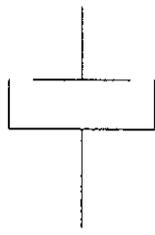
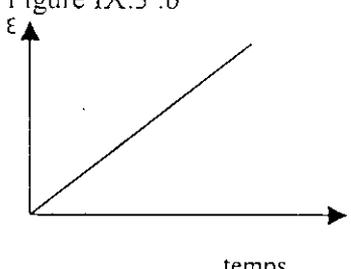
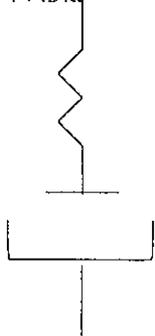
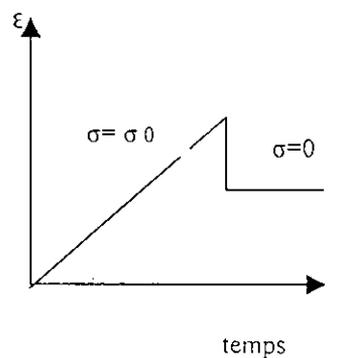
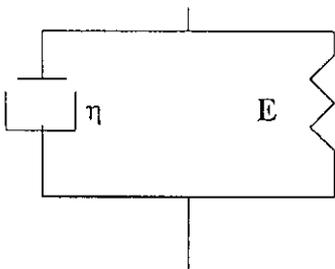
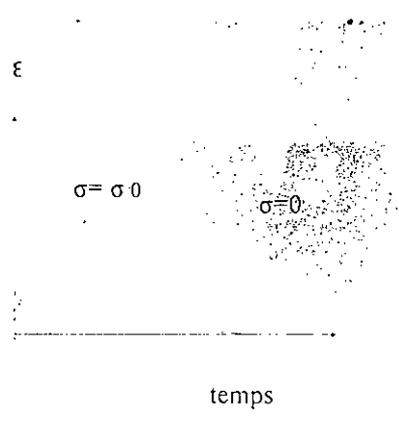
Donc le franchissement de la limite élastique est la cause principale de cassure dans les revêtements de type visco-élastique ou visco-plastique.

IX.4. Modèles de corps :

Dans le cadre qui nous intéresse ici, on distinguera différents modèles de comportement rhéologique dans le domaine des températures de service des routes (- 20°C, + 80°C).

Le comportement est caractérisé par une combinaison de revêtement et d'émulsifiant

CHAPITRE IX : Etude du comportement rhéologique des bétons bitumineux

Définition	Représentation	Graphique type ϵ -t
<p>A/ le liquide visqueux :</p> <p>modèle newtonien</p> <p>exemples : l'huile</p>	<p>Figure IX.3.a</p> 	<p>Figure IX.3.b</p> 
<p>b/ le liquide visco-élastique :</p> <p>modèle de Maxwell :</p> <p>exemple : certain bitume de distillation directe</p> <p>- L'amortisseur à un coefficient de viscosité η</p> <p>La déformation totale est égale à la somme des déformations du ressort et de l'amortisseur (respectivement ϵ_E, ϵ_v) ; Car il sont monté en série.</p> <p>(1) $\epsilon = \epsilon_E + \epsilon_v$</p> <p>Si une contrainte constante τ_0 est appliquée à l'instant $t=0$ et retirée à l'instant $t=t_1$, la réponse sera comme suit :</p> <p>(2) $\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0 \cdot t}{\eta}$ $t_0 \leq t \leq t_1$ (fluage)</p> <p>(3) $\epsilon(t) = \frac{\sigma_0 \cdot t_1}{\eta}$ ($t > t_1$)(recouvrement)</p> <p>Il n'y a pas de coefficient caractérisant le temps, car les action des deux modèles sont indépendantes.</p>	<p>Figure : V.3.a</p> 	<p>Figure V.3.b</p> 
<p>c/ le solide visco-élastique :</p> <p>modèle de kelvin-voigt.</p> <p>exemple : le bitume oxydé modifié.</p> <p>Le ressort et l'amortisseur sont en parallèle .</p> <p>Le ressort à un module E.</p> <p>L'amortisseur à un coefficient de viscosité η.</p> <p>Le ressort et l'amortisseur subissent une même déformation respectivement ϵ_E, ϵ_v ; Car ils sont montés en parallèle.</p> <p>La contrainte totale subit par le système :</p> <p>(4) $\sigma = \sigma_v + \sigma_E$</p> <p>Le test de fluage selon le système du modèle de kelvin-voigt se passe comme suit :</p>	<p>Figure : IX.3.a</p> 	<p>Figure : IX.3.b</p> 

Une contrainte constante σ_0 est appliquée à l'instant $t=0$ et retirée à l'instant $t=t_1$
 La réponse mathématique est la suivante :

$$(5) \varepsilon(t) = \left(\frac{\sigma_0}{E}\right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}\right) \quad (\text{fluage})$$

$$(6) \varepsilon(t) = \left(\frac{\sigma_0}{E}\right) \cdot e^{-\frac{-(t-t_1)}{\lambda}} \quad (t > t_1) \quad (\text{recouvrement})$$

λ : temps de freinage, définit comme étant $\lambda = \eta/E$ est le temps caractéristique décrivant la réponse du modèle.

d/ le solide visco-plastique

Modèle de Bingham

Exemple : l'asphalte - Le PVC-P - Le mastic

Dans un diagramme ε - t (déformation, temps) sous contrainte σ constante, l'existence d'un seuil d'écoulement visqueux sera caractérisée par un comportement élastique (déformation constante sous contrainte constante) en dessous du seuil, et de fluage (déformation croissante sous contrainte constante) au dessus du seuil d'écoulement. La contrainte limite σ_c (ou M , seuil d'écoulement) de déblocage du patin caractéristique du modèle de Bingham a été dépassé, libérant du même coup l'amortisseur symbole de l'écoulement visqueux.

Figure : IX.4.a:

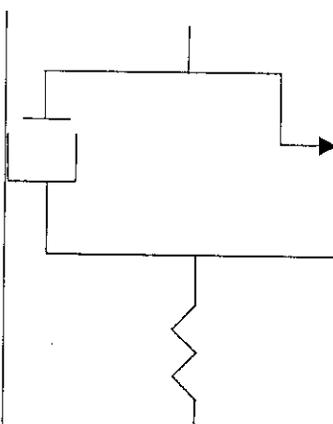
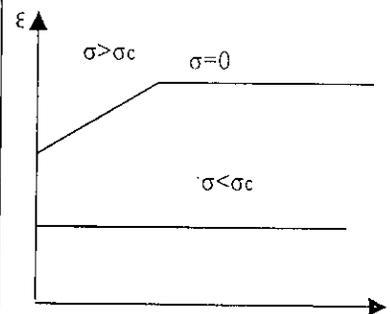


Figure : IX.4.a



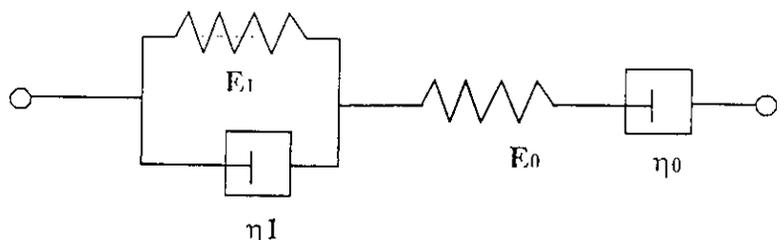
e) Model de Burger :

Jusqu'ici, uniquement deux paramètres ont été utilisés dans la simulation du phénomène du fluage, **Burger** a utilisé quatre paramètres pour rendre le phénomène plus réaliste, il a en quelque sorte fait un assemblage du modèle de **Maxwell** et de **Kelvin-voigt**.

La déformation finale est déduite intuitivement en séparant les deux réponses.

Sachant qu'une contrainte constante $\sigma = \sigma_0$ est appliquée à l'instant $t=0$, et retirée à l'instant $t=t_1$, la réponse de la déformation sera :

Figure : IX.5: diagramme des quatre paramètre du modèle de Burger.



$$(7) \quad \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0 \cdot t}{\eta_0} + \left(\frac{\sigma_0}{E_1}\right)(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_1}})$$

(Fluage)

Cette expression est divisée en trois zones :

1) la déformation instantané due au ressort de Maxwell

$$\text{-----} \rightarrow \varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_0}$$

2) La réponse viscoélastique des composants de Kelvin-voigt pour la quelle la déformation atteint une valeur équilibrée quand $t \gg \lambda_1$

$$\text{-----} \rightarrow \varepsilon_{eq} = \frac{\sigma_0}{E_1}$$

3) La réponse purement visqueuse du système due à l'amortisseur de Maxwell qui survient après que les éléments de Kelvin-Voigt aient atteint leur équilibre ; en ce point, la pente de la réponse déformation-temps est constante et égale à la vitesse de déformation

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma_0}{\eta_0}$$

-cette zone là est apparente dans la (Figure :V.3.a), et la valeur de la déformation correspondante est donnée dans le diagramme. Une variable intéressante peut être définie dans le but de quantifier la déformation recouvrable. Cette déformation est directement attribuée aux composants élastiques, la déformation recouvrable est appelée l'état stable de déformation $\varepsilon_s(0)$ ceci est équivalent à une extrapolation sur le courbe de l'état stable. L'extrapolation est apparente dans la (Figure V.6).

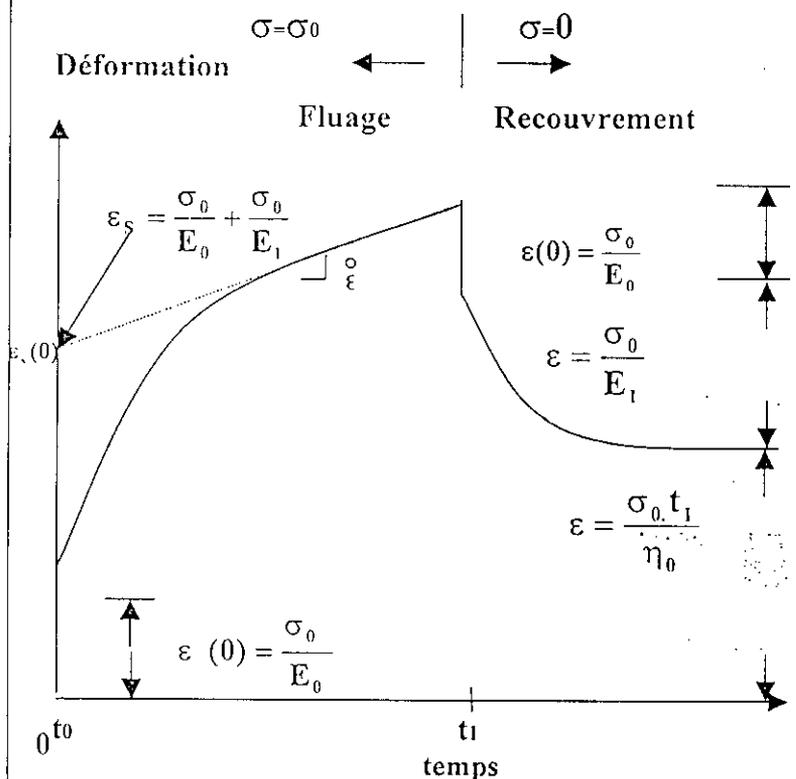
$$(8) \quad \varepsilon_s(0) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1}$$

L'équation décrivant cette extrapolation est la suivante :

$$(9) \quad \varepsilon(t) = \varepsilon_s(t) + \frac{\sigma_0 \cdot t}{E_0}$$

Ou $\varepsilon_s(0)$ est la tangente et $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta_0}$ est la pente

Figure IX.6 : Fluage et Recouvrement du modèle de BURGER



de la vitesse de déformation, l'équation de l'état stable (équation (9)) est équivalente à l'équation (2) qui décrit la réponse du modèle de Maxwell, et révèle qu'en $t \gg \lambda_1$ le modèle de Burger est équivalent en modèle de Maxwell.

La contrainte est enlevée à l'instant t_1 , la réponse recouvrement du modèle de Burger est donnée par l'expression :

$$(10) \quad \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0 \cdot t_1}{\eta_0} + \left(\frac{\sigma_0}{E_1} \right) e^{\left[\frac{-(t-t_1)}{\lambda_1} \right]}$$

$t > t_1$ (recouvrement)

-Le terme visqueux $\frac{\sigma_0 \cdot t_1}{\eta_0}$ est dû à une déformation permanente de l'amortisseur de Maxwell, et s'élève jusqu'à la déformation non recouvrable $\varepsilon(\infty)$, cette valeur peut-être directement lue de la courbe recouvrement.

-Une méthode rapide consiste à comparer l'état stable de déformation $\varepsilon_s(0)$ relative au test de fluage à la déformation recouvrant dans le test de recouvrement, et cela dans l'échantillon restant dans la région linéaire visco-élastique durant le test de fluage. Aussi, il est possible de comparer le terme visqueux $\varepsilon(\infty)$ et

$\varepsilon = \frac{\sigma_0 \cdot t_1}{\eta_0}$. Si la déformation recouvrable est plus petite que l'état stable de déformation, alors l'échantillon a été testé dans un domaine linéaire visco-élastique.

e.1) Les cas limites du modèle de Burger :

- Le premier cas à considérer est d'écartier le ressort de Maxwell du modèle de Burger (le rendre infiniment rigide $\rightarrow E_0 = \infty$), cela sous-entend que physiquement il n'y a pas de saut de déformation instantanée. En subséquent 3 expressions des paramètres de fluage peuvent être dérivées de l'équation en supposant $E_0 = \infty$, et sont connus sous le nom du modèle de Jeffrey.

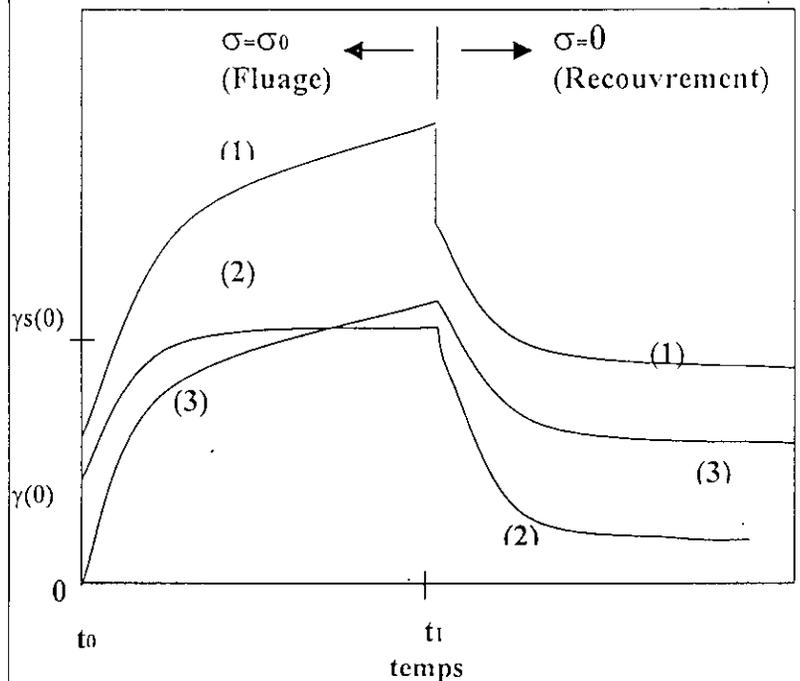
$$(11) \quad \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0 \cdot t}{\eta_0} + \left(\frac{\sigma_0}{E_1} \right) \left(1 - e^{\left[\frac{-t}{\lambda_1} \right]} \right)$$

(fluage)

- Le résultat est illustré par la courbe 3 (figure

Figure : IX.7 : Réponse du modèle de Burger avec deux de ses cas limites.

Déformation



V.7). l'amortisseur libre, montre une déformation permanente, et la réponse des éléments de kelvin-voigt n'est pas très satisfaisante, la courbe recouvrement peut aussi être écrite sous la forme suivante :

$$(12) \quad \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0 \cdot t_1}{\eta_0} + \left(\frac{\sigma_0}{E_1} \right) e^{\left[\frac{-(t-t_1)}{\lambda_1} \right]} \quad t > t_1$$

(recouvrement)

- L'état stable de déformation due à l'élasticité et égale à $\varepsilon_s(0) = \frac{\sigma_0}{E_1}$ et la somme des déformations permanentes est égale à $\varepsilon = \frac{\sigma_0 \cdot t_1}{\eta_0}$.

-Le deuxième cas limite est d'écartée l'amortisseur de Maxwell du modèle de le Burger, (l'amortisseur est infiniment rigide $\eta_0 = \infty$). Le résultat nous révèle que l'expression des trois paramètres de fluage peuvent être dérivés de l'équation (7), en mettant $\eta_0 = \infty$.

$$(13) \quad \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \left(\frac{\sigma_0}{E_1} \right) \left(1 - e^{\left[\frac{-t}{\lambda_1} \right]} \right)$$

(Fluage)

- ce système expérimente le saut instantané de déformation, parce que l'écoulement n'a pas lieu, ce modèle est utile pour décrire les réponses au fluage pour les substances ayant une résistance à la contrainte, ce résultat est traduit sous forme de courbe (2) dans la (figure5c), la courbe de recouvrement dans ce cas correspond à l'expression suivante :

$$(14) \quad \varepsilon(t) = \left(\frac{\sigma_0}{E_1} \right) e^{\left[\frac{-(t-t_1)}{\lambda_1} \right]}$$

t > t₁ (Recouvrement)

Il est clair que pour cette courbe, aucune déformation permanente ne s'est produite et ainsi la contrainte appliquée est inférieure à la limite de la résistance élastique de la substance, toute la déformation est recouverte et est équivalente à l'état stable de déformation

$$\varepsilon_s(0) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1}$$

- Les quatre paramètres généraux du modèle de Burger sont illustrés dans la courbe(1) (figure V.7), et c'est le modèle le plus choisi pour stimuler la réponse au fluage mesurer avec un rhéomètre à contrainte contrôlée.

IX.5. Comparaison entre le modèle de Kelvin-Voigt et le modèle de maxwell :

Les résultats du test de fluage générés des modèles de Maxwell et Kelvin-voigt sont illustrés dans la (figureV.8). Ces courbes sont tracées à partir équations de fluage et de recouvrement pour chaque'un des modèles.

Un couple de caractéristiques intéressantes sont clairement apparentes dans ces courbes de fluage :

- o La réponse de Kelvin-voigt atteint une certain équilibre en terme de valeur de déformation qui est équivalente à celle du modèle de Hooke $\varepsilon_{eq} = \frac{\sigma_0}{E_1}$
- o La réponse du modèle Kelvin-voigt n'est pas immédiate ; la réponse de l'amortisseur est retardé.

Une caractéristique temporelle de ce retard est donnée par la valeur $\lambda = \frac{\eta}{E}$ qui est défini comme (un retard).Ainsi une grande viscosité va causer un retard important qui va freiner la déformation.

Si on considère la courbe de recouvrement du modèle de Kelvin-voigt, le retard temporel λ et le même que celui de la courbe de fluage tant que l'échantillon est testé dans la zone linéaire visco-élastique, il faut noter que le comportement du recouvrement prédit par l'équation (6), stipule que le temps expérimental est assés long pour admettre que le modèle ait atteint un équilibre en déformation(quand $t \gg \lambda$ alors $\varepsilon_{eq} = \frac{\sigma_0}{E_0}$). Il est

important aussi de noter que après que la contrainte soit retirée, le modèle de kelvin-Voigt recouvre éventuellement sa configuration initiale. En d'autres termes, aucune autre déformation permanente se produit. La substance qui exhibe ce caractère peut-être décrite comme étant un solide visco-élastique et donc reprend toujours sa position d'équilibre initial. Le solide visco-élastique est dit possédant une mémoire. La caractéristique temps nécessaire pour une réponse est un retard temporel. Si la viscosité de l'amortisseur est élevée, alors l'isolement de la réponse à la contrainte imposer est grandes. Beaucoup de caoutchouc et de gels sont des solides visco-élastique.

CHAPITRE IX : Etude du comportement rhéologique des bétons bitumineux

La réponse du modèle de Maxwell dans la (figurV.8), révèle que la réponse élastique est immédiate sans aucun (retard), parce que les éléments sont en serie et la contrainte est partout la même , la réponse élastique est entièrement due au ressort et la réponse visqueuse à l'amortisseur.

- Le saut initial de déformation est équivalent à $\varepsilon_{eq} = \frac{\sigma_0}{E}$
- La déformation subséquente est égale à $\varepsilon = \frac{\sigma_0 \cdot t}{\eta}$

Parce que l'amortisseur continue à se déformer tant que la contrainte est présente, ce système n'atteint pas l'équilibre en déformation. N'importe quelle déformation imposé à l'amortisseur est permanente. La contrainte tangentielle est équivalente à la pente de la réponse déformation-temps. Ceci est possible pour calculer la viscosité par l'expression

$$\dot{\varepsilon}_0 = \frac{\sigma_0}{\eta}$$

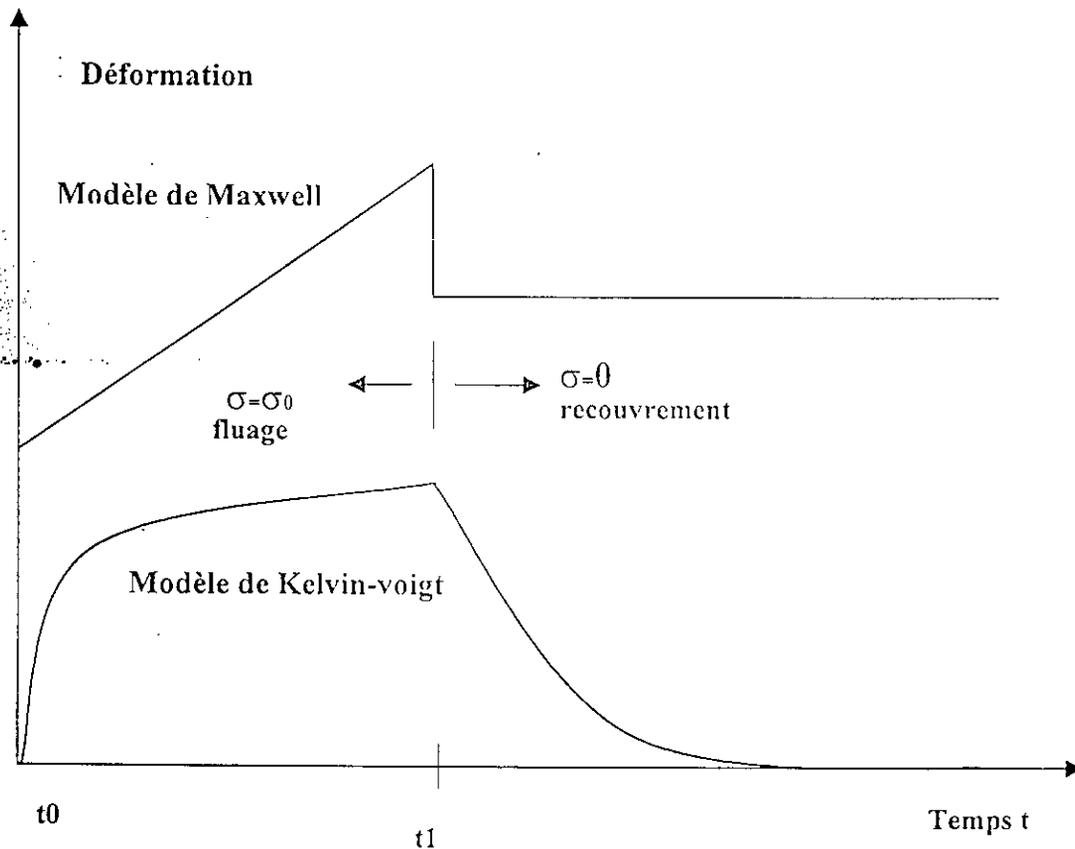
La courbe de recouvrement du modèle de Maxwell présenté en (figureV.8), Montre que la seule déformation recouvrable est celle du ressort. Ce recouvrement est instantané et est équivalent à $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E}$. Le saut de fluage et (recovery recoil) vont être égaux si l'échantillon est testé dans la zone visco-élastique .

La déformation de l'amortisseur durant le test de fluage est permanente et ne peut pas être recouverte. La substance qui exhibe ces caractéristiques est appelée **liquide visco-élastique** . vu que le fluide n'a pas de position d'équilibre initial et ainsi pas de mémoire alors il ne va pas reprendre sa position originale. Les polymères se comportent généralement comme un liquide visco-élastique .

Il n'est pas commode d'attendre qu'une substance donnée se comporte comme l'un de ces modèles. La plus part des matériaux se comporte comme une combinaison de modèles avec un spectre de temps de relaxation.

Donc les modèles illustrés prévoient d'une manière approcher la base physique pour expliquer les effets visco-élastiques. Néanmoins, il est démontré que les substances visco-élastiques peuvent se comporter comme d'autres solides ou liquides.

Figure IX.8 : Réponse du fluage et du recouvrement des modèles de Maxwell et de Kelvin-voigt



IX.6. La complaisance :

quand on attribue à la déformation des paramètres expérimentaux, la proportionnalité entre la déformation et la contrainte mesurée est le module (exemple : $\sigma(t) = E(t) \cdot \varepsilon(t)$, dans le cas du test de fluage, quand la contrainte est transmise, et la déformation mesurée ; ce n'est pas avantageux mathématiquement d'exprimer la proportionnalité en termes de module, de se fait, si on inspecte les variables de l'équation, il est apparent que le terme $(\frac{1}{E_i})$ est omniprésent, il est alors plus intéressant de définir une proportionnalité directe entre la déformation mesurée la contrainte transmise, ce facteur là est défini sous le nom de **COMPLAISANCE**.

$$(15) \quad \varepsilon(t) = J(t) \cdot \sigma(t)$$

- parce que la complaisance est indépendante de la contrainte appliquée, il est meilleur de schématiser les résultats mesurés comme étant une fonction $J(t)=f(t)$ à la place de, si il est défini que la COMPLAISANCE est dépendante de la contrainte appliquée alors l'échantillon est testé dans la zone non linéaire visco-élastique.

IX.7. Remarque Générale concernant le test de fluage :

le test de fluage peut-être développé en calculant les composants élastiques et visqueux de l'échantillon, en simulant le phénomène de l'existence réelle de la contrainte contrôlée comme la sédimentation.

Les propriétés de la visco-élasticité sont généralement caractérisées en termes de temps de relaxation λ_1 , l'état stable de complaisance $J_s(t)$, et la viscosité η_0 , le test de fluage est généralement converti en variable de contraintes appliquées, dans le but de s'assurer que $J(t)$ est indépendante de la contrainte tangentielle, et que le résultat peut être reproduit, quand la contrainte formelle est rencontrée, l'échantillon est dans la zone visco-élastique ; et on peut aussi comparer l'état stable de COMPLAISANCE à la COMPLAISANCE recouverte, afin de s'assurer de la linéarité de la visco-élasticité. À partir des mesures de la courbe $J(t)=f(t)$, il est possible de choisir un modèle mécanique approprié pour ajuster les données, le modèle mécanique avec quatre de ses paramètres a été dérivé, et ses caractéristiques particulières sont dans les graphes présentés.

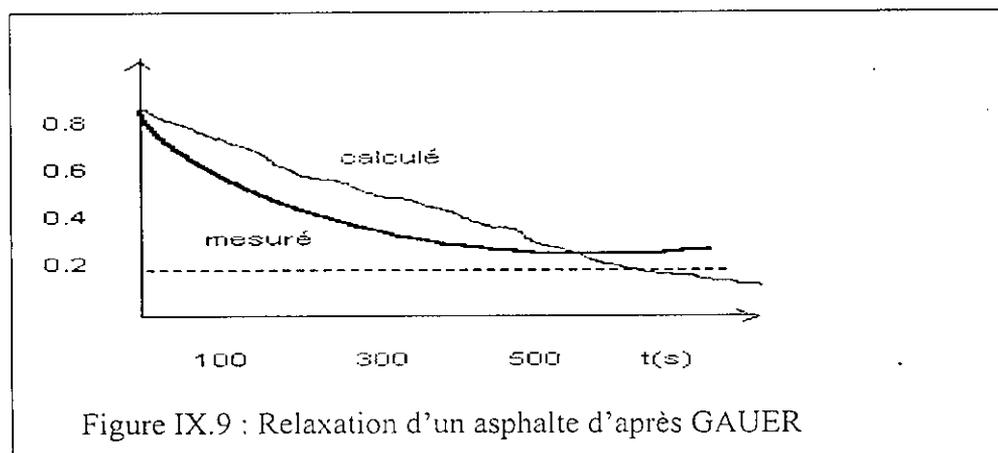
IX.8. Relaxation des solides de Bingham :

Nous venons d'exprimer l'affirmation que la contrainte σ nécessaire pour maintenir une déformation donnée dans un solide visco-plastique si le seuil d'écoulement a été dépassé ($\sigma > \sigma_c$) jusqu'à une limite asymptotique σ_c (ou seuil d'écoulement M), cette propriété est validée par quelques mesures de relaxation, malheureusement en petit nombre et interrompue prématurément, dues en particulier à GAUER ; RUBIO et KLUG, et LEMPE. Les 3 expériences seront résumées ci-après.

IX.8.1. Expérience de GAUER :

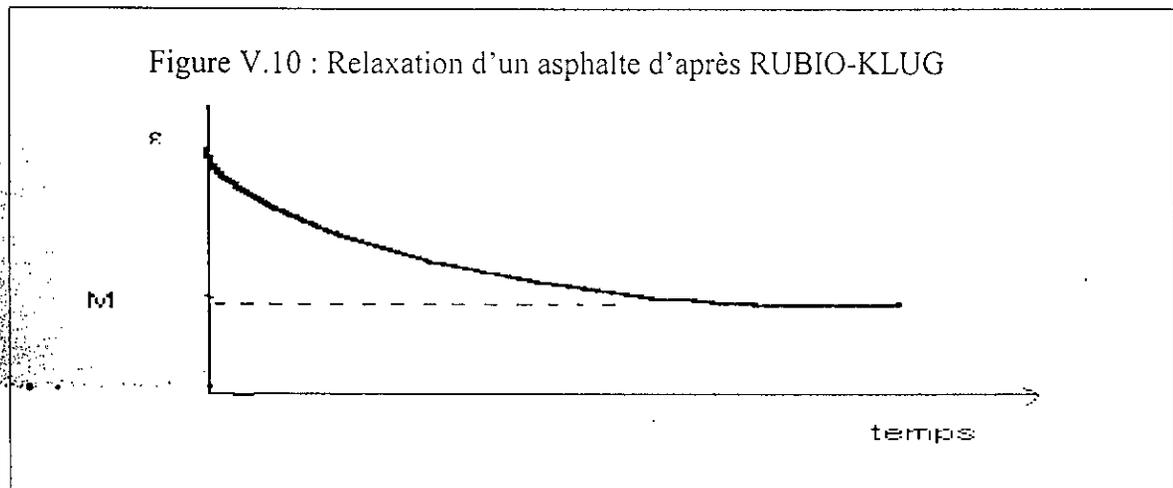
GAUER a mesuré pendant 10 minutes la relaxation d'un asphalte En ayant au préalable émis l'hypothèse qu'il pourrait s'agir d'un corps de Burger obéissant à une loi de type $\sigma = \sigma_0 e^{-t/\tau}$.

Les relations montre d'une part que la relaxation de l'asphalte ne suit pas le modèle de Burger, d'autre part laisse percevoir la possibilité d'une asymptote. Cependant, l'auteur compare la relaxation de différent asphalte à 0°C et à 10°C.



IX.8.2. Expérience de RUBIO et KLUG :

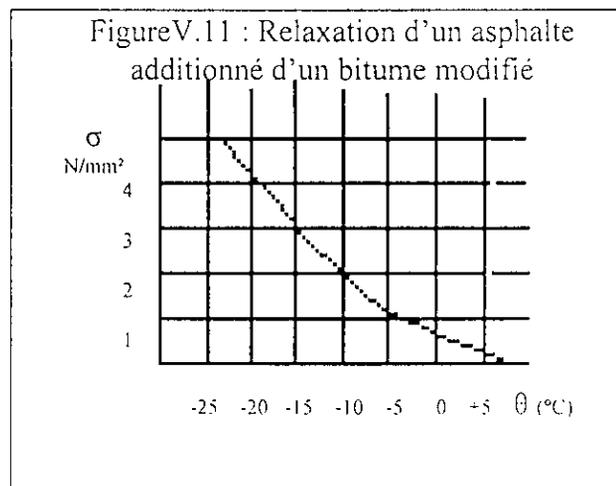
Ces auteurs cherchent à déterminer les courbes types de comportement mécanique d'un asphalte le tracé de la courbe de relaxation montre un début d'asymptote qui valide l'existence du seuil d'écoulement M.



IX.8.3. Expérience de LEMPE :

L'auteur place le produit sous contrainte en bloquant les extrémité de l'éprouvette (0,3 x 0,04m) et en la refroidissant à vitesse constante 8°C/h. Il détermine l'évolution de la contrainte de tension dans ces conditions, pour mettre en évidence l'existence d'un seuil d'écoulement séparant un comportement élastique d'un comportement visqueux. Ce seuil se situe à - 30°C sous 2 N/mm² Dans le cas d'un asphalte additionné d'un bitume naturel et à -18°C sous 2 N/mm² également pour un asphalte additionné de bitume modifié pour EPDM.

L'auteur procède également à des mesures de relaxation à température constante pendant 12h mais ne donne pas de courbe illustrant ses résultats. Il indique qu'au bout de 12h, la contrainte résiduelle dans l'asphalte additionné de bitume naturel de 55% à 6°C / de 74% à 12°C et de 83% à 20°C, ce qui tempère l'affirmation de l'existence d'un seuil d'écoulement à 13°C tout en montrant que le produit se rapproche d'autant plus d'un comportement élastique que sa température est basse.



IX.9. Résumé :

Le modèle analytique utilisé pour décrire les résultats du test de fluage, toutes les informations collectées ont portés sur le terme visqueux, élastique, visco-élastique, visco-palastique. Un modèle mécanique simple à été construit dans le but d'illustrer comment la visco-élasticité peut se manifester. Le modèle de Maxwell à été présenté comme un liquide visco-élastique et celui de Kelvin-Voigt comme un solide visco-élastique. Les quatre paramètres du modèle de Burger avec leur cas limite ont été analysés, et il simule assé bien le comortement d'un béton bitumineux, ces modèles se sont révélé utile pour prévoir comment la courbe de fluage doit opérer, et comment interpréter les zones variables des courbes de fluage et de recouvrement.

IX.10. APPLICATION DU MODELE DE BURGER A NOTRE CAS :

IX.10.1. Méthode de calcul :

Le principe de la mesure en fluage statique est d'appliquer un temps suffisamment long pour atteindre un état d'écoulement permanent .

Lors que le temps de mesure excède le plus long temps de retardation (propriété intrinsèque au matériau) ; on s'affranchit de la composante élastique et on mesure la composante purement visqueuse du matériau ; De plus, lorsque les contraintes de cisaillement sont suffisamment faibles, la viscosité tend vers une valeur constante qui, à une température donnée, constitue une caractéristique intrinsèque du matériau pendant la phase fluage (Figure 5b).

Les résultats de l'essai du fluage statique sont exposés de la manière suivante :

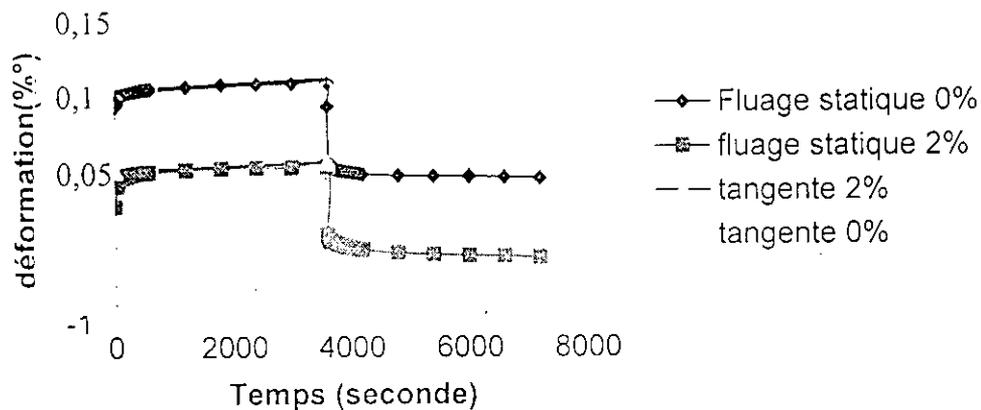


Figure V.12 ; Les courbes de fluage statique avec leur tangentes

IX.10.2. Fluage :

L' équations de fluage du modèle de Burger donne:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0 \cdot t}{\eta_0} + \left(\frac{\sigma_0}{E_1}\right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_1}}\right)$$

$t_0 \geq t \geq t_1$

Pour facilité son application à notre cas, elle est séparé en trois parties:

IX.10.2.1. Déformation élastique instantané due au ressort de Maxwell (saut élastique) :

$$\frac{\sigma_0}{E_0}$$

Cette partie n'est pas intéressante car elle ne contient aucune composante visqueuse et qu'elle ne dépend pas du temps.

le module d'élasticité instantané est déduit de cette partie

a) pour 0% d'ajout :

$$\Rightarrow E_0 = 14000 \text{ Mpa}$$

b) Pour 2% d'ajout :

$$\Rightarrow E_0 = 28000 \text{ Mpa}$$

IX.10.2.2. Partie viscoélastique des composants de Kelvin-voigt (réarrangement des grains):

$$\left(\frac{\sigma_0}{E_1}\right) \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{\lambda_1}\right)}\right)$$

a) Pour 0% d'ajout :

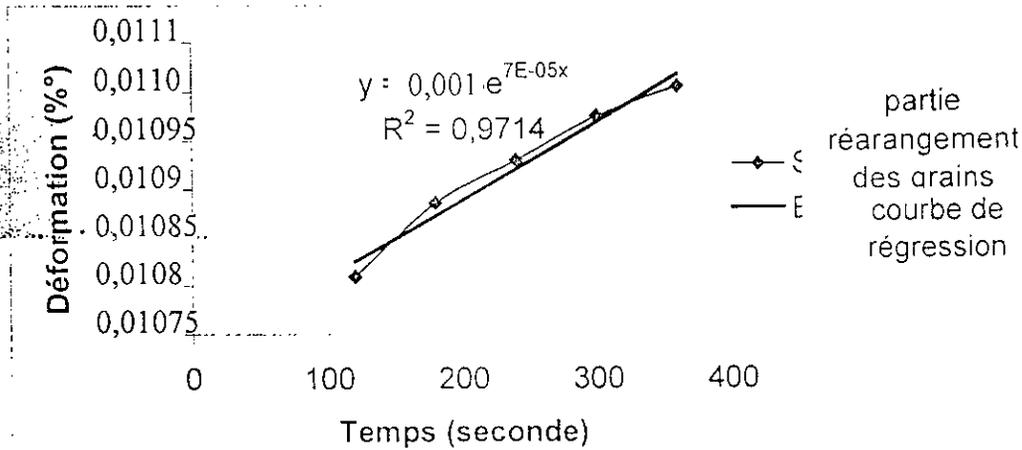


Figure V.13.: partie visco-élastique de la courbe 0%

$$e^{\left(\frac{-E_1}{\eta_1}t\right)} = e^{(7 \cdot 10^{-05})t}$$

De l'équation (8) : $\varepsilon_s(0) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1}$

$$\Rightarrow E_1 = 140000 \text{ Mpa}$$

d'où une viscosité de : $\eta_1 = \frac{E_1}{\lambda_1}$ qui est égale à $\Rightarrow \eta_1 = 9,8 \text{ Mpa.s}$

b) Pour 2% d'ajout :

$$e^{\left(\frac{-E_1}{\eta_1}t\right)} = e^{(-310^{-5})t}$$

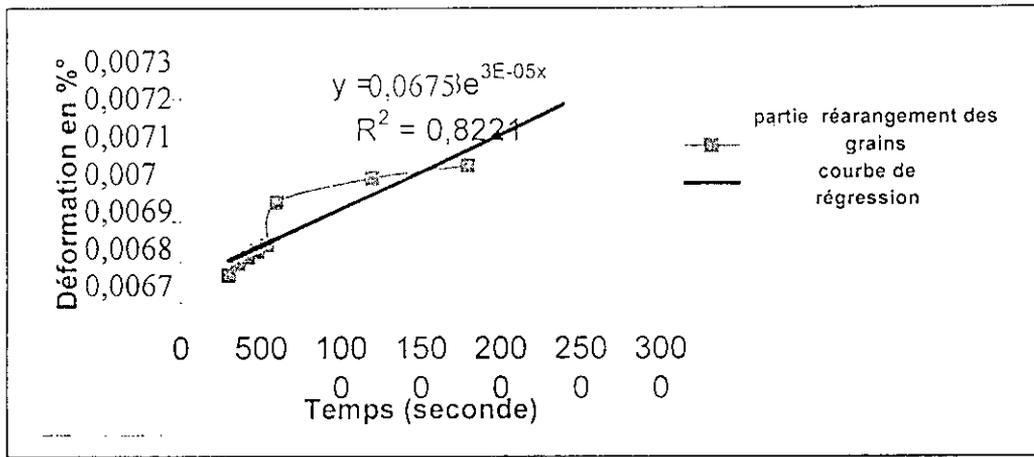


Figure V.14: partie visco-élastique de la courbe 2%

De l'équation (8) : $\varepsilon_s(0) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1}$

$\Rightarrow E_1 = 732984,2\text{Mpa}$

d'où une viscosité de : $\eta_1 = \frac{E_1}{\lambda_1}$ qui est égale à $\eta_1 = 21,98\text{Mpa}$

IX.10.2.3. Déformation purement visqueuse : $\frac{\sigma_0 \cdot t}{\eta_0}$

C'est la partie où le temps a peu d'influence sur la déformation

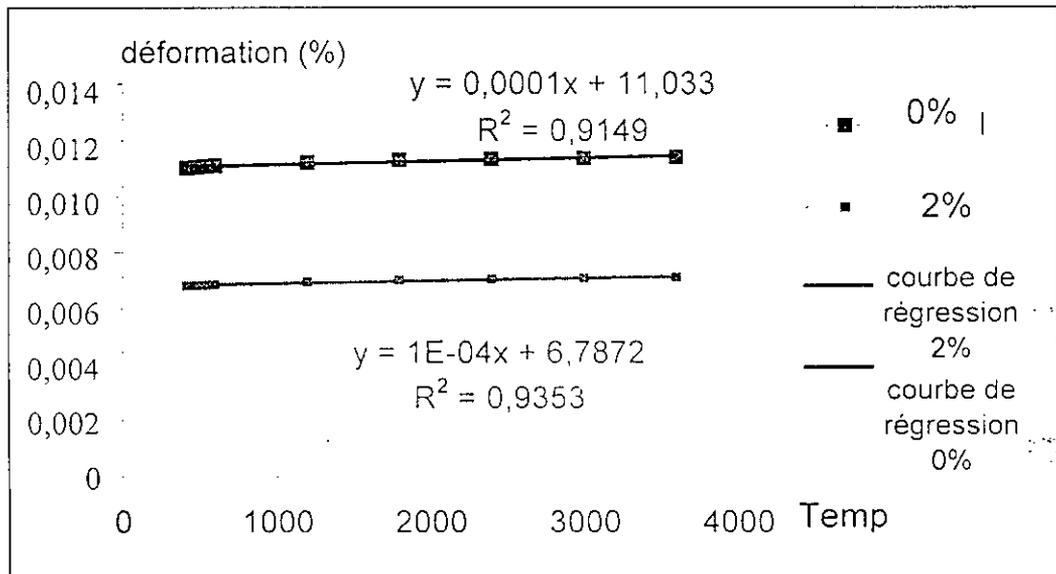


Figure V.15: partie purement visqueuse de la courbe

On peut calculer la viscosité η_0 par identification car le terme $\frac{\sigma_0}{\eta_0}$ est égale à la pente de la courbe de fluage soit:

$$\frac{\sigma_0}{\eta_0} = 0,0001 \text{ pour l'enrobé témoin et modifié à 2\% vue qu'il ont une même pente}$$

sachant qu'une contrainte de 0,14 Mpa est appliquée l'ors qu'on effectue un essai de fluage statique alors

$$\eta_{2\%} = \eta_{0\%} = 1400 \text{ Mpa.s}$$

IX.10.1. Conclusion :

On remarque clairement par l'application du modèle de BÜRGER à notre enrobés que l'ajout de 2% de poudrette de caoutchouc dans un enrobé constitué de bitume 40/50 et de granulats basaltique augmente considérablement le module d'élasticité instantanée (E_0).

Quant à la viscosité elle est très faible dans la phase (réarrangement des grain) pour 0% d'ajout et 2% d'ajout

Dans la phase purement visqueuse de l'enrobé en remarque que la viscosité augmente de façon significative pour les deux matériaux .

CHAPITRE X
CONCLUSION
GENERALE

L'ajout de poudrette de caoutchouc dans le squelette solide permet d'obtenir un revêtement routier doté d'un comportement mécanique amélioré.

La présente étude a permis de confirmer les résultats des essais qui ont déjà été faits sur l'incorporation de la poudrette dans le squelette granulaire, par une étude statistique qui a montré:

- l'amélioration mécanique de la stabilité et du fluage Marshall
- Un meilleur rapport r/R en ce qui concerne l'essai duriez
- Une amélioration de la compacité .

D'autres études ont été faites sur l'ajout de la poudrette de caoutchouc non pas dans le squelette solide mais dans le liant (Thèse de magistère « ETUDE DE L'ACTION DES BITUMES MODIFIES SUR LE COMPORTEMENT DES ENROBES »USTHB) et on a abouti aux résultats suivants :

- o une bien meilleure faisabilité
- o et un moindre gonflement lors de la mise en œuvre ainsi
- o qu'un pourcentage de d'ajout optimal de 2% dans le squelette solide alors qu'il varie entre 5 et 7% d'ajout dans le liant (pour un bon comportement du bitume).

Les résultats de l'étude du comportement rhéologique des bétons bitumineux modifiés à 2% d'ajout de poudrette de caoutchouc ont montré que le module d'élasticité de l'enrobé modifié est largement supérieur à celui de l'enrobé témoin quand un réarrangement se produit et cela veut dire que l'orniérage est réduit de façon considérable

Dans la partie purement visqueuse de la courbe de fluage statique on remarque que la viscosité pour l'enrobé modifié ne dépasse pas celle de l'enrobé témoin cela veut dire que la poudrette n'a pas d'apport significatif en terme de fluage.

CHAPITRE

Annexes

Annexe 1 :
Résultats de l'essai
MARSHALL

1. RESULTATS DES GACHETS à 0% d'ajout :

DATE DE L'ESSAI : 18.5.2004

GACHE : Formulation basalte N°1

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.84	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	36 %	D3	2.53	P3	33,92	13.40	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100- P5	5.66
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0.94	S 2 =	41,8
Eprouvettes N°	1	2	3	4	Observations		
Poids des éprouvettes	1152.5	1209.8	1170.7	1187.7			
(Ø) Moyenne	100	99.8	101.16	101.16	100,5		
(H) Moyenne	62	63.75	60.63	62.6	62.25		
Stabilité à 0.86 mm / secondes	988	1194	1290	1178.8			
Diamètre après écrasement	98	98.5	97	97.5			
Déformation en 1/10 mm	2	1	4.16	3.66			
Compacité en %						96.76	
Densité Apparente						2.47	
Densité Vraie						2.39	

DATE DE L'ESSAI : 19.5.2004
 GACHE : Formulation basalte N°2

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
		D1	D2	P1	P2	S 2 =	
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.84	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	36 %	D3	2.53	P3	33,92	13.40	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100- P5	5.66
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0.94	S 2 =	41,8
Eprouvettes N°	1	2	3	4	Observations		
Poids des éprouvettes	1990.3	1178.6	1997.3	1196.1			
(Ø) Moyenne	101.5	101.5	102	101.4	101.6		
(H) Moyenne	64.7	63.6	64.1	64.2	64.1		
Stabilité à 0.86 mm / secondes	1104	1056	1344	1392			
Diamètre après écrasement	97.0	97.2	96.0	96.1			
Déformation en 1/10 mm	2	1	4.16	3.66			
Compacité en %					98.7		
Densité Apparente					2.36		
Densité Vraie					2.39		

DATE DE L'ESSAI : 24.5.2004
 GACHE : Formulation basalte N°3

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
		D1	D2	P1	P2	P3	P4
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.84	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	36 %	D3	2.53	P3	33,92	13.40	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100- P5	5.66
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0.94	S 2 =	41,8
Eprouvettes N°	1	2	3	4	Observations		
Poids des éprouvettes	1186.9	1196.3	1177.4	1172.6			
(Ø) Moyenne	101.4	100.9	101.5	101.3	101.3		
(H) Moyenne	67.8	67.4	67.6	66.4	62.25		
Stabilité à 0.86 mm / secondes	950.3	859.8	814.5	814.5			
Diamètre après écrasement	96,7	97,3	96,8	97,9			
Déformation en 1/10 mm	4.7	3.6	4.7	3.4			
Compacité en %						97.1	
Densité Apparente						2.32	
Densité Vraie						2.39	

DATE DE L'ESSAI : 25.5.2004
 GACHE : Formulation basalte N°4

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.84	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	36 %	D3	2.53	P3	33,92	13.40	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100- P5	5.66
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0,94	S 2 =	41,8
Epreuves N°	1	2	3	4	Observations		
Poids des éprouvettes	1184.4	1141.4					
(Ø) Moyenne	101.8	100.6			101.6		
(H) Moyenne	62.5	58.9			60.8		
Stabilité à 0.86 mm / secondes	802.5	856					
Diamètre après écrasement	94.6	95.3					
Déformation en 1/10 mm	7.2	6.1					
Compacité en %						97.6	
Densité Apparente						2.33	
Densité Vraie						2.39	

RESULTATS DES GACHETS à 2% d'ajout :

DATE DE L'ESSAI : 23.5.2004

GACHE : à 2% d'ajout N°1

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
		D1	D2	P1	P2	P3	P4
8/15	34%	D1	2.64	P1	32	12.12	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	36 %	D3	2.53	P3	33,92	13.44	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100-P5	5.66
Teneur en poudre ;	2%	D5	0,8		1.88		
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0,94	S 2 =	71.85
Eprouvettes N°	1	2	3	4	Observations		
Poids des éprouvettes	1187.3	1196.6	1177.7	1172.7			
(Ø) Moyenne	101,3	101.1	101,6	101,3	100.5		
(H) Moyenne	62,7	66.1	62.6	61.1	62.25		
Stabilité à 0.86 mm / secondes	858.5	808	656.5	909			
Diamètre après écrasement	99	98,2	99	97,9			
Déformation en 1/10 mm	2.3	2.9	2.6	3.4			
Compacité en %						97.4	
Densité Apparente						2.32	
Densité Vraie						2.38	

DATE DE L'ESSAI : 26.5.2004
GACHE : Formulation basalte N°2

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.12	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	34 %	D3	2.53	P3	33,92	13.44	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100- P5	5.66
Teneur en poudre ;	2%	D5	0,8		1.88		
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0.94	S 2 =	71.85
Eprouvettes N°	1	2	3	4	Observations		
Poids des éprouvettes	1178.6	1176.9	1300	1286			
(Ø) Moyenne	101.13	101.1	101.4	101.2	101.2		
(H) Moyenne	64.2	62.6	63.45	63.3	63.4		
Stabilité à 0.86 mm / secondes	1959.8	1005	1306.5	1005			
Diamètre après écrasement	95.3	97.4	95.8	96.6			
Déformation en 1/10 mm	5.8	3.7	5.6	4.6			
Compacité en %						98.6	
Densité Apparente						2.34	
Densité Vraie						2.38	

DATE DE L'ESSAI : 29.5.2004
GACHE : Formulation basalte N°3

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
		D1	D2	P1	P2	P3	P4
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.12	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	34 %	D3	2.53	P3	33,92	13.44	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100- P5	5.66
Teneur en poudrette;	2%	D5	0,8		1.88		
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0.94	S 2 =	71.85
Eprouvettes N°	1	2	3	4	Observations		
Poids des éprouvettes	1195	1188					
(Ø) Moyenne	101.1	101.5			101.3		
(H) Moyenne	64.3	65.2			64.75		
Stabilité à 0.86 mm / secondes	900	750					
Diamètre après écrasement	98.5	99					
Déformation en 1/10 mm	3.1	4.4					
Compacité en %						98.3	
Densité Apparente						2.34	
Densité Vraie						2.38	

DATE DE L'ESSAI : 30.5.2004
GACHE : Formulation basalte N°4

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.12	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	34 %	D3	2.53	P3	33,92	13.44	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100- P5	5.66
Teneur en poudrette;	2%	D5	0,8		1.88		
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0.94	S 2 =	71.85
Eprouvettes N°	1	2	3	4	Observations		
Poids des éprouvettes	1201	1215	1216	1210			
(Ø) Moyenne	101,1	101,5	101,2	101,1			
(H) Moyenne	64,3	65,2	65,4	64,4			
Stabilité à 0.86 mm / secondes	1121,3	1121,3	1072,5	1267,5			
Diamètre après écrasement	98,5	99	97,2	96,8			
Déformation en 1/10 mm	2,6	2,5	4	4,3			
Compacité en %						98.7	
Densité Apparente						2,349	
Densité Vraie						2.38	

Annexe 2 :
Résultats de l'essai
DURIEZ

RESULTATS DES GACHETS à 2% d'ajout :

DATE DE L'ESSAI : 30.5.2004

GACHE : Formulation basalte N°1

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.12	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	34 %	D3	2.53	P3	33,92	13.44	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100- P5	5.66
Teneur en poudre ;	2%	D5	0,8		1.88		
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0.94	S 2 =	71.85
Eprouvettes N°	A sec 18°C A (J+1)			A 7 jours Après immersion			Observations
	1	2	3	4	5	6	
Poids des éprouvettes	1017,7	1011,3	1010,9	1017,2	1023,5	1037,9	
(Ø) Moyenne	80,2	80,3	80,56	80,3	80,2	80,5	
(H) Moyenne	88,7	87,3	87,9	87	88,4	89,3	
Résistance (bars)	55	70	60	60	45	50	
Hauteurs après écrasement	85,4	83,1	75	83,3	84,1	86,7	
Déformation en 1/10 mm							
Rapport Immersion / a sec (%)							81
Densité Apparente							2,31
Densité Vraie							2,38
Compacité(%)							97

DATE DE L'ESSAI : 31.5.2004
GACHE : Formulation basalte N°2

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.12	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	34 %	D3	2.53	P3	33,92	13.44	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100- P5	5.66
Teneur en poudrette;	2%	D5	0,8		1.88		
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0.94	S 2 =	71.85
Eprouvettes N°	A sec 18°C A (J+1)			A 7 jours Après immersion			Observations
	1	2	3	4	5	6	
Poids des éprouvettes	993,7	1007,5	996,6	1037,6	1017,8	1019,8	
(Ø) Moyenne	79,6	79,9	79,9	80,9	80,6	80,6	
(H) Moyenne	93,3	92,5	93,9	90,8	79,2	91,5	
Résistance (bars)	25	30	25	20	30	25	
hauteurs après écrasement	81	83,2	84,6	85	74	79,6	
Déformation en 1/10 mm	12,3	9,3	9,3	5,8	5,2	11,9	
Rapport Immersion / a sec (%)							87,5
Densité Apparente							2,31
Densité Vraie							2,38
Compacité(%)							97

DATE DE L' ESSAI : 01.6.2004
 GACHE : Formulation basalte N°3

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.12	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	34 %	D3	2.53	P3	33,92	13.44	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100-P5	5.66
Teneur en poudre ;	2%	D5	0,8		1.88		
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0.94	S 2 =	71.85
Eprouvettes N°	A sec 18°C A (J+1)			A 7 jours Après immersion			Observations
	1	2	3	4	5	6	
Poids des éprouvettes	1007,9	1030,6		1038,5	1040,1		
(Ø) Moyenne	79,7	79,8		80	80,1		
(H) Moyenne	92	92		91,4	91,4		
Résistance (bars)	45	50		25	45		
hauteurs après écrasement	86,2	86		86,35	85,4		
Déformation en 1/10 mm	5,8	6		5,05	6		
Rapport Immersion / a sec (%)							73,7
Densité Apparente							2,30
Densité Vraie							2,38
Compacité(%)							96,6

RESULTATS DES GACHETS à 0% d'ajout :

DATE DE L'ESSAI : 01.6.2004

GACHE : Formulation basalte N°1

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
		D1	D2	P1	P2	P3	P4
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.12	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	34 %	D3	2.53	P3	33,92	13.44	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100-P5	5.66
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0,94	S 2 =	71.85
Eprouvettes N°	A sec 18°C A (J+1)			A 7 jours Après immersion			Observations
	1	2	3	4	5	6	
Poids des éprouvettes	1018,4	1011,3	1003,5	1029,8	1032,1	1038	
(Ø) Moyenne	80,06	80	79,9	80,63	79,85	80,4	
(H) Moyenne	93,75	91,275	90,4	90,15	94,95	92,15	
Résistance (bars)	35	45	40	40	15	25	
Hauteurs après 2écrasement	85	85,5	85,4	84,6	85,6	82,4	
Déformation en 1/10 mm	8,75	5,775	5	5,55	9,35	9,75	
Rapport Immersion / a sec (%)							66
Densité Apparente							2,20
Densité Vraie							2,38
Compacité(%)							92,3

DATE DE L'ESSAI : 07.6.2004
 GACHE : Formulation basalte N°2

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.12	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	34 %	D3	2.53	P3	33,92	13.44	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100- P5	5.66
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0.94	S 2 =	71.85
Epreuves N°	A sec 18°C A (J+1)			A 7 jours Après immersion			Observations
	1	2	3	4	5	6	
Poids des éprouvettes	990,8	994		1017,1	1015,6		
(Ø) Moyenne	79,7	80,2		80,15	80,1		
(H) Moyenne	87,9	85,8		97,1	97,6		
Résistance (bars)	55	55		35	35		
Hauteurs après écrasement	85	82,5		82,1	81,7		
Déformation en 1/10 mm	2,9	3,3		15	15,9		
Rapport Immersion / a sec (%)							63.63
Densité Apparente							2,24
Densité Vraie							2,39
Compacité(%)							94,1

DATE DE L'ESSAI : 08.6.2004
 GACHE : Formulation basalte N°3

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
		D1	D2	P1	P2	P3	P4
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.12	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	34 %	D3	2.53	P3	33,92	13.44	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100- P5	5.66
Module de Richesse :	3,68			100 - P5	0.94	S 2 =	71.85
Eprouvettes N°	A sec 18°C A (J+1)			A 7 jours Après immersion			Observations
	1	2	3	4	5	6	
Poids des éprouvettes	1095,8	1001		1118,2	1129,1		
(Ø) Moyenne	79,9	79,9		80,5	80,5		
(H) Moyenne	96,3	88,7		98	97,4		
Résistance (bars)	45	45		15	20		
Hauteurs après écrasement	90,2	84		90,7	91,2		
Déformation en 1/10 mm	6,1	4,7		7,3	6,2		
Rapport Immersion / a sec (%)							38,88
Densité Apparente							2,35
Densité Vraie							2,39
Compacité(%)							98,3

DATE DE L'ESSAI : 09.6.2004
 GACHE : Formulation basalte N°4

Fractions Provenance	Formule	Poids Spécifique (D)		Composition Centésimale (P)		Rapport P/D	
		D1	D2	P1	P2	P3	P4
8/15	36%	D1	2.64	P1	32	12.12	
3/8	28 %	D2	2.66	P2	26.38	9.92	
0/3	34 %	D3	2.53	P3	33,92	13.44	
Teneur en liant ;	6.02%	D4	1.02	P5	5.78	100- P5	5.66
Module de Richesse :	3,68			100 – P5	0.94	S 2 =	71.85
Éprouvettes N°	A sec 18°C A (J+1)			A 7 jours Après immersion			Observations
	1	2	3	4	5	6	
Poids des éprouvettes	980,1	1010,2		1042,1	1044,9		
(Ø) Moyenne	78,5	79,5		85,2	80,2		
(H) Moyenne	86,6	89,1		91,8	93,1		
Résistance (bars)	55	50		20	20		
Hauteurs après écrasement	85,2	85,3		85,65	85,1		
Déformation en 1/10 mm	1,4	3,8		6,15	8		
Rapport Immersion / a sec (%)							38,1
Densité Apparente							2,32
Densité Vraie							2,39
Compacité(%)							97,1