

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

MEMOIRE

Présenté

AU DEPARTEMENT DE MECANIQUE
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
UNIVERSITE DE BATNA

Pour obtenir le diplôme de

MAGISTERE EN GENIE MECANIQUE
Option : Sciences des matériaux

Par
M^{me} ADDACI Badra

COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES ENROBÉS BITUMINEUX RENFORCÉS PAR LA FIBRE DE VERRE

Soutenu publiquement le 2008, devant le jury composé de :

Dr Ammar ABBASSI	M.Conférences, Université de Batna	Président
Dr Rabah MANAA	Chargé de cours, Université de Batna	Rapporteur
Dr Toufik OUATTAS	M.Conférences, Université de Batna	Examineur
Dr Abdelhamid DJEBAILI	M.Conférences, Université de Khenchela	Examineur

REMERCIEMENTS

J'exprime mes remerciements à l'ensemble des personnes ayant contribué à l'aboutissement de ce travail de mémoire.

Je voudrais exprimer toute ma gratitude, au Dr MANAA mon encadreur de mémoire.

Je remercie le personnel du laboratoire des travaux publics d'ALTRO de SKIKDA .

Enfin, je voudrais dédier ce mémoire à l'ensemble de ma famille : à mon mari Abd elmadjid pour son soutien et sa patience sans limite, à ma chère mère, à mon père, à mes sœurs, à mon frère, à mon oncle Daoud et sa famille à mon cousin Djamel et sa famille, qui ont su me donner le goût du travail, à ma belle-famille également, à ma chère amie Lynda et sa famille pour m'avoir encouragé. Ainsi, je les remercie tous d'avoir contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

SOMMAIRE	01
AVANT PROPOS	02
INTRODUCTION	03
<u>CHAPITRE I</u> Généralités sur les produits noirs	04
I. les produits noirs	04
I.1 Introduction	05
I.2 Propriétés générales des liants hydrocarbonés	06
I.3 Les goudrons et brais de houille	06
I.4 Bitume	06
I.5 généralité sur les enrobés	09
<u>CHAPITRE II</u> Influence des actions appliqués à la chaussée	12
II.1 Effet du trafic	13
II.2 Effet de la température	15
II.2 dégradations	
<u>CHAPITRE III</u> Propriétés rhéologiques des liants bitumineux	19
III.1 classes de comportement des bitumes purs en fonction de déformation et de La température	19
III.2 les caractéristiques classiques	20
III.3 caractérisation des propriétés rhéologiques du liant dans le domaine linéaire (vel)	22
<u>CHAPITRE IV</u> propriétés rhéologiques des enrobes bitumineux	29
IV.1 généralités	29
IV.2 grandes classes de comportement	29
IV.3 exemples de caractérisation des enrobés à basse température	31
IV.4 Modélisation du comportement des matériaux bitumineux	
V.4.1 modélisation du comportement linéaire (vel)	37
V.4.1.1 Assemblage discret de ressorts et d'amortisseurs - spectre discret	37
V.4.1.2 modèles de maxwell et de kelvin-voigt généralisés	38
<u>CHAPITRE V</u> procédure expérimentales résultats et discussion	
V.1 Matériau d'essai	39
V.1.1 Essai sur les mélanges BB 0/14	42
V.3 essais sur le BB 0/14 renforcé par la fibre de verre	46
V.3.1 Essais de compression	46
V.3.2 Essais de flexion	48
V.4 Conclusion	50
Conclusion générale	51
Futurs travaux	52

Avant propos

La route est le principal vecteur de communication et d'échange entre les populations et même des nations en plus du rôle essentiel qu'elle joue dans l'intégration des activités économiques à la vie locale.

Utilisés dans la construction des routes, les bitumes, que l'on considère souvent comme des produits peu sophistiqués, apportent pourtant des solutions innovantes à des problèmes de société majeurs tels que la sécurité routière, l'intégration de la route aux paysages urbains et ruraux, ou l'impact environnemental de la construction des routes par la recyclabilité des matériaux.

En raison de ces atouts, les bitumes sont utilisables dans des applications très diverses. La modernisation de nos routes et au vu de la spécificité de nos reliefs et phénomènes météorologiques nous interpellent à promouvoir un travail de recherche pour une utilisation de ces produits dans des situations optimales (investissements plus durables dans le temps) et ce pour des raisons économiques et de sécurité des utilisateurs.

1. INTRODUCTION

Les structures de chaussées routières sont soumises, en service, à des sollicitations très complexes. La circulation automobile et le climat ont une influence importante sur le comportement des matériaux de chaussées. Dans certains pays tels que le Canada, les Etats-Unis, les pays nordiques et même l'Algérie, les chaussées subissent de grandes amplitudes thermiques et sont donc soumises au phénomène de fissuration thermique. Ces dernières années, ce phénomène s'est en plus aggravé par l'intensification des charges supportées par les structures de chaussées, cette intensification étant due en particulier à l'accroissement du trafic poids lourd .

Les enjeux économiques sont importants, tant au niveau du dimensionnement (couches de plus en plus minces, mise au point de produits innovants, *etc.*) que de l'entretien de la chaussée (investissements plus durables dans le temps). Il apparaît donc nécessaire d'approfondir les études menées sur les matériaux de chaussées, en particulier les bitumes et les enrobés bitumineux. Une meilleure connaissance des propriétés thermo-mécaniques des matériaux bitumineux utilisés en construction routière permettra à terme de formuler des enrobés suffisamment performants pour résister de manière pérenne aux contraintes appliquées.

Dans ce contexte, s'est imposée la nécessité d'établir de nouvelles méthodes d'essais et des procédures plus rationnelles pour le choix des matériaux et des formules d'enrobés bitumineux. L'objectif de ce travail consiste en une réponse à la question quant à l'ajout de la fibre de verre au bitume classique et si elle améliore les caractéristiques mécaniques du matériau « bitume + fibre de verre » ?

CHAPITRE I
généralité sur les produits noirs
CHAPITRE I
généralité sur les produits noirs

I. les produits noirs

Introduction

Il s'agit effectivement de produits noirs (ou brun foncé), riches en carbone et en hydrogène naturels ou obtenus en général par distillation de matières organiques. Ces matériaux sont connus depuis l'Antiquité, surtout comme liants (les briques de la tour Babel étaient hourdées au bitume), constituent des matières de base pour réaliser divers produits commerciaux intéressant de plus en plus la construction, particulièrement dans le domaine de l'étanchéité et celui de la technique routière.

Les hydrocarbures font leur apparition dans la voirie au début du XIX^{ème} siècle en Grande-Bretagne, où d'importants stocks de goudron s'accumulent. Provenant de la distillation de la houille, ce matériau va donner naissance à un revêtement de sol inédit : le *macadam* (du nom de son concepteur, Mac Adam).

Ce sera la première innovation en matière de revêtement depuis la route pavée ou empierrée, datant de l'époque romaine. Cependant, l'emploi du macadam ne va se généraliser qu'un siècle plus tard avec l'avènement de l'automobile.

Aujourd'hui et pour des raisons sanitaires, le goudron n'est plus utilisé. La conception du revêtement autoroutier recoure désormais au bitume artificiel.

Il n'entre dans la composition de l'enrobé proprement dit qu'à hauteur de 6% en tant que liant.

On distingue deux grandes classes des hydrocarbures :

a/ les produits naturels: bitumes et asphaltes qui ont subi ou non après extraction certains traitements : raffinage, broyage, etc.,

b/ les produits pyrogènes: les brais et goudrons divers essentiellement ceux qui proviennent de la distillation de la houille et du pétrole.

I.1 Propriétés générales des liants hydrocarbonés

Ces produits sont, en général, trop visqueux dans leur état naturel, pour pouvoir être employés directement. Il faut diminuer cette viscosité ou les liquéfier par différents procédés (chauffage, dissolution dans des solvants volatils, émulsions dans l'eau), pour pouvoir les utiliser à la place qui leur est destinée. Il est indispensable que ces traitements n'altèrent pas leurs caractéristiques [2] essentielles indiquées ci-dessous:

a/ cohésivité: c'est la propriété de se déformer sans arrachement ni fissuration interne en donnant des films étanches et plastiques ;

b/ adhésivité: c'est la propriété de coller aux granulats minéraux ;

c/ viscosité: elle est définie comme la résistance opposée au sein d'une masse liquide à une déformation telle que la vitesse de déplacement de différents points soit variable:

Soit:

$$\eta = \frac{R}{S} \times \frac{1}{\frac{\delta V}{\delta z}} \quad (\text{I.01})$$

η : Viscosité;

R: résistance totale;

S: section de cisaillement;

$\frac{\delta V}{\delta Z}$: gradient de vitesse.

la viscosité diminue considérablement avec la température ;

d/ susceptibilité: la susceptibilité est définie, en particulier, comme la variation de la viscosité avec la température: $s = \frac{d\eta}{dt}$; (I.02)

e/ vieillissement: c'est pour le liant, la perte de certaines qualités dans le temps et notamment la perte de cohésivité ;

D'une manière générale, le liant laisse échapper très lentement des huiles et devient de plus en plus dur. L'allongement plastique qui précède la rupture diminue progressivement ;

f/ ductilité: c'est la caractéristique du liant qui lui permet de s'allonger en un fil très mince, mais sans se rompre. Cette qualité est évidemment une conséquence de la cohésivité.

De ces caractéristiques dépend l'emploi du liant ainsi que la méthodologie pour sa mise en oeuvre.

I.2 Les goudrons et brais de houille

Ils proviennent de la distillation, en vase clos et en atmosphère neutre (non oxydante), de diverses variétés de charbons et notamment de charbons gras. On obtient ainsi un sous-produit très important, le goudron brut de houille.

Ce dernier soumis à la distillation pour en retirer des huiles donne un résidu résineux que l'on appelle le "brai de houille".

Ce brai de houille, plus ou moins plastifié par les huiles qui s'y trouvent, ou qu'on y ajoute, peut servir soit à la fabrication de bétons goudronneux (brai mou), soit à la fabrication de goudrons reconstitués, appelés simplement goudrons, qui sont utilisés en technique routière pour le répandage superficiel et les imprégnations.

Les goudrons et les brais de houille sont obtenus par distillation du goudron brut à une température généralement supérieure à 1000°C ($\approx 1100^\circ\text{C}$).

I.3 Bitume

a/ Origine et application des bitumes

Les bitumes peuvent être d'origine : naturel : (Iles des Bermudes et de la Trinité); sont souvent mélangés de fillers fortement imprégnés (bitume de Trinidad : 44% de filler et 56% de bitume très pur), artificiel produit de distillation de pétrole brut de nature

Le bitume [3] est un produit qui adhère à la majorité des matériaux usuels : pierre, béton, bois, ciment, métal, verre, etc. C'est un excellent isolant thermique, diélectrique et phonique et c'est un liant car c'est propriétés particulière telles que étanchéité, cohésivité, élasticité, durabilité lui confère de l'utiliser dans des applications très variées outre la construction et l'entretien du réseau routier comme:

- construction de barrages, réservoirs, matériaux de couverture ;
- confinement de déchets;
- sols industriels, aires de stockage ;
- isolation, insonorisation, collage, protection (automobile, électroménager, moquette).

Le bitume se présente sous une forme visqueuse, en fait plus ou moins viscoélastique de couleur noire.

b/ fabrication des bitumes

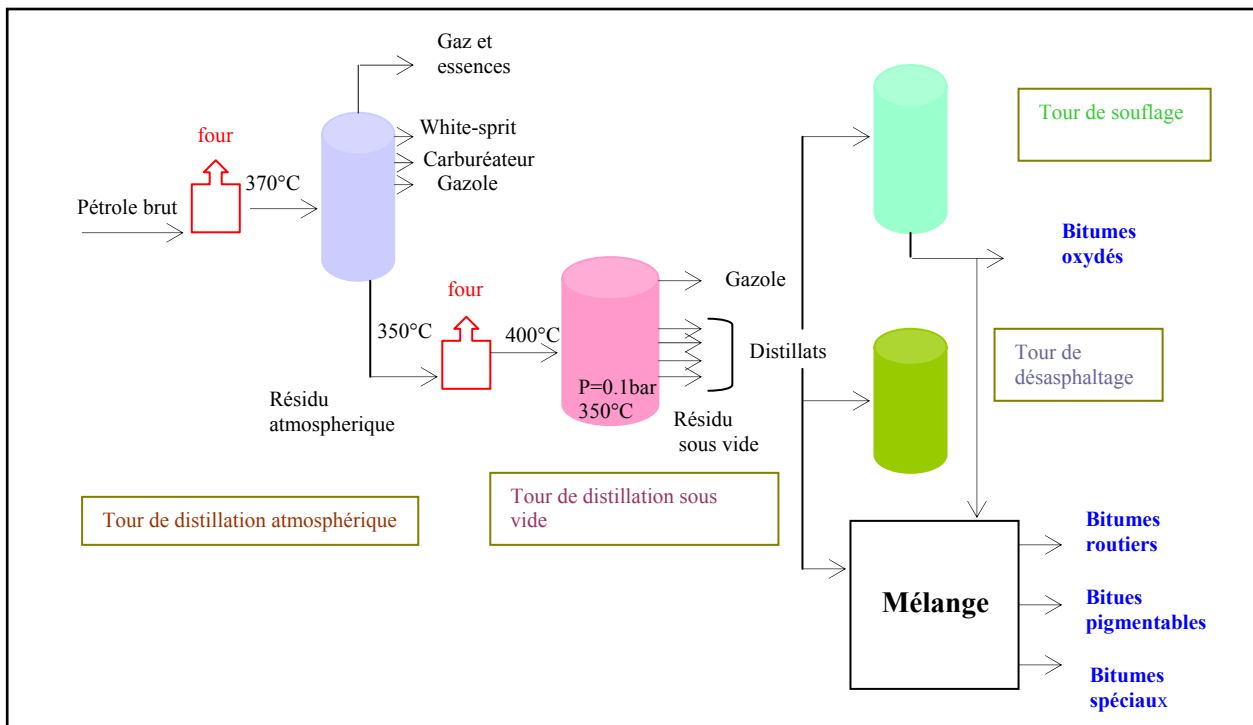


Fig1.1: Principe de fabrication des bitumes

c/ Composition chimique des bitumes et structure des bitumes

En général, le bitume est constitué de 80 à 85% de carbone et de 10 à 15% . Il est formé de deux parties :

- les **asphaltènes**:sont composés essentiellement d'hydrogène et de carbone et se présentent sous la forme d'un "solide" friable brun à noir. Généralement les bitumes comportent 10 à 20% en poids d'asphaltène.
- les **maltènes**: ils sont constitués principalement d'huiles saturées, d'huiles aromatiques et de résines.

Le bitume se présente comme un système colloïdal. Mais s'il y a suffisamment de molécules aromatiques dans la partie maltènes, les asphaltènes peuvent alors être floculés. Ce système peut être considéré comme un "gel" qui confère au bitume ses propriétés élastiques.

C'est en particulier le cas des bitumes dits "soufflés" ou "oxydés", dans ce cas les asphaltènes ne s'interagissent pas et on a une structure "sol" (visqueuse). Classe intermédiaire appelée "sol-gel" correspond aux bitumes intermédiaire.

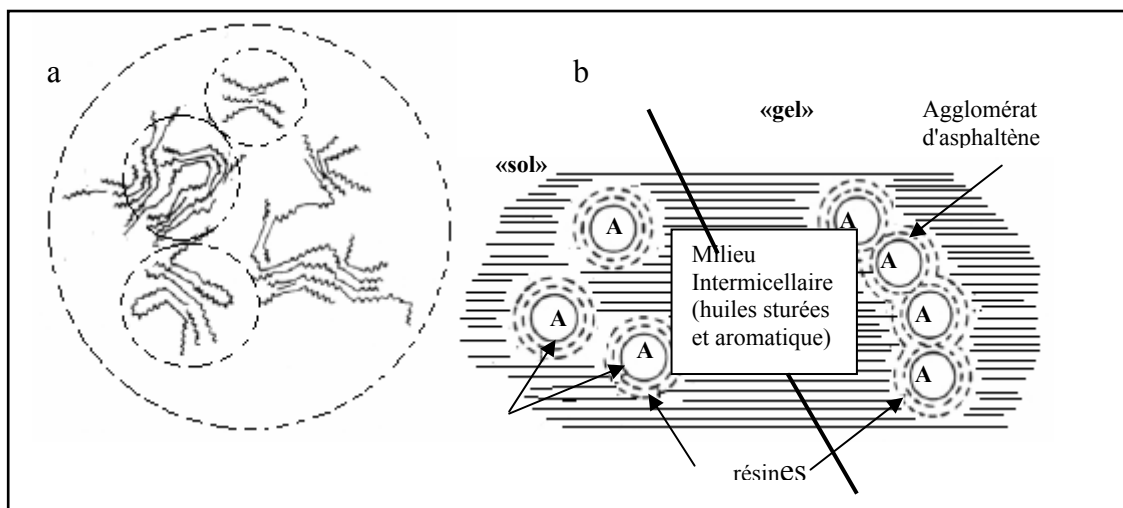


Figure I.2 .a)Macrostructure des asphaltènes [4], b)Schématisation de la structure colloïdale du bitume [5]

Le bitume sorti tel qu'il est des unités de raffinage est trop mou pour être utilisé pour les revêtements routiers. Aussi pour le rendre plus dur, on procède à son soufflage. Le procédé est ni plus ni moins une déshydrogénation partielle et une polymérisation du bitume avec l'oxygène de l'air.

En effet, en faisant passer l'air à travers le bitume sous haute température (240 à 260°C), il y a déshydrogénation partielle et l'oxygène contenu dans l'air soufflé forme des ponts oxygène avec les chaînes hydrocarbonées et il se forme des réseaux tridimensionnels par polymérisation. La réaction est plus ou moins exothermique et la température dans la tour de soufflage ne dépasse jamais 300°C sous peine d'apparition du phénomène de "craquage". La dureté du bitume obtenue peut être contrôlée par le temps de passage de l'air, car plus il y a de ponts oxygène plus dur est le bitume.

C'est ainsi qu'on obtient des bitumes plus ou moins durs selon les besoins du marché. La dureté du bitume est définie par leur pénétrabilité minimale et maximale. Plus les valeurs de pénétrabilité sont petites, plus dur est le bitume. Les spécifications officielles prévoient cinq qualités :

- 20/30 la plus dure,
- 40/50,

- 60/70,
- 80/100,
- 180/220

Ces bitumes sont surtout utilisés dans la construction et l'entretien des chaussées, dans les travaux hydrauliques, et dans l'industrie (papeterie, étanchéité).

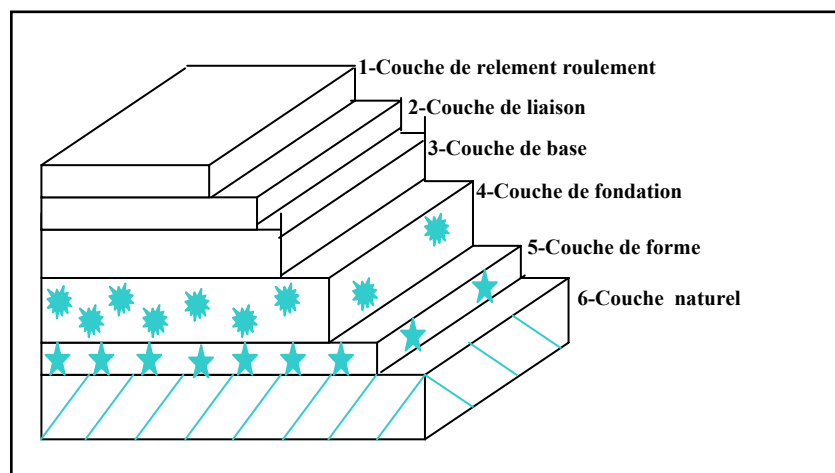
I.4 généralités sur les enrobés

a/ Définition de l'enrobé

L'enrobé [1] est constitué de plusieurs types de graves (cailloux, gravillons et sable) liées par le bitume. Il constitue la couche supérieure d'une superposition d'autres couches (assise, fondation, etc.) sur laquelle circulent les véhicules.

Les différentes couches sont dans le détail:

- . La couche de roulement
- . La couche de liaison
- . La couche de base
- . La couche de fondation
- . La couche de forme
- . Le sol.



FigI.3 : structure de chaussée (les couches 1,2 et3 contiennent du bitume)

L'épaisseur des différentes couches (hors sol) peuvent atteindre 40 à 50 centimètres ; on comprend mieux le prix d'un kilomètre d'autoroute.

b/ Teneur en liant

Le liant bitumineux transmet naturellement son comportement viscoélastique à l'enrobé. Il faut donc définir une teneur en liant optimale afin d'assurer la cohésion du mélange et le bon enrobage de tous les grains du mélange par un film mince de bitume, et ce, tout en évitant des problèmes de fluage et d'orniérage trop prononcés à haute température (dans le cas d'une trop forte teneur en bitume).

Pour déterminer cette teneur en liant optimale, on introduit la notion de surface spécifique des granulats, notée (Σ) et exprimée en m^2/kg , c'est-à-dire la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères.

Pour un mélange granulométrique donné, la formule suivante permet d'avoir une approximation de la surface spécifique (Σ) [1] :

$$100 \Sigma = 0.17G + 0.33g + 2.3S + 2.3s + 135f \quad (I.03)$$

Avec

G: pourcentage de gros gravillons ($\phi > 11$)

g: pourcentage de petits gravillons ($\phi > 6/11$)

S: pourcentage de gros sable ($\phi > 0.3/6$)

s: pourcentage de sable fin ($\phi > 0.08/0.3$)

f: pourcentage de filler ($\phi < 0.08$)

On voit que le pourcentage de filler est prépondérant en ce qui concerne la surface spécifique et donc la teneur en liant. Dans certains cas, on utilise la formule simplifiée suivante :

$$\Sigma = 2.5 + 1.3f \quad (I.04)$$

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

$$P = \alpha k \sqrt[3]{\Sigma} \quad (I.05)$$

Avec

P: teneur en liant(%)

α : facteur dépendant du type de granulats(2.65/masse volumique des granulats)

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

K: module de richesse(K variant de 2.75 pour les enrobés donnant le maximum de résistance à la déformation, à 3.5 pour les enrobés est plus souples)

Plus globalement, la teneur en liant à retenir peut être définie à partir d'une étude en laboratoire tenant compte du trafic, de l'épaisseur de la couche d'enrobé, des compacités sur place exigées et de l'usage envisagé de la chaussée. En particulier, dans le cas d'un trafic Poids Lourds important –supérieur à 200 poids lourd/jour la teneur en bitume doit diminuer.

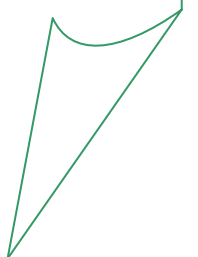
Malléable, l'enrobé est un matériau qui s'adapte facilement à la géologie du terrain et aux conditions climatiques. Le revers de la médaille est une forte sensibilité à la chaleur et au froid, accélérant le rythme des dégradations sous l'effet du roulement et du stationnement.

Avec le temps, des ornières se forment en surface. Il convient alors de refaire entièrement la chaussée (tout les dix ans environ, au rythme maximum de 7 km par jour) ou de la réhabiliter suivant la technique de thermorégénération.

CHAPITRE II

Influence des actions appliqués à la chaussée

Influence des actions appliqués à la chaussée



II Influence des actions appliquées à la chaussée

II.1 Effet du trafic

Chaque couche de chaussée subit des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic (Figure II.1). Le calcul des efforts et des déformations qui s'effectue traditionnellement en considérant des multicouches élastiques linéaires isotropes, nécessite, en premier lieu, la connaissance du module de Young et éventuellement du coefficient de Poisson (pour résoudre un problème considéré comme élastique) [6].

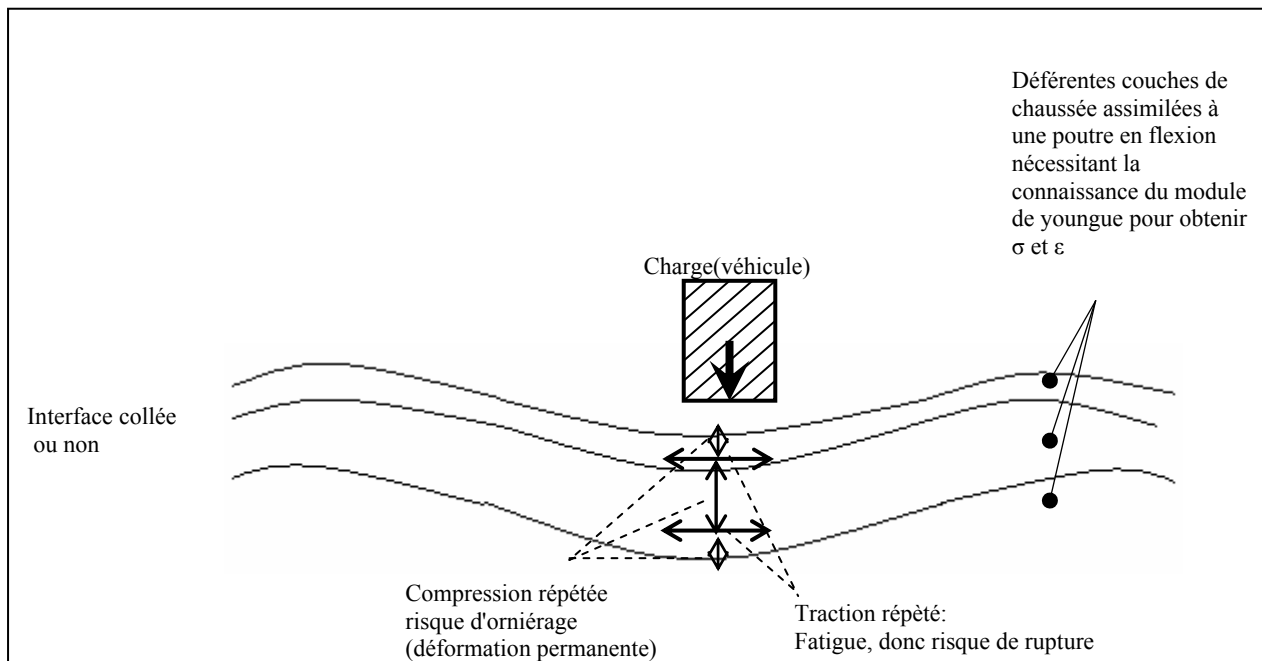


Figure II.1 .Schématisation des sollicitations induites par le trafic [7].

Les tractions répétées à la base des couches, sous l'effet du passage des véhicules, créent des micro-dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau (phénomène de fatigue).

Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû au tassement des couches de béton bitumineux mais peut aussi être dû éventuellement aux déformations de couches inférieures non traitées.

Nous pouvons également souligner qu'en raison des propriétés particulières apportées par le liant bitumineux, les enrobés possèdent un comportement (donc un module) fortement dépendant de la température et de la vitesse de chargement.

II.2 Effet de la température

A basse température le bitume possède un comportement fragile (donc fissuration de la chaussée). Cependant, la fissuration thermique peut être facilement évitée à basse température si l'on utilise un bitume de grade élevé, c'est-à-dire un bitume moins "dur", et donc moins "cassant" à basse température.

Néanmoins, un bitume de grade trop élevé se révèle néfaste vis-à-vis des problèmes d'orniérage (déformations permanentes de la chaussée) à température élevée. Le bitume idéal doit donc être à la fois le moins susceptible possible aux phénomènes de fissuration thermique (à basse température) et d'orniérage (à température élevée).

Plus simplement, on doit donc exiger des enrobés de qualités principales en rapport direct avec la dépendance du liant utilisé vis-à-vis de la température :

- la stabilité : la résistance à la déformation permanente qui est aggravée à haute température,
- la flexibilité: soit l'aptitude à supporter sans fissures thermiques les basses températures.

Ces conditions ont notamment amené les différents groupes pétroliers à développer de nouveaux bitumes pour couvrir ce large intervalle de température (-30°C à 60°C) : les bitumes modifiés aux polymères (*dans notre cas on s'intéresse aux fibres de verres qui ont un comportement purement élastique*).

a/principaux effets mécaniques de la température

- changement du module du matériau* : Un béton bitumineux que l'on chauffe devient plus "mou". Plus généralement, ces matériaux sont dits "thermo-sensibles", c'est-à-dire que leur comportement viscoplastique change selon la température considérée,
- création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations ou contractions thermiques lors des changements de température (Figure II.2).

Le premier effet est, en général, caractérisé par la dépendance du module de rigidité vis-à-vis de la température et de la vitesse de chargement.

Le deuxième effet est particulièrement néfaste :

- lors d'un refroidissement, par exemple, la chaussée a tendance à se contracter. Or, les mouvements de contraction sont empêchés dans le sens longitudinal de la chaussée. Cela revient donc à exercer une traction sur cette chaussée dans le sens longitudinal, d'où l'amorçage éventuel de fissures transversales. Ces dernières sont ensuite susceptibles de se propager à travers la structure lors de cycles thermiques (journaliers ou autres).

- lorsqu'une couche de base traitée aux liants hydrauliques existe dans la chaussée (structures semi-rigides). En effet, cette couche traitée aux liants hydrauliques est sujette au retrait thermique et de prise. Le retrait, empêché par le frottement à l'interface, peut provoquer une fissure dans la couche en béton bitumineux. Cette fissure évolue avec les cycles thermiques et peut progressivement traverser la couche.

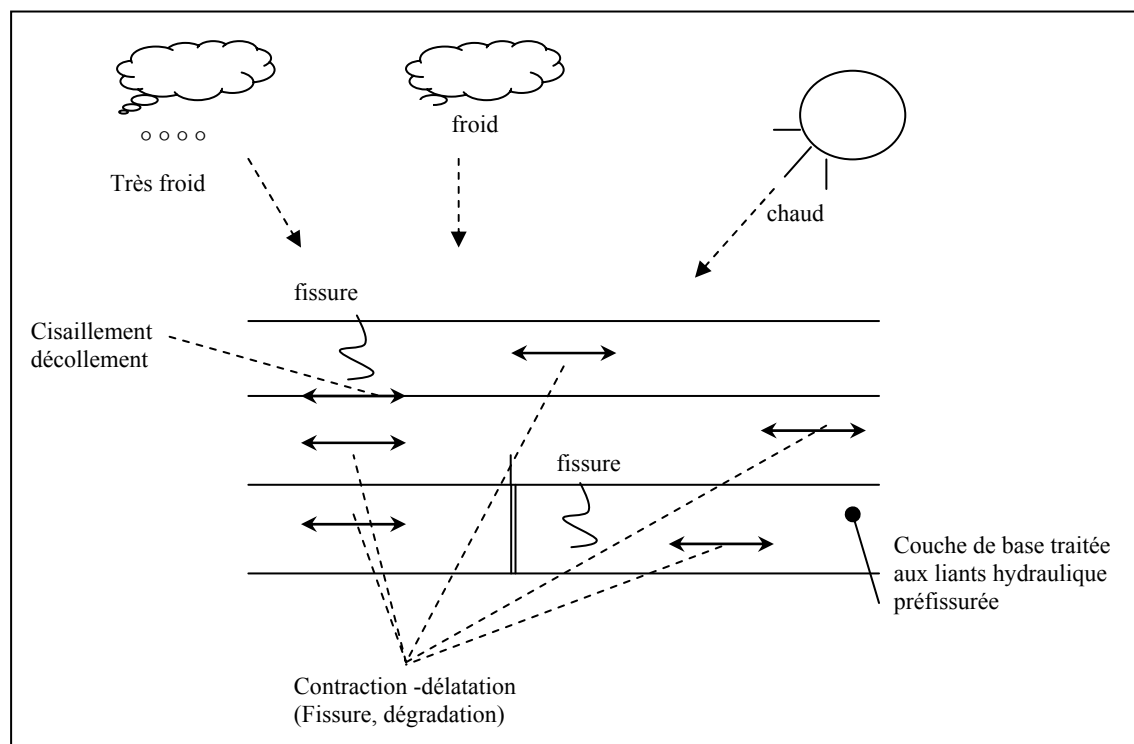
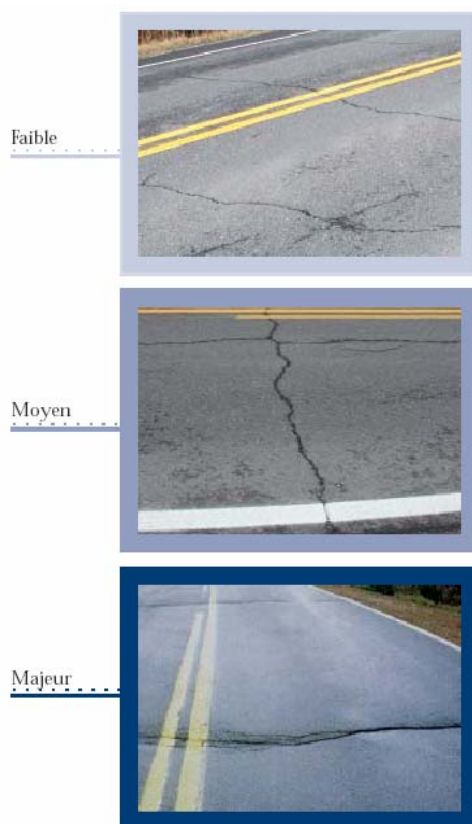


Figure II.2. Schématisation des sollicitations induites par la température [7].

II.3 dégradations: dans ce qui suit (fig II.3) on cite quelques types de dégradations [11].



II.3.a Fissures transversales

➤ **Description**

Rupture du revêtement relativement perpendiculaire à la direction de la route, généralement sur toute la largeur de la chaussée.

➤ **Causes probables**

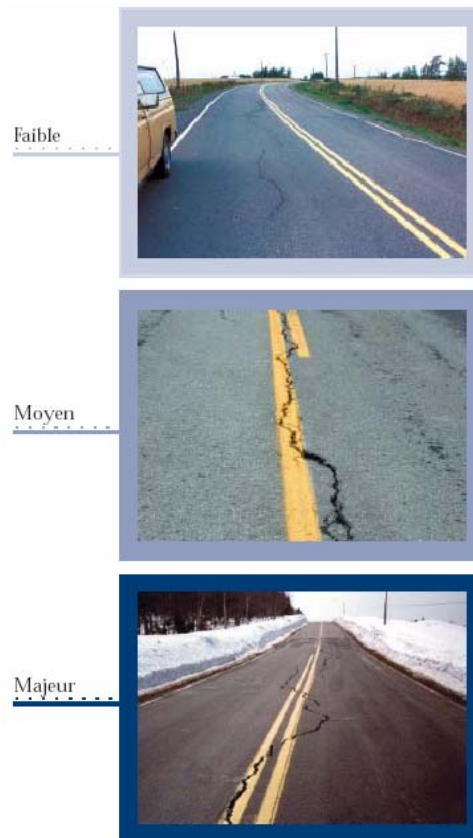
- Retrait thermique.
- Vieillissement et fragilisation du bitume.
- Remontée de fissures après des travaux de resurfaçage.
- Joint de construction mal exécuté (arrêt et reprise des travaux de pose d'enrobé).
- Diminution de la section du revêtement (ex. : vis-à-vis des regards ou des puisards).

➤ **Niveau de sévérité**

Faible : Fissures simples et intermittentes dont les ouvertures sont inférieures à 5 mm. Les bords sont en général francs et bien définis. Les fissures avec scellement en place en bonne condition sont incluses dans ce niveau de sévérité ou elles peuvent aussi être comptabilisées à part selon l'usage qui sera fait de l'information.

Moyen : Fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de 5 à 20 mm. Les bords sont parfois érodés et un peu affaissés. Sans être inconfortable, la fissure est perceptible par l'utilisateur.

Majeur : Fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de plus de 20 mm. Les bords sont souvent érodés et il y a affaissement ou soulèvement au gel au voisinage de la fissure. Le confort au roulement est diminué par les déformations de surface.



II.3.b Fissures de gel :

➤ Description

Rupture du revêtement générant une fissure active sous l'effet du gel, soit rectiligne et localisée au centre de la voie ou de la chaussée, soit d'apparence lézardée sans localisation précise sur la chaussée.

➤ Causes probables

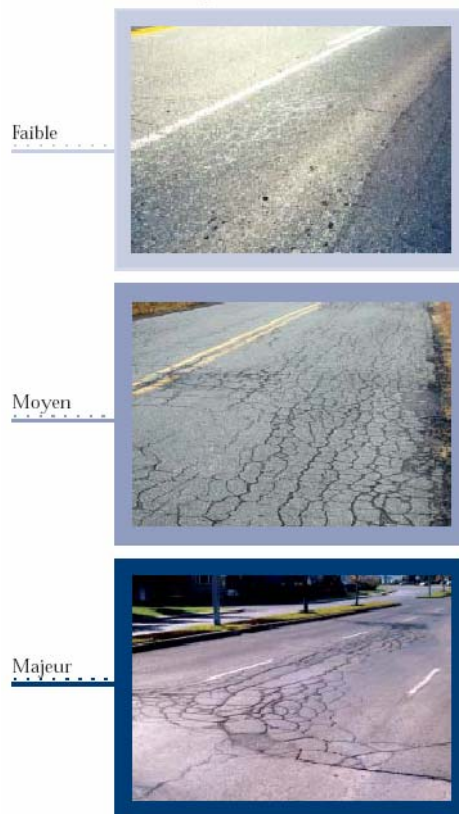
- Infrastructure gélive et soulèvements différentiels.
- Comportement gélif différentiel (ex. : transition aux coupes de roc).
- Remblai instable.
- Drainage inadéquat.

➤ Niveau de sévérité

Faible : Fissures simples et intermittentes dont les ouvertures sont inférieures à 10mm. Les bords sont en général francs et bien définis. Les fissures avec scellement en place en bonne condition sont incluses dans ce niveau de sévérité ou elles peuvent aussi être comptabilisées à part selon l'usage qui sera fait de l'information.

Moyen : Fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de 10 à 25 mm. Les bords sont parfois érodés et un peu affaissés. Sans être inconfortable, la fissure est perceptible par l'utilisateur.

Majeur : Fissures généralement simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de plus de 25 mm. Les bords sont souvent érodés et il y a affaissement ou soulèvement au gel au voisinage de la fissure. Le confort au roulement est diminué par les déformations de surface.



II.3.c Fissures en carrelage

➤ Description

Rupture du revêtement sur des superficies plus ou moins étendues, formant un patron de fissuration à petites mailles polygonales dont la dimension moyenne est de l'ordre de 300 mm ou moins.

➤ Causes probables

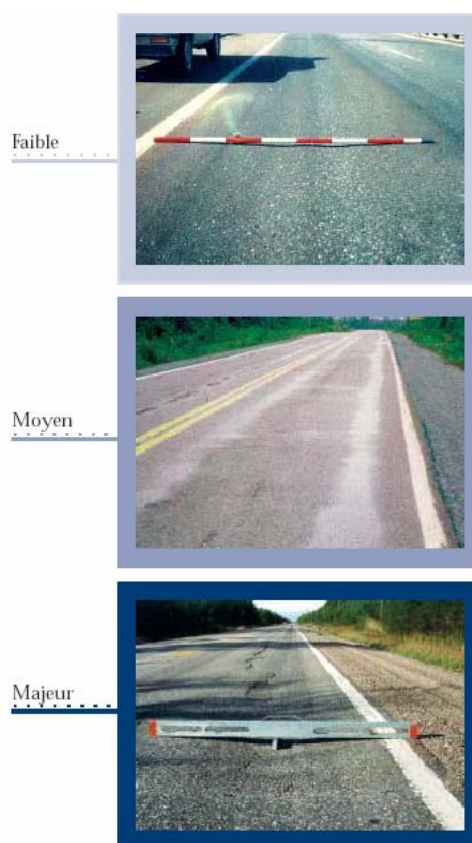
- Fatigue (ex. : épaisseur de revêtement insuffisante).
- Vieillissement de la chaussée (oxydation et fragilisation du bitume dans l'enrobé).
- Capacité portante insuffisante.

➤ Niveau de sévérité

Faible : Maillage composé de fissures simples aux bords francs.

Moyen : Maillage composé de fissures simples aux bords faiblement détériorés.

Majeur : Maillage composé de fissures simples aux bords détériorés.



II.3.d Déformation de la surface (Ornière à grand rayon)

➤ Description

Dépression longitudinale simple située dans les pistes de roues (bandes 2 et 4). La forme transversale de la dépression correspond à celle d'une courbe parabolique très évasée.

➤ Causes probables

- Vieillissement (accumulation des déformations permanentes).
- Compactage insuffisant dans les couches de granulaire à la construction.
- Capacité structurale insuffisante de la chaussée.
- Mauvais drainage des matériaux granulaires de la chaussée (ex. : période de dégel).
- Usure (milieu urbain ou secteur avec circulation peu canalisée).

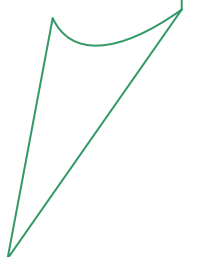
➤ Niveau de sévérité

Faible : Profondeur de l'ornière inférieure à 10 mm.

Moyen : Profondeur de l'ornière de 10 à 20 mm.

Majeur : Profondeur de l'ornière supérieure à 20 mm.

CHAPITRE III
propriétés rhéologiques des liants bitumineux
CHAPITRE III
propriétés rhéologiques des liants bitumineux



III Propriétés rhéologiques des liants bitumineux

III.1 Classes de comportement des bitumes purs en fonction de déformation $|\varepsilon|$ et de la température T

La Figure III.1 permet d'identifier simplement les principaux types de comportement des bitumes en fonction de l'amplitude de la déformation ($|\varepsilon|$) et de la température (T), pour une vitesse de déformation fixée. On y distingue :

- les domaines fragile et ductile, où la résistance à la traction (σ_p) peut être mesurée ;
- la rupture fragile, qui peut être caractérisée par la ténacité (K_c) ou l'énergie de rupture G_c (mécanique linéaire de la rupture) ;
- le comportement élastique linéaire, caractérisé par les modules (E) et (G) ;
- le domaine viscoélastique linéaire, caractérisé par les modules complexes E^* et G^* ;
- le comportement purement visqueux (Newtonien), caractérisé par la viscosité η ;
- pour des déformations de l'ordre de quelques pour cent, le domaine où le comportement est fortement non linéaire.

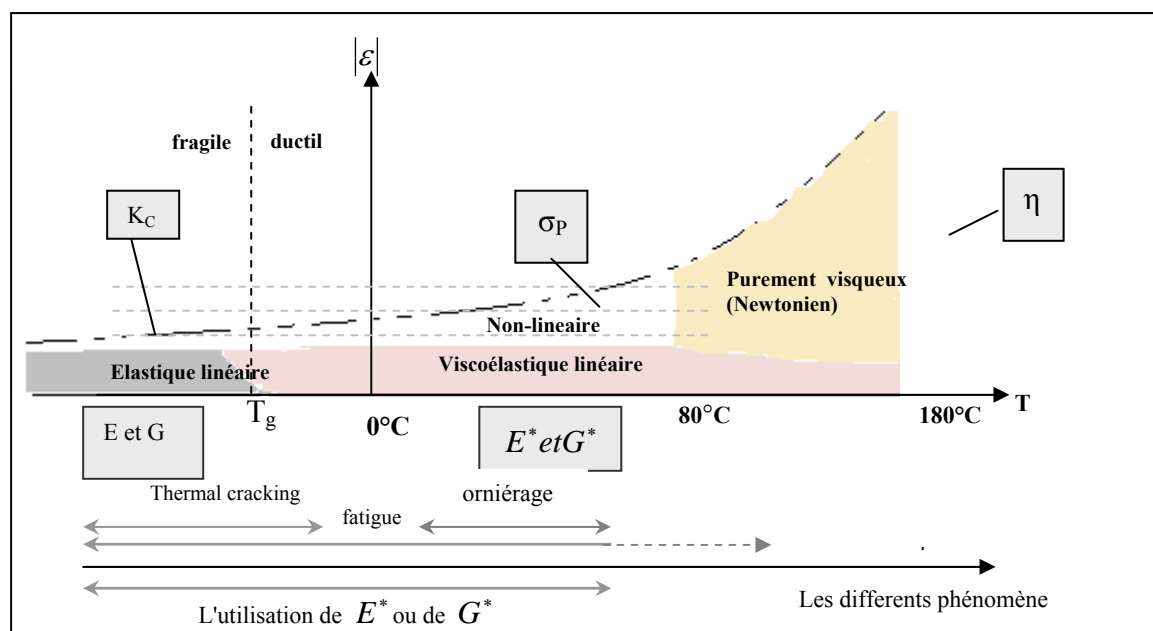


Figure III.1 Classes de comportement des bitumes en fonction de $|\varepsilon|$ et T [9] [10].

III.2 Les caractéristiques classiques

III.2.1 Pénétrabilité (NF T 66-004)

C'est la mesure de la pénétration (exprimée en dixièmes de millimètres) dans un échantillon de bitume, au bout d'un temps de 5 secondes, d'une aiguille dont le poids avec son support est de 100g, et à 25°C. Dans ces conditions, plus un bitume est dur, plus sa pénétration est faible.

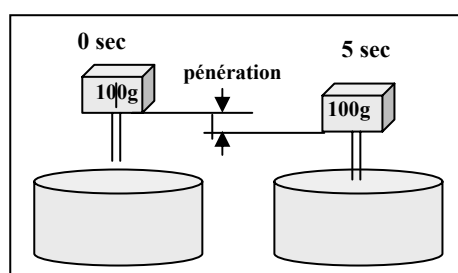


Figure III.2 Essai de pénétrabilité pour le bitume

III.2.2 Point de ramollissement Bille Anneau (NF T 66-008)

C'est la température à laquelle s'enfonce une bille à travers un anneau de bitume dans des conditions définies de fabrication et d'essai. Par voie de conséquence, il s'agit de la température à laquelle le bitume étudié atteint un certain degré de ramollissement.

Les résultats des deux essais empiriques précédents (Pénétrabilité à 25°C et Température Bille Anneau) permettent d'identifier le liant examiné et de le classer par rapport aux spécifications actuellement admises.

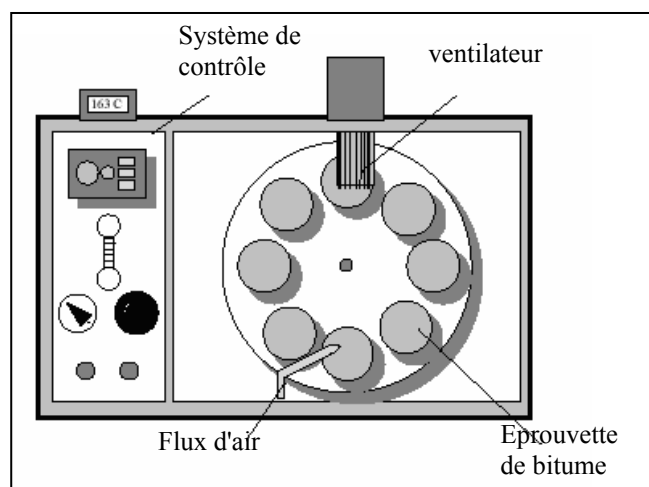
III.2.3 Température de fragilité Fraas(NF t 66-006)

Correspond à une température à laquelle un film mince d'un bitume rompt sous l'effet d'une flexion; cet essai empirique donne une indication sur les propriétés à froid d'un bitume.

III.2.4 Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" (NF T 66-032)

A l'enrobage, les granulats chauffés aux environs de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui se répartit en film mince autour du granulat, favorisant ainsi un vieillissement du liant. L'oxydation chimique est violente car l'apport énergétique est intense (température et oxygène de l'air). L'essai RTFOT est employé pour permettre de caractériser ce type de vieillissement des bitumes.

Dans des conditions bien précises d'essai RTFOT, le bitume placé en film mince, est régulièrement exposé à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé. On mesure ensuite les propriétés habituelles sur le liant vieilli: pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs dites après RTFOT, sont alors comparées aux valeurs initiales. Elles sont plus proches de celles du liant extrait de l'enrober, que de celles obtenues sur le bitume d'origine.



FigIII. 3 Essai RTFOT

III.2.5 L'essai PAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO PP1)

Cet essai est employé pour permettre de caractériser le vieillissement des bitumes in situ . (après 3 à 5 années de service).

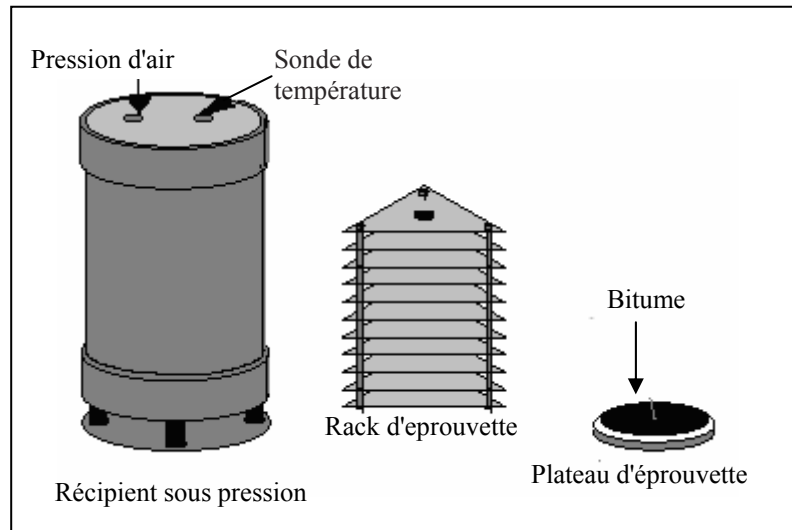


Figure III.4 Essai PAV

III.3 Caractérisation des propriétés rhéologiques du liant dans le domaine linéaire (vel)

IV.3.1 Définition d'un corps viscoélastique

Un corps monodimensionnel et non vieillissant est dit viscoélastique (par opposition à viscoplastique) si l'effacement est total lors d'une expérience d'effacement ($\sigma_\infty \rightarrow 0$). L'expérience représentée dans la Figure III.5 consiste à appliquer un créneau de déformation au matériau.

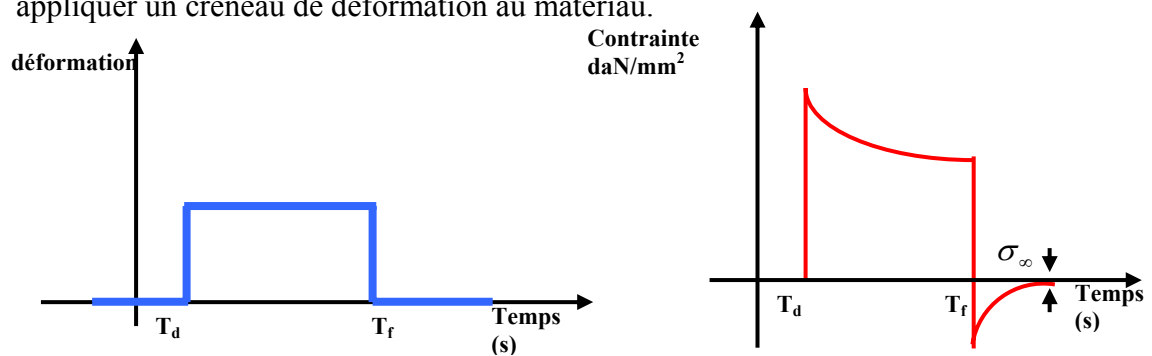
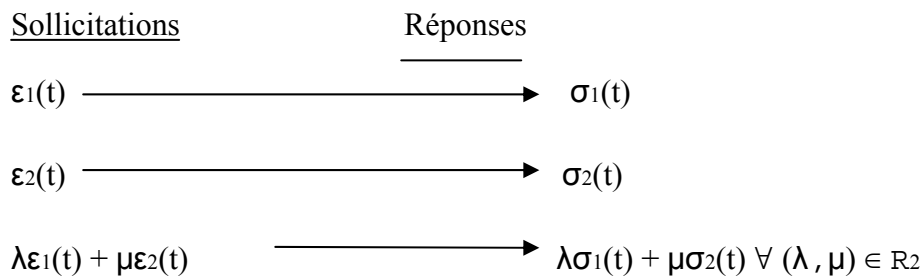


Figure III.5 Expérience d'effacement (à gauche) et réponse du matériau en contrainte (à droite).

III.3.2 Définition d'un corps viscoélastique linéaire

De plus, un matériau viscoélastique possède un comportement linéaire s'il suit le principe de superposition de Boltzmann, c'est-à-dire si sa réponse à une sollicitation composée d'un certain nombre de sollicitations élémentaires est la somme des réponses à chacune de ces sollicitations [14].



III.3.3 Fonction de retard (ou de fluage) et fonction de relaxation

III.4-3-3-a Fonction de retard (ou de fluage)

Le phénomène de fluage correspond à l'accroissement différé dans le temps des déformations.

On détermine la fonction de fluage, à température constante, sur une éprouvette d'un matériau viscoélastique linéaire en imposant à partir d'un instant t_0 une contrainte σ_0 constante.

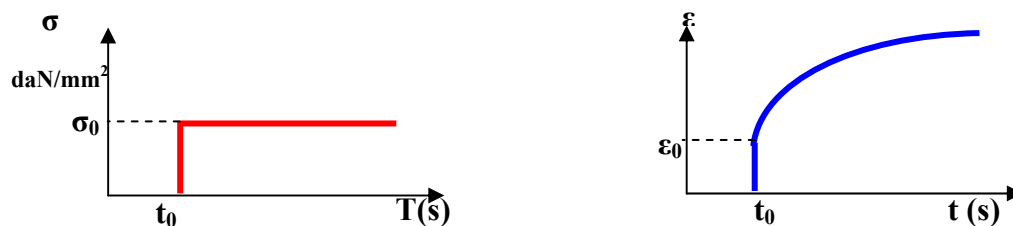


Figure III.6 Essai de fluage - comportement à contrainte constante.

La contrainte échelon imposée est définie par :

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t - t_0) \quad (\text{III.01})$$

avec : $H(t - t_0) = 0$ si $t - t_0 \leq 0$

$$H(t-t_0) = 1 \text{ si } t-t_0 > 0$$

La réponse en déformation est :

$$\varepsilon(t) = \sigma J(t, t) \tag{III.02}$$

avec $J(t_0, t)$ fonction de fluage ou de retard.

Pour une contrainte qui varie dans le temps, à température constante, de la forme suivante :

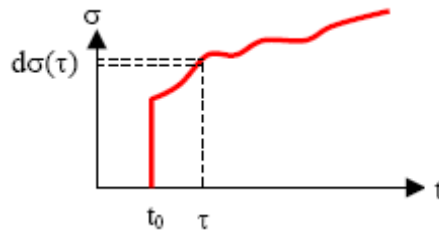


Figure III.07 Sollicitation à contrainte variable dans le temps.

la réponse, à l'instant t , à l'incrément de contrainte $d\sigma(\tau)$ effectué à l'instant τ , vaut :

$$d\varepsilon(t) = d\sigma(\tau) J(\tau, t) \tag{III.03}$$

Puis, pour le matériau viscoélastique considéré, comme le principe de superposition de Boltzmann s'applique, la déformation $\varepsilon(t)$ est la somme des réponses à chacune des sollicitations élémentaires, on peut donc écrire :

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t J(\tau, t) d\sigma(\tau) \quad \text{ou}$$

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0)J(t_0, t) + \int J(\tau, t) \dot{\sigma} d\tau \text{ si } \sigma \text{ dérivable pour } \tau > t_0 \tag{III.04}$$

Pour un matériau non vieillissant (dont les propriétés rhéologiques n'évoluent pas au cours du temps), on a :

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0)J(t-t_0) + \int J(t-\tau) \dot{\sigma}(\tau) d\tau \tag{III.05}$$

En intégrant par parties le second terme de l'expression ci-dessus, on trouve :

$$\varepsilon(t) = \sigma(t)J(0) + \frac{dJ}{d\tau}(\tau - t_0) d\tau \tag{III.06}$$

Le premier terme représente la réponse instantanée, tandis que le deuxième terme représente la réponse différée.

Enfin, pour un solide, la fonction de fluage tend vers une limite finie pour $t \rightarrow +\infty$, tandis que pour un liquide elle croît sans limite [12].

III.3.4 Fonction de relaxation

La relaxation est la diminution des contraintes en fonction du temps d'un matériau soumis à une déformation maintenue constante dans le temps.

A température fixe, à partir de l'instant t_0 , on impose une déformation échelon :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t - t_0) \quad (\text{III.07})$$

avec : $H(t - t_0) = 0$ si $t - t_0 \leq 0$ et

$$H(t - t_0) = 1 \text{ si } t - t_0 > 0$$

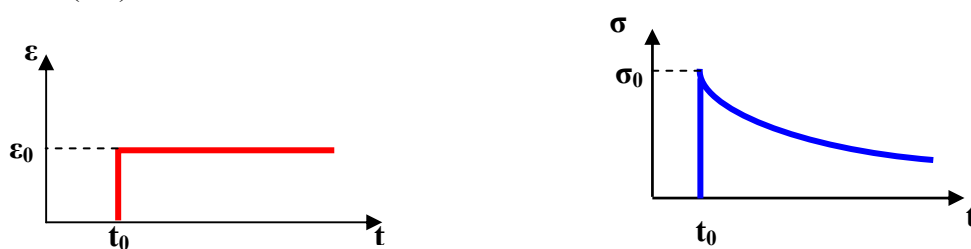


Figure III.8 Essai de relaxation - comportement à déformation constante

La réponse en contrainte est :

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 R(t_0, t) \quad (\text{III.08})$$

avec : $R(t_0, t)$ fonction de relaxation.

En faisant l'hypothèse de matériau non-vieillissant, pour une déformation qui varie dans le temps, à température constante, la contrainte peut s'écrire :

$$\sigma(t) = \varepsilon(t)R(0) + \int_{t_0}^t \varepsilon(\tau) \frac{\partial R}{\partial \tau} (\tau - t_0) d\tau \quad (\text{III.9})$$

Le premier terme représente la réponse instantanée, tandis que le deuxième terme représente la réponse différée.

III.3.5 Calcul opérationnel

Les relations integro-différentielles équation (III.06) & équation (III.09), dont les paramètres dépendent du temps, sont extrêmement difficiles à utiliser en pratique. En vue de simplifier ces équations, l'utilisation de la transformation de Laplace-Carson pour l'étude de la viscoélasticité linéaire a été décrite par Mandel [13]. Par le biais de la transformation de Laplace-Carson, on aboutit, en effet, à des résultats

simples et applicables pratiquement. Ainsi, par la transformation de Carson, définie par :

$$g^*(p) = p \int_0^{+\infty} e^{-pt} g(t) dt \quad (\text{III.10})$$

avec : $g(t)$: valeur au temps t d'une fonction g quelconque,

p : temps dans le domaine transformé de Laplace.

les Equation (III.6) et Equation(III.9) deviennent :

$$\varepsilon^*(p) = J^*(p)\sigma^*(p) \quad (\text{III.11})$$

$$\sigma^*(p) = R^*(p)\varepsilon^*(p) \quad (\text{III.12})$$

où ε^* , σ^* , J^* et R^* sont les transformées de Carson respectives de la déformation, de la contrainte, de la fonction de fluage et de la fonction de relaxation.

On remarque enfin que :

$$J^*(p)R^*(p) = 1 \quad (\text{III.13})$$

III.3.6 Module complexe E^* (mode fréquentiel):

Une des possibilités pour décrire le comportement viscoélastique linéaire est de calculer expérimentalement et de tracer l'évolution du module complexe. Pour ce faire, on utilise un signal de chargement sinusoïdal de fréquence f et de pulsation $\omega=2\pi f$. Physiquement, le module complexe E^* représente en module ($|E^*|$) le rapport des amplitudes de la contrainte sinusoïdale appliquée et de la déformation correspondante (ou réciproquement), et en argument (φ) le déphasage qui existe entre la contrainte et la déformation. E^* n'est autre que la fonction complexe de relaxation R^* prise au point $p=i\omega$. L'Equation (III.13) devient alors :

$$J^*(\omega)R^*(\omega) = 1 \quad (\text{III.14})$$

En écriture complexe, E^* s'écrit :

$$E^* = E_1 + i E_2 \quad \text{ou} \quad E^* = E_0.e^{i\varphi} \quad \text{ou}$$

$$E^* = E_0 (\cos\varphi + i \sin\varphi) \quad (\text{III.15})$$

avec : i est le nombre complexe dont le carré vaut -1 ,

E_1 la partie réelle, parfois appelée le module d'élasticité,

E_2 le module de perte,

E_0 le module de E^* ,

φ l'angle de déphasage entre la contrainte et la déformation.

A partir de l'Equation III.14, en posant $p = i\omega$ et $J^*(i\omega) = J_1(\omega) - i J_2(\omega)$, on obtient en écriture complexe les relations suivantes:

$$J_1(\omega) = \frac{E_1(\omega)}{[E_1(\omega)]^2 + [E_2(\omega)]^2} \quad (\text{III.16})$$

$$J_2(\omega) = \frac{E_2(\omega)}{[E_2(\omega)]^2 + [E_1(\omega)]^2} \quad (\text{III.17})$$

III.3.7 Caractérisation des propriétés à la rupture

III.3.7.1 Essai de traction directe SHRP (AASHTO TP3)

Cet essai permet de mesurer la résistance à la rupture en traction du bitume, à basse température. Le test est valide dans les zones de température où la déformation nécessaire à la rupture se situe dans un intervalle allant de 1 à 10% environ. Dans cet intervalle, les bitumes évoluent rapidement d'une rupture fragile à une rupture ductile.

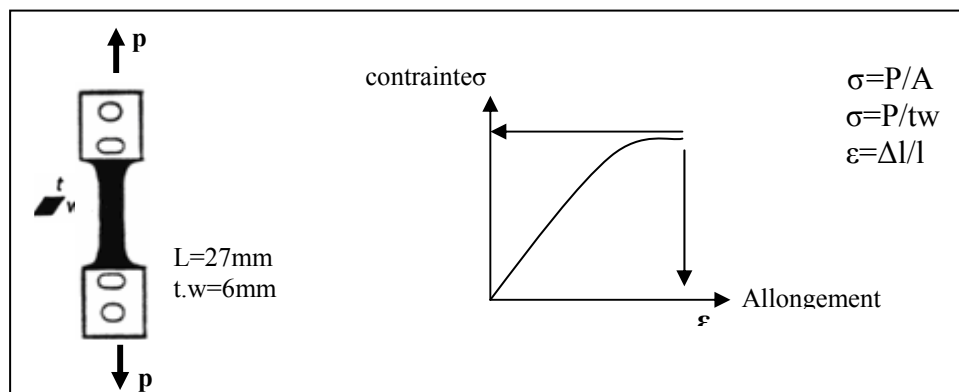


Figure III.09 Essai de traction directe d'après Anderson[1]

III.7.2 l'essai de flexion

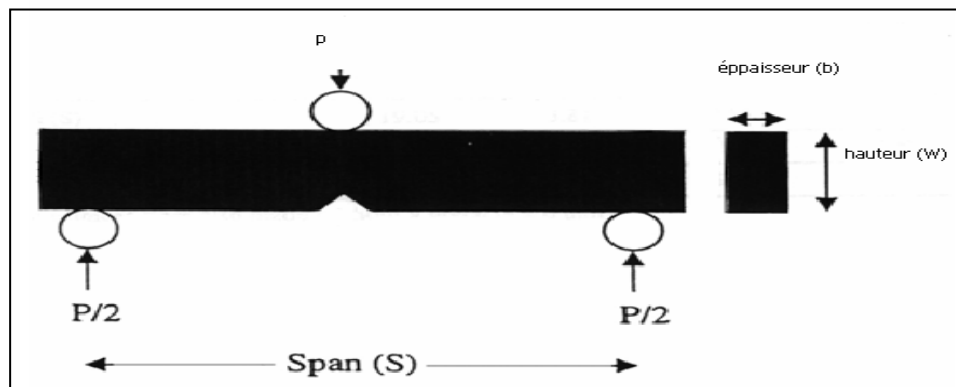


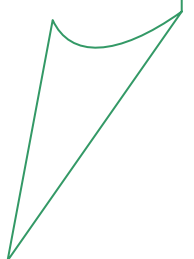
Figure III.10 Schéma de l'essai de flexion 3 points sur éprouvette de bitume préentaillée, d'après Lee et Hesp[1].

La ténacité K_{Ic} ($N.m^{-3/2}$) est déterminée à partir des dimensions de l'éprouvette et de la charge à la rupture P_Q à partir de la formule suivante :

$$K_{Ic} = \frac{P_Q S}{BW^{3/2}} \left(\frac{3 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} \left[1.99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left(2.15 - 3.93 \frac{a}{W} + 2.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right) \right]}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \right) \quad (III.18)$$

où a représente la taille de l'entaille (5 mm), B (12,5 mm) l'épaisseur de l'éprouvette, et W (25 mm) la hauteur de l'éprouvette.

CHAPITRE IV
propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux
CHAPITRE IV
propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux



IV Propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux

IV.1 Généralités

L'analyse des sollicitations et des dégradations observées sur chaussées, sous l'effet conjugué du trafic et de la température, montre qu'il convient principalement de prendre en compte et de caractériser quatre propriétés thermomécaniques pour les mélanges bitumineux :

- le module (rigidité) et sa dépendance vis-à-vis de la température et du mode de chargement ;
- la fatigue ;
- l'évolution des déformations permanentes ;
- la fissuration et la propagation des fissures à basse température.

Les deux premières propriétés permettent de préciser l'effet structurel et son évolution dans le temps. La troisième est liée à la caractérisation de l'orniérage. La dernière qui fait apparaître des couplages thermo-mécaniques, est en général non modélisée malgré son importance pratique. Soulignons encore que la température joue toujours un rôle essentiel dans les études relatives à ces matériaux.

Chacune de ces propriétés correspond à un type de comportement du matériau. Grâce à des considérations sur le matériau, d'une part, et sur la thermo-mécanique des milieux déformables, d'autre part, il est possible de préciser pour quelles gammes de sollicitations les divers comportements sont obtenus.

IV.2 Grandes classes de comportement

Les enrobés bitumineux ont un comportement complexe. La Figure IV.1 permet d'identifier les quatre types de comportement principaux des enrobés bitumineux en considérant l'amplitude de la déformation $|\varepsilon|$ et le nombre de cycles de chargement appliqués N [14] :

- pour un faible nombre de chargements et des déformations de quelques pour cents, le comportement observé est fortement non linéaire ;
- pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles et des déformations "faibles" ($<10^{-4}$) le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire ;
- lors de chargements de plusieurs dizaines de milliers de cycles et des déformations "faibles", les phénomènes d'endommagement apparaissent, le matériau se "fatigue" ;

-en outre, lorsque des cycles déviatoires en contraintes sont appliqués à partir d'une contrainte nulle, des déformations irréversibles non négligeables existent pour des amplitudes de déformation "proches" de la rupture. Leur accumulation crée de l'orniérage. C'est le quatrième type de comportement qu'il convient d'identifier.

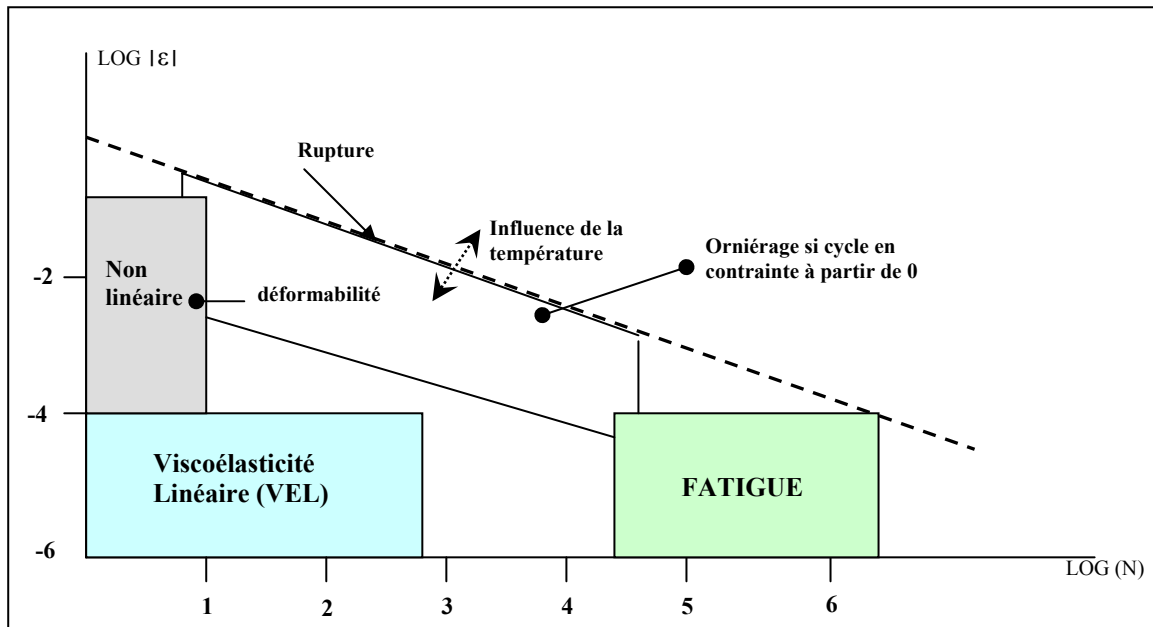


Figure IV. 1 Comportement "type" des bétons bitumineux, (ϵ) déformation – (N) nombre de chargements [14].

La Figure VI.1 permet de fixer un ordre de grandeur des différents domaines de comportement du mélange bitumineux pour une température fixée. Les frontières considérées correspondent bien évidemment à des ordres de grandeur qui peuvent varier sensiblement selon le matériau, la température et la direction du chemin de sollicitation suivi (compression, cisaillement, etc).

Dans ces conditions, les quatre propriétés mécaniques importantes pour les matériaux traités aux liants hydrocarbonés utilisés dans le domaine des terrassements routiers sont :

- la rigidité ou le module (comportement viscoélastique linéaire : VEL) ;
- le comportement en fatigue ;
- le comportement à l'orniérage qui correspond à l'accumulation de déformations permanentes. Cela constitue donc un phénomène lié aux irréversibilités et aux non linéarités déjà existantes dans le domaine des faibles déformations ;
- la fissuration et la propagation de fissure au travers de la structure de chaussée. En particulier, le phénomène de fissuration par apparition de contraintes liées aux variations de

température (dilatation et/ou contraction thermique) est un aspect important qui introduit un couplage thermique/mécanique.

IV.3 Exemples de caractérisation des enrobés à basse température

Les hypothèses de milieu continu et d'isotropie des enrobés bitumineux sont retenues. Au regard de l'hypothèse de milieu continu, bien que sa structure composite grenue confère à l'enrobé utilisé couramment sur chaussées un caractère hétérogène, on peut faire l'hypothèse d'homogénéité macroscopique à l'échelle d'une couche de chaussée. Pour les éprouvettes de laboratoire, on considère généralement qu'un rapport de 10 entre la taille du plus gros granulats et celle de l'éprouvette est suffisante pour considérer celle-ci homogène. Bien que ce rapport ne soit pas toujours obtenu (de l'ordre de 6 pour les éprouvettes testées en retrait thermique empêché), on fait l'hypothèse d'homogénéité.

Concernant l'hypothèse d'isotropie, le mode de mise en oeuvre de l'enrobé sur chaussées (répandage du matériau foisonné par couche et compactage par passages successifs de compacteurs à la surface) confère au matériau une certaine anisotropie (orientation privilégiée des grains par le compactage). De la même façon, les éprouvettes fabriquées en laboratoire présentent ce type de propriété. Pour minimiser ces effets, on réalise souvent les essais sur des éprouvettes prélevées dans une même direction du matériau. Dans les calculs de dimensionnement routier, on fait l'hypothèse d'isotropie du matériau.

IV.3.1 Essai de module complexe sur bétons bitumineux

IV.3.1.a Considérations générales

Dans le domaine viscoélastique linéaire "VEL" (FigureIV.1), on pratique sur enrobés les essais de module complexe avec la même procédure que celle décrite au paragraphe III.3.6. Suite à de nombreuses études sur le module complexe des enrobés bitumineux réalisées entre autres par Di Benedetto et De la Roche, on montre que celui-ci est directement influencé par :

- la formulation du matériau [15],
- la température [15] [16],
- la fréquence de sollicitation [15] [16],
- la fatigue [17],
- le niveau de sollicitation [18] [15].

IV.3.1.b Limite du domaine linéaire

Concernant la dernière propriété énoncée ci-dessus, Charif en 1990 a notamment étudié l'évolution de la norme du module complexe d'un enrobé bitumineux en fonction de l'amplitude de déformation. Rappelons que le comportement viscoélastique des enrobés est linéaire si le principe de Boltzmann est vérifié. Charif en 1990 obtient un comportement linéaire des enrobés pour des déformations inférieures à 10^{-4} m/m.

Quant à Doubbaneh en 1995, il trouve que le domaine linéaire des enrobés est limité à des déformations n'excédant pas quelques 10^{-5} m/m [15]. Plus récemment, Airey et al. En 2002 et 2003 ont vérifié à partir de trois formulations d'enrobés et deux bitumes (un bitume pur 50/70 et un bitume modifié au copolymère tribloc en étoile de styrène et de butadiène) que la limite du comportement linéaire des enrobés correspond à des déformations de l'ordre de 10^{-4} m/m [1].

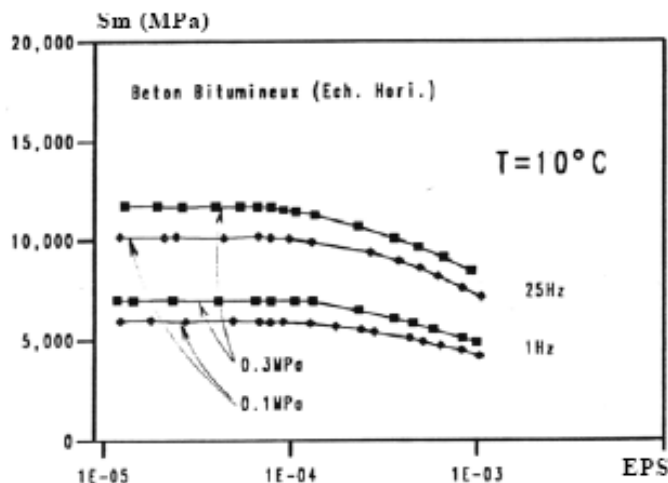


Figure IV. 2 Evolution de la norme du module complexe S_m avec l'amplitude de déformation axiale, d'après Charif [1]

IV.3.1.c Influence de la formulation d'enrobé:

Comme la réalisation des essais de détermination du module complexe des enrobés bitumineux est longue et coûteuse, de nombreux chercheurs se sont intéressés à la possibilité de prédire la valeur de ce module à partir de la composition de l'enrobé bitumineux, cela dans l'optique d'obtenir un ordre de grandeur utilisable dans le dimensionnement des chaussées.

Les relations trouvées sont dérivées de statistiques basées sur la comparaison de résultats d'essais mécaniques sur plusieurs enrobés bitumineux ayant des compositions qui balayent les principaux paramètres de formulation. De plus, parmi les formules empiriques

trouvées dans la littérature, la majorité d'entre elles concerne uniquement la norme du module complexe, l'angle de phase étant rarement étudié. A notre connaissance, peu d'auteurs ont établi des relations entre le module complexe du liant et celui de l'enrobé, valables à la fois pour la norme et pour l'angle de phase du module complexe [19] [20] [21] [22] [23].

Plusieurs types de formules prévisionnelles ont donc été développés pour établir une relation empirique entre le module des enrobés et les propriétés de leur liant, en y introduisant la distribution volumique des différents constituants du mélange. Citons, par exemple, les relations d'Heukelom et Klomp [24],

Relation de Heukelom et Klomp en 1964

$$\left| E_{enrobé}^* \right| = S_b \left[1 + \frac{2 \cdot 5}{n} \cdot \frac{C_v}{1 - C_v} \right]^n \quad (IV.01)$$

$$\text{Avec } n = 0.83 \cdot \log \frac{4 \cdot 10^4}{S_b} \quad \text{et} \quad C_v = \frac{g}{g + b}$$

où S_b (Pa) est le module de rigidité du bitume tiré de l'abaque de Van der Poel qui donne le module de rigidité d'un bitume en fonction de la fréquence, de la température et de l'indice de pénétration (IP) du liant [28]. g et b sont respectivement la fraction volumique des granulats et celle du bitume (%).

Cette formule peut être utilisée pour calculer le module d'une grande variété de formulations, mais elle a été établie avec des teneurs en vides toujours proches de 3 %. Les expériences ont montré qu'elle s'applique médiocrement aux enrobés bitumineux moins compactés, ainsi cette relation a été corrigée pour être appliquée aux enrobés bitumineux moins compactés [29], en utilisant C'_v au lieu de C_v défini comme :

$$C'_v = \frac{C_v}{0.97 + 0.01 * (100 - (100 - (g + b)))} \quad (IV.02)$$

IV.3.2 Essai de traction directe

Il s'agit d'un essai de traction à température constante et à vitesse de déformation constante. Au cours de l'essai, les paramètres mesurés sont la contrainte, la déformation et la température à l'instant t . La contrainte maximale, encore appelée contrainte de rupture, et la déformation correspondante, donnent directement accès à la résistance en traction du matériau testé, pour les conditions d'essais (température, vitesse) considérées.

On observe classiquement que plus la vitesse de déformation imposée est élevée, plus l'enrobé a un comportement rigide (contrainte maximale plus élevée) et l'allongement à la rupture est faible (Figure IV.3).

Il est à noter enfin que l'essai de compression diamétrale (« essai de traction indirecte » ou encore « essai brésilien ») peut également être réalisé en laboratoire afin de déterminer la résistance en traction d'un enrobé bitumineux. Le principal avantage de ce dernier essai réside dans le fait que les éprouvettes peuvent être directement prélevées *in-situ* et qu'elles ne doivent pas être collées sur des casques en métal. Son principal désavantage est qu'il s'agit d'un « essai non-homogène » .

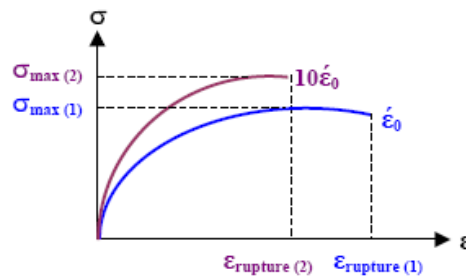


Figure IV.3 Résultats classiques pour l'essai de traction directe sur enrobés

- (1) essai à vitesse de déformation $\dot{\epsilon}_0$
- (2) essai à vitesse de déformation $10\dot{\epsilon}_0$

IV.3.3 Essai de retrait thermique empêché (AASHTO TP10)

IV.3.3.a Principe de l'essai

Lorsqu'un matériau est soumis à une variation de température, il subit des déformations. Si celles-ci sont empêchées, les variations de température créent des contraintes appelées contraintes thermiques. Ce type de couplage thermomécanique est par exemple à l'origine des problèmes de fissuration observés à basse température sur les chaussées.

Les chaussées sont un exemple où les déformations sont restreintes. En moyennes températures, les enrobés sont des corps viscoélastiques. Lorsque la température augmente les contraintes thermiques créées, qui sont des contraintes de compression, se dissipent par la relaxation. En basse température, l'enrobé se comporte comme un corps élastique très rigide.

Lorsque la température baisse, des contraintes de tension se créent sans pouvoir se dissiper. Lorsque ces contraintes atteignent la limite de résistance du matériau, des fissures apparaissent. Ce phénomène est illustré à la Figure IV.4. La température à laquelle apparaît la fissure est appelée température de fissuration thermique.

Le principe de l'essai de retrait thermique empêché, encore appelé Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST), consiste donc à maintenir la hauteur d'une éprouvette d'enrobé constante tout en diminuant la température à vitesse constante (généralement $-10^{\circ}\text{C}/\text{H}$).

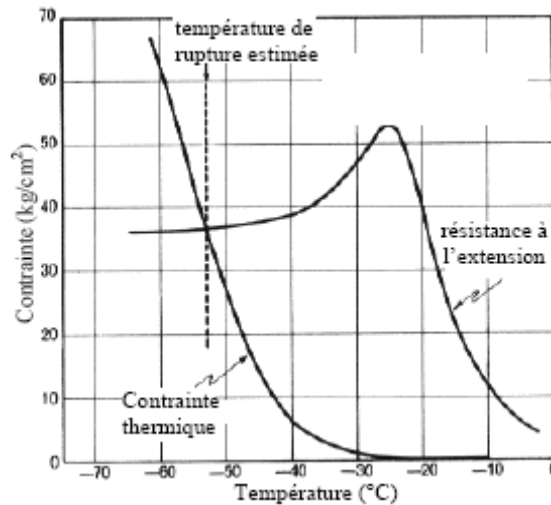


Figure IV.4 Méthode d'estimation de la contrainte de rupture thermique[1].

La déformation totale, notée $\varepsilon^{\text{totale}}$, peut se décomposer en la somme d'une déformation mécanique et d'une déformation d'origine thermique, respectivement notées $\varepsilon^{\text{mécanique}}$ et $\varepsilon^{\text{thermique}}$.

Il vient :

$$\text{Equation } \varepsilon^{\text{totale}} = \varepsilon^{\text{mécanique}} + \varepsilon^{\text{thermique}} \quad (\text{IV.03})$$

Etant donné que le retrait est empêché :

$$\varepsilon^{\text{totale}} = 0 \quad (\text{IV.04})$$

$$\varepsilon^{\text{mécanique}} = -\varepsilon^{\text{thermique}} = -\alpha\Delta T \quad (\text{IV.05})$$

avec α le coefficient de dilatation/contraction thermique moyen de l'enrobé ($\alpha \approx 30 \mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$)

Cet essai introduit un couplage thermo-mécanique puisque, à partir d'une sollicitation thermique ($\varepsilon^{\text{thermique}} = \alpha * \Delta T$), on obtient une sollicitation mécanique induite ($\varepsilon^{\text{mécanique}} = -\alpha * \Delta T$). Au cours de l'essai, la contrainte de traction induite par la variation de température (contrainte thermique) se développe dans l'éprouvette d'enrobé jusqu'à la fracture de celle-ci. L'essai de retrait thermique empêché utilisé permet donc de caractériser le comportement de la chaussée à basse température. En effet, la procédure de l'essai est fondée sur l'hypothèse

que la contraction de la couche de surface pendant un refroidissement est restreinte dans la direction longitudinale (la longueur de la route peut être considérée comme infinie).

Les paramètres de l'essai les plus souvent considérés sont : la contrainte de rupture et la température de rupture. La Figure IV.5 montre le résultat typique d'un essai de retrait empêché sur un enrobé au bitume pur et sur un enrobé au liant modifié.

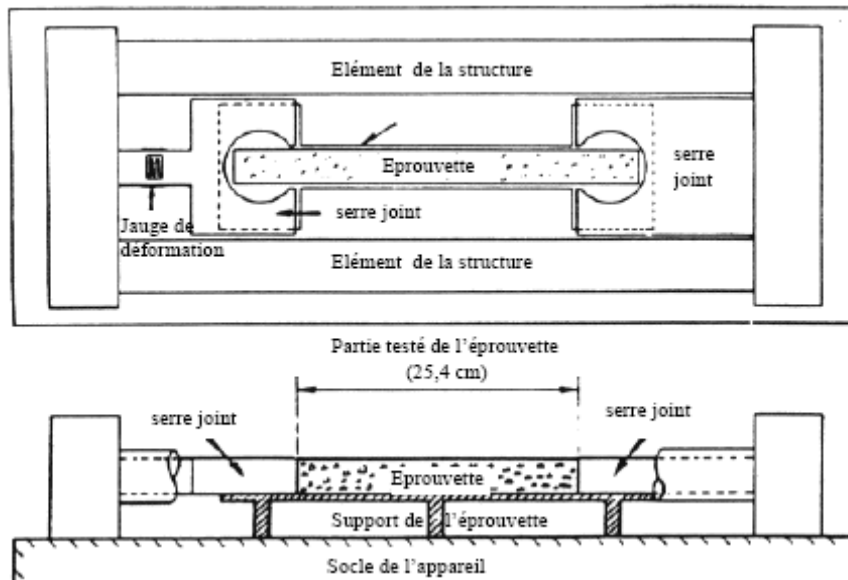


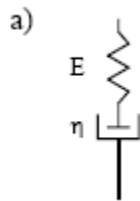
Figure IV.5 .Appareil développé par Monismith et al. (1965) pour l'essai de retrait thermique Empêché [1]

IV.4 MODÉLISATION DU COMPORTEMENT LINÉAIRE (VEL)

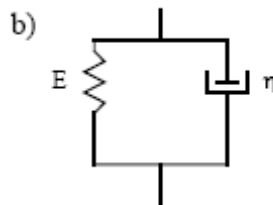
Cette partie est consacrée à une présentation non exhaustive des différents modèles rhéologiques trouvés dans la littérature pour la modélisation des matériaux bitumineux en petites déformations, *i.e.* dans le domaine visco-élastique linéaire (VEL)..

IV.4.1 Assemblage discret de ressorts et d'amortisseurs - spectre discret:

Toute combinaison de ressorts (éléments élastiques) et d'amortisseurs linéaires (éléments visqueux Newtoniens) constitue un modèle viscoélastique linéaire analogique (Ferry, 1980). De nombreux modèles combinant ressorts et amortisseurs linéaires ont, par ailleurs, été employés et présentés dans la littérature de manière à décrire le comportement viscoélastique linéaire des liants et des mélanges bitumineux. Les combinaisons les plus simples sont les modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt.



.Éléments de Maxwell(liquide viscoélastique)



élément Kelvin-Voigt(solide viscoélastique)

Figure IV.6

IV.4.2 Modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt généralisés:

Le modèle de Maxwell généralisé est constitué d'un groupe de n éléments de Maxwell montés en parallèle, avec éventuellement un ressort et un amortisseur linéaire en parallèle. Le modèle de Kelvin-Voigt généralisé est constitué d'un groupe de n éléments de Kelvin-Voigt en série, avec éventuellement un ressort et un amortisseur linéaire en série.

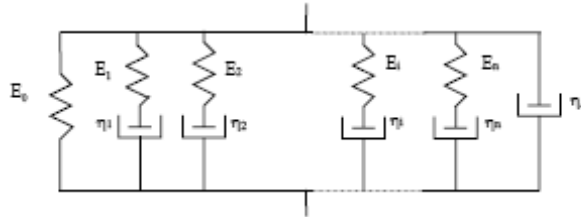


Figure IV.7. Modèle de Maxwell généralisé.

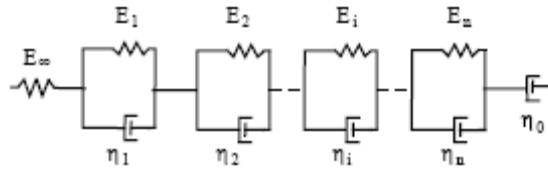


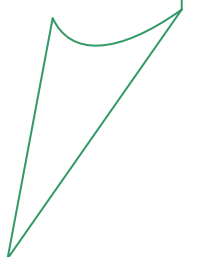
Figure IV.8. Modèle de Kelvin-Voigt généralisé.

Les modèles généralisés de Maxwell et de Kelvin-Voigt (Figure IV.7 & Figure IV.8) permettent une description tout à fait satisfaisante du comportement des liants et des enrobés bitumineux à condition qu'un nombre suffisant d'éléments (n) soit considéré ($n=8$ apparaît comme un minimum) [27].

CHAPITRE V

procédures expérimentales résultats et discussion

procédures expérimentales résultats et discussion



V procédures expérimentales, résultats et discussion

Introduction

Cette partie présente les différents résultats obtenus dans le domaine des grandes déformations des enrobés bitumineux. Nous nous intéressons ici exclusivement aux propriétés à la rupture (résistance en compression et en flexion des enrobés) des enrobés bitumineux classiques et celles qui contiennent de fibres de verres. Le but étant notamment de comparer entre la résistance à la rupture des enrobés classiques et les enrobés renforcés par la fibre de verre c'est une caractérisation sommaire du matériau qui ouvrira dans un sens de grandes opportunités dans le futur des routes à grandes circulations.

VI.1 Matériau d'essai

Dans nos essais on a utilisé le bitume bitumineux BB qui construit la couche de roulement (la couche supérieure de la route) ; cette dernière est la plus sollicitée par l'écrasement et les flexions répétées et dont la composition est portée sur les tableaux ci dessous:

Tableau VI. 1 mélange granulaire

Tamis (mm)	Mélange à blanc			Mélange après extraction			Fuseau BB 0/14	
	Retenus grs	Retenus %	passants %	Retenus grs	Retenus %	passants %		
80								
63								
50								
40								
31.5								
25								
20								
16	0.0	0	100	0.0	0	100		
14	81.0	2	98	20.0	3	97	94	100
12.5	321.0	8	92	41.0	7	93		
10	864.0	22	78	108.0	18	82		
8	1234.0	31	69	151.0	25	75	60	75
6.3	1426.0	36	64	181.0	30	70		
5	1636.0	41	59	225.0	38	62	45	60
3.15	2046.0	51	49	286.0	48	52		
2	2434.0	61	39	359.0	60	40	28	40
1	2859.0	72	28	434.0	73	27		
0.5	3129.0	78	22	479.0	81	19		
0.315	3267.0	82	18	499.0	84	16		
0.2	3369.0	84	16	515.0	87	13		
0.08	3540.0	89	11	540.0	91	9	7	10
PT	3987			594				

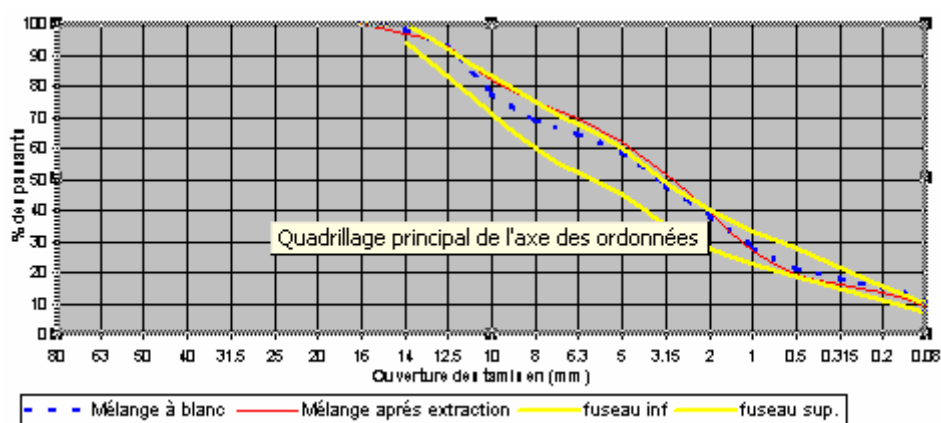


Figure VI. 1 Fuseau de spécification BB 0/14 semi-grenue pour couche de roulement (selon CPS)

➤ **Teneur en liant:**

La teneur en liant hydrocarboné est retenir a partir d'une étude de laboratoire,

Tableau VI. 2 teneur en liant

Poids du filtre: P1	30
Poids de l'enrobé + filtre: P2	655
Poids de l'enrobé: P3 = P2 - P1	625
Poids du matériau + filtre: P4	624
Poids du matériau: P5 = P4 - P1	594
Poids du liant: P6 = P3 - P5	31
Teneur en liant: TL = P6/P5	5.22
TENEUR EN LIANT MOYENNE (%) =	5.22
SURFACE SPECIFIQUE =	14.51
MODULE DE RICHESSE K =	3.40

Tableau VI. 3 constituants

Constituants	Dosage %
Sable 0/3	49
Granulat 3/8	20
Granulat 8/15	31
Fillers	
Bitume 40/50	5.22

Observation:

le dosage en bitume doit être compris entre 3.3 et 3.9: $3.3 < K < 3.9$

Tel que le module de richesse **K** est calculé avec la formule suivante

$$K = \frac{TL}{\sqrt[3]{Z}}$$

Avec $Z = 0.25G + 2.5S + 12s + 135f$ (m²/KG)

avec les proportions pondérales

G les éléments supérieurs à 6mm

S les éléments compris entre 6 et 0.315mm

s les éléments compris entre 0.315 et 0.08mm

f les éléments inférieurs à 0.08

VI.2 Essais sur les mélanges BB 0/14

VI.2.1 Détermination du coefficient d'aplatissement (A)[NFP 18-561 et NF en 933-3]

a/ Définitions:

La forme d'un élément est définie par trois dimensions principales :

Longueur **L**

Épaisseur **E**

Grosueur **G**

Le coefficient d'aplatissement **A** d'un lot de granulats soumis à l'essai est, par définition, le pourcentage des éléments tels que : **G/E > 1.58**

b/ Principe de l'essai:

L'essai consiste à effectuer un double tamisage :

- Tamisage sur tamis à mailles carrées, pour classer l'échantillon étudié en différentes classes d/D

(avec $D = 1,25 d$), suivant leur grosueur **G**.

- Puis tamisage des différentes classes granulaires d/D, sur des grilles à fentes parallèles d'écartement : **d/1.58**

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire d/D correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes d'écartement d/1,58, exprimé en pourcentage.

Le coefficient d'aplatissement global de l'échantillon est égal à la somme pondérée des coefficients d'aplatissement des différentes classes granulaires d/D composant l'échantillon.

c/ Expression des résultats:

M_g = Masse de chaque classe granulaire d/D, en grammes.

$M = \sum M_g$

M_e = Masse des éléments de chaque classe granulaire d/D passant sur la grille correspondante, définie

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par: $\frac{M_e}{M_g} \cdot 100$

Le coefficient d'aplatissement global **A** est donné par :

$$A = \frac{\sum M_e}{M} \cdot 100$$

Tableau VI. 4

Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles		
Sous classe granulaire d/D en mm	Masse de chaque S/classe Mg en grs	Ecratement des grilles en mm	Masse des passants Me en grs	Coefficient d'aplatissement de chaque S/classe : $A = 100 \cdot Me / Mg$
> 50		31.5		
40-50		25		
31,5 -40		20		
25 - 31,5		16		
20 - 25		12.5		
16 - 20		10		
12,5 - 16	533	8	61	
10 - 12,5	1455	6.3	208	
8 10	907	5	188	
6,3 - 8	226	4	59	
5 - 6,3	21	3.15	8	
4 5		2.5		
$\Sigma Mg = 3142$		$\Sigma Me = 524$		
$A = 100 \cdot \Sigma Me / Mg = 17$				

Observation: conforme ($A < 30$)

VI.2.2 Essai Marshall

a/ Définition:

La présente norme spécifie une méthode d'essai ayant pour but de déterminer, pour une température et une énergie de compactage données, le pourcentage de vide, la stabilité et le fluage dits Marshall d'un mélange hydrocarboné à chaud.

b/ Essai de stabilité et de fluage Marshall

Les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement sont immergées dans l'eau à $60^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ Pendant $30 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$. compte tenu de la durée de l'essai il est nécessaire d'échelonner les mises en immersion des éprouvettes, toutes les 5 min.

Les éprouvettes sont placées dans les mâchoires d'écrasement. L'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression. La vitesse du plateau de la presse est réglée à $0.85 \text{ mm/s} \pm 0.1 \text{ mm/s}$. ces opérations doivent être réalisées en moins d'une minute.

La stabilité Marshall est la valeur de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette.

Le fluage Marshall est la valeur de l'affaissement de l'éprouvette, selon leur diamètre vertical, au moment de la rupture (ou à l'instant où on atteint le maximum de la charge).

c/ Expression des résultats :

La stabilité Marshall est exprimé en Décanewtons et représente la moyenne des résultats d'au moins trois éprouvettes.

Le pourcentage de vide, soit γ en pourcentage est donnée par:

$$\gamma \% = 100 \left(1 - \frac{MVA}{MVR} \right) \text{ tel que:}$$

MVA est la masse volumique apparente de l'éprouvette par pesée hydrostatique, en gramme par centimètre cube.

MVR: est la masse volumique réelle du mélange hydrocarboné, en gramme par centimètre cube.

$$-\gamma_{dm} = 1.65\%$$

$$-MVA = 2.346 - 2.328 - 2.352 (\text{gr/cm}^3)$$

$$-\text{stabilité Marshall} = 1200 - 1150 - 1300 (\text{kg})$$

$$-\text{fluage (déformation)} = 2.92 - 2.82 - 2.60 (1/10 \text{ mm})$$

VI.2.3 Essai de dureté :**VI.2.3.1 Essai d'usure micro- Deval:****a/ Définition de l'essai :**

L'essai consiste à mesurer l'usure des granulats produite par frottements réciproques dans un cylindre en rotation dans des conditions bien définies.

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

4-6, 3mm, 3-10mm, 10-14mm et 25-50mm.

Pour les essais effectués sur les gravillons entre 4 et 14 mm une charge abrasive est utilisée. Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1.6mm produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par la quantité $100 \frac{m}{M}$

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

- coefficient micro-Deval sec du granulat (M_{DS}),
- coefficient micro-Deval en présence d'eau du granulat (M_{DE})

VI.2.3.2 Essai Los-Angeles**a/ Généralités**

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los-Angeles, Telle qu'elle est décrite dans la présente norme.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes granulaires 4-6,3mm; 6,3-10mm; 10-14mm; 10-25mm; 16-31,5mm, 25-50mm, de la granularité du matériau, tel qu'il sera mis en œuvre. La classe 10-25mm doit contenir 60% de 10-16mm, la class 16-31,5mm 60% de 16-25mm et la classe 25-50mm 60% de 25-40mm. La masse de la charge de boulets varie suivant les classes granulaires.

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1.6mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité: $100 \frac{m}{M}$

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, coefficient Los Angeles du matériau (L_A).

b/Appareillage :

Appareillage d'usage courant :

Tamis de 1.6-4-6.3-10-14-16-20-25-31.5-40et 50mm.

Leur diamètre ne devra pas être inférieur à 250mm.

Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau selon la norme expérimentale P 18-553 et une analyse granulométrique par tamisage selon la norme expérimentale P 18-560

M.D.E%=19 conforme (MDE <20)

L..A%=24L conforme (A% <25)

VI.3 essais sur le BB 0/14 renforcé par la fibre de verre

VI.3.1 Essais de compression:

Ces tests de compression directe sur enrobés (classiques ou renforcés par la fibre de verre) ont été réalisés à température constante entre 15° et 16°C. La vitesse de déplacement est de 5mm/mn. Six éprouvettes cylindriques de 100mm de diamètre et de 150mm de hauteur, ont été testées en compression en utilisant une presse Oehlgass (figure 1). La charge est mesurée à l'aide d'une cellule de charge d'une capacité de 130KN. Les déplacements sont mesurés à l'aide d'un comparateur au 1/100mm monté sur la machine.

Tableau VI.5: Données sur les éprouvettes d'essais d'écrasement

N°Ech	Masse Fibre(g)	Pc(KN)	T(°c)	Masse (g)	D(mm)	L(mm)	Dep(mm)
1	0	76	15	2410	100	150	6,7
2	5	86	15	2355	101	148	6,46
3	10	110	16	2270	102	145	7,1
4	20	130	16	2445	100	151	6,75
5	30	/	16	2515	101	150	8,15
6	50	/	16	2256	102	148	8,2



Figure VI. 2 : Machine d'essais Oehlpass et moyens de mesure et de contrôle

VI.3.1.1 Résultats expérimentaux:

La figure VI.03 présente les résultats des essais d'écrasement sur les quatre enrobés étudiés (renforcés et non renforcé). Les résultats expérimentaux obtenus sur les enrobés bitumineux testés montrent que la résistance à la rupture par compression augmente avec l'augmentation de la teneur de fibre de verre.

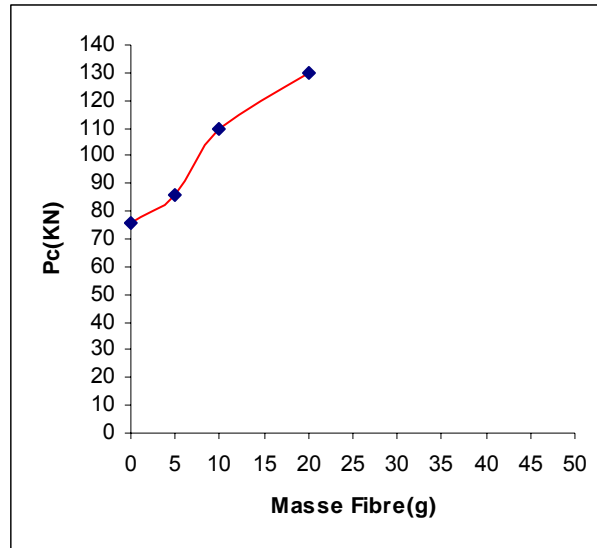


Figure VI. 3 : Résultats d'essais de compression



Figure VI. 4: Faciès de rupture des éprouvettes de bitume

VI.3.2 Essais de flexion:

Les essais de flexion sur enrobés (classiques ou renforcés par la fibre de verre) ont été réalisés à température constante entre 15° et 16°C. La vitesse de déplacement est de 5 mm/mn. Cinq éprouvettes cylindriques de 100mm de diamètre et de 150mm de hauteur, ont été testées en flexion 3 points en utilisant une presse Oehlgass (figureVI.02). La charge est mesurée à l'aide d'une cellule de charge d'une capacité de 130KN. Les déplacements sont mesurés à l'aide d'un comparateur au 1/100mm monté sur la machine.

Tableau VI. 7 : Données sur les éprouvettes d'essais de flexion

N°Ech	Masse Fibre(g)	Pc(KN)	T(°c)	Masse (g)	D(mm)	L(mm)	Dep(mm)
1	0	53	15	2410	100	148	2,78
2	5	61	15	2355	100	146	2,57
3	10	75	15	2270	101	151	2,43
4	20	95	15	2445	100	148	2,35
5	30	106	15	2515	101	152	2,28

VI.3.2.1 Résultats expérimentaux:

La figure VI.5 présente les résultats des essais de flexion 3 points sur les cinq éprouvettes étudiés (renforcés et non renforcé). Les résultats expérimentaux obtenus montrent que la résistance à la rupture par flexion augmente avec l'augmentation de la teneur en fibre de verre.

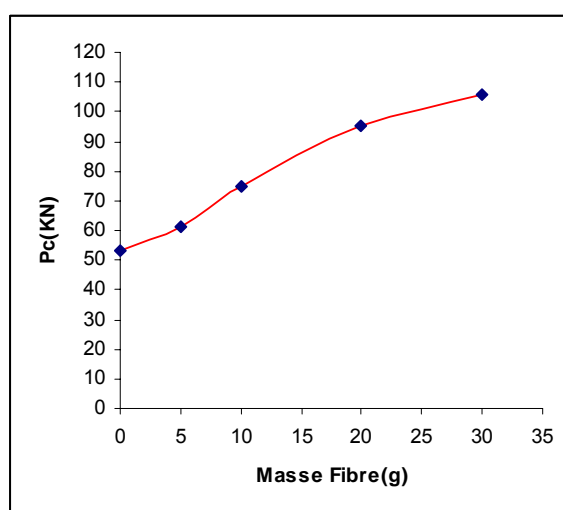


Figure VI. 5 : Résultats d'essais de flexion 3pts

VI.4 Conclusion

D'après les résultats obtenus dans les deux cas (écrasement fig.V.3 et flexion fig.V.5), sur des éprouvettes de bitume et de bitume renforcé à la fibre de verre, certains problèmes de disposition de la fibre dans le bitume du fait de sa longueur qui s'enchevêtrent en des endroits et forment des hétérogénéités fragilisant certaines éprouvettes et causent des dispersions dans les résultats. Néanmoins un enseignement est à retenir et à priori dire que l'ajout de la fibre de verre apporte une amélioration importante aux caractéristiques mécaniques du bitume. Ces résultats ouvrent un éventail de possibles travaux de recherche sur ce matériau en prenant en considération les différents phénomènes intervenant dans les sollicitations que subit ce matériau dans la nature à savoir : la température (Hiver-15° à 70° en été), le chargement (efforts combinés flexion et compression) et cas du relief en tenant compte des montées et descentes sur les routes.

Conclusion Générale

Chaque couche de chaussée subit des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic. Le calcul des efforts et des déformations qui s'effectue traditionnellement en considérant des multicouches élastiques linéaires isotropes, nécessite, en premier lieu, la connaissance du module de Young et éventuellement du coefficient de Poisson (pour résoudre un problème considéré comme élastique).

1. Les tractions répétées à la base des couches, sous l'effet du passage des véhicules, créent des micro-dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau (phénomène de fatigue).
2. Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû au tassement des couches de béton bitumineux mais peut aussi être dû éventuellement aux déformations de couches inférieures non traitées.
3. Nous pouvons également souligner qu'en raison des propriétés particulières apportées par le liant bitumineux, les enrobés possèdent un comportement (donc un module) fortement dépendant de la température et de la vitesse de chargement.

A basse température le bitume possède un comportement fragile (donc fissuration de la chaussée). Cependant, la fissuration thermique peut être facilement évitée à basse température si l'on utilise un bitume de grade élevé, c'est-à-dire un bitume moins "dur", et donc moins "cassant" à basse température. Néanmoins, un bitume de grade trop élevé se révèle néfaste vis-à-vis des problèmes d'orniérage (déformations permanentes de la chaussée) à température élevée. Le bitume idéal doit donc être à la fois le moins susceptible possible aux phénomènes de fissuration thermique (à basse température) et d'orniérage (à température élevée).

Plus simplement, On doit donc exiger des enrobés deux qualités principales en rapport direct avec la dépendance du liant utilisé vis-à-vis de la température :

- **la stabilité**, la résistance à la déformation permanente qui est aggravée à haute température,
- **la flexibilité**, soit l'aptitude à supporter sans fissures thermiques les basses températures.

Ces conditions ont notamment amené les différents groupes pétroliers à développer de nouveaux bitumes pour couvrir ce large intervalle de température (-30°C à 60°C) : les bitumes modifiés aux polymères

Pour répondre à ses exigences, nous proposons l'ajout de la fibre de verre dans le bitume à comportement viscoplastique sans mémoire pour le rendre viscoélastique avec mémoire et reprendre son état initial après décharge. La fibre de verre joue le rôle de renfort et ainsi remédier aux problèmes de fissuration thermique à basse température.

Futurs travaux

Les perspectives à donner à ce travail se résument en une planification dans la durée de travaux et qui portent sur deux axes distincts :

Etudes thermomécaniques sur les bitumes renforcés à la fibre de verre effet de la température sur le comportement des bitumes.

Etudes sur le mélange optimal qui donnerai les meilleurs résultats selon le relief et les efforts qu'ils engendrent sur le plat (compression) et en montée ou descente (glissement du matériau) qui se résument en des études d'optimisation qui mènerai à choisir le mélange bitume*fibre pour des routes en tenant compte de la géographie (relief) de la température et du type de sollicitations que subit la chaussée. L ajout de la fibre de verre augmente considérablement les caractéristiques mécaniques du bitume et la durée de vie des routes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] François OLARD, thèse de doctorat, Paris, 2003.
- [2] manuel du laboratoire routier par R. PELTIER
- [3] article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.
- [4] ADDALA, F., *Etude du comportement rhéologique des bitumes à moyenne et basse température. Mise au point d'un nouvel essai de torsion-compression d'éprouvette creuse (T.E.C.). Thèse présentée à l'institut National de Sciences Appliquées*, 1989.
- [5] PUCCT, T., *Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux*, Thèse de doctorat EPFL Lausanne, 2000.
- [6] Balay, J., ODEON, H., *Dimensionnement des structures de chaussées. Cours de 3^{ème} année de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat*, 1999.
- [7] Di BENEDETTO, H., *Modélisation: écart entre état des connaissances et application*, Journée LAVOC, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 16 septembre 1998, 23p.
- [8] Manuel d'identification des dégradations des chaussées souples.
URL <http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/publications/reseau/chaussees/degradations.pdf>
- [9] OLARD, F., *étude et modélisation de comportement thermomécanique des enrobés bitumineux*. mémoire de doctorat, Lyon, 2000.
- [10] OLARD, F., Di BENEDETTO, H., DNY, A., VANISCOTE, J.C., "Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics", 2003.
- [11] SALENÇON, J., *Viscoélasticité. Cours de calcul des structures anélastiques*. Paris : Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1983, 88 p.
- [12] FERRY, J.D., *viscoelastic properties of polymers*, 3rd Edn, John Wiley & Sons, 1980
- [13] Lu, X., *Influence of polymer modification on low temperature behaviour of bituminous binders and mixtures*, Zurich, 2003.
- [14] DI BENEDETTO, H., "Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux : résultats expérimentaux et formulation rhéologique", *Mechanical Tests for Bituminous Mixes, Characterization, Design and Quality Control, Proceedings of the Fourth Rilem Symposium*, Budapest, 1990.
- [15] DOUBBANEH, E., *comportement mécanique des enrobés bitumineux de petites ou grandes déformations*.-thèse, Lyon, 1995, 217p.
- [16] DI BENEDETTO, H., DE LA ROCHE, C., *modulus of the art Stiffness Modulus and fatigue of bituminous mixtures*, E et FN spon, Ed. L, Francken, 1998.
- [17] SOLTANI, M.A., *fatigue des enrobés bitumineux*.-thèse de doctorat, Lyon, 1998.
- [18] CHARIF, K., *Contribution à l'étude du comportement mécanique des béton bitumineux en petite et grandes déformations*.-thèse de doctorat, Paris, 1991, 277p.
- [19] FRANCKEN, L., VANELSTRAETE, A., *Relation between mix stiffness and binder complex modulus*. Eurobitume Workshop, 1995.
- [20] UGE, P., GEST, G., GRAVOIS, A., *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, N° spécial V, 1977, pp. 199-213.
- [21] ZENG, M., BAHIA, H.U., ZAHAI, H., ANERSON, MR., TURNER, P., *Annual meeting of the association of asphalt paving technologists*, 2001.

- [22] WITCZAK, M.W., ANDREI, D., MIRZA, W., *Development of revised Predictive Model for the dynamic modulus of asphalt Mixtures*. University of Maryland, March 1999.
- [23] WITCZAK, M.W., PELLINEN, T.K., *AC Mixture Response to Performance E^* and S_m Prediction Equation Methodology Results, Superpave Support and Performance Models Management*, 2000.
- [24] HEUKELOM, W., KLOMP, J.G., *Road design and dynamic loadings AAPT*, Vol. 33, 1964.
- [25] PFEIFFER, J.P., VAN DOORMAAI, P.M., *The rheological properties of bitumens*, *J. Inst. Petrol.*, Vol. 22, 1936.
- [26] VAN DRAAT, W., SOMMER, P., *Ein Beitrag zur Bestimmung der dynamischen Elastizitätsmoduln von Asphalt*. *Strasse und Autobahn*, Vol 16, 1965.
- [27] LEE, H.J., *Uniaxial constitutive modeling of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory*. North Carolina state university, 1996.

Résumé

Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes qui induisent parfois à un orniérage à la surface de la chaussée. Du fait du liant bitumineux, les enrobés possèdent un comportement fortement dépendant de la température et de la vitesse de chargement. Chaque couche de chaussée subit des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic. Pour répondre à ses exigences, nous avons proposé l'ajout de la fibre de verre dans le bitume. Des essais sur des éprouvettes cylindriques sollicitées en flexion et à l'écrasement, les résultats montrent clairement la faisabilité de la technique. La fibre de verre améliore donc les caractéristiques mécaniques du bitume. Sur la chaussée, la fibre joue le rôle renfort et rendre le bitume viscoélastique ce qu'il lui fait reprendre son état initial après décharge. la fibre de verre joue le rôle de renfort et ainsi remédier aux problèmes de fissuration thermique à basses températures.

Abstract

Repeated compressions by the passage of the load can create permanent deformations which induce sometimes a rutting on the road surface. The bituminous mix has a behavior that depends strongly on the temperature and the loading rate. Each layer is under flexion and crushing caused by the effect of the traffic.

In order to meet these requirements, we have recommended and proposed the addition of glass fiber in the bitumen.

Tests on cylindrical test-tubes under flexion and crushing have clearly shown the feasibility of the technic. We can easily state that the glass fiber improves very well the mechanical characteristics of the bitumen. In this way the glass play a reinforcement role and improve the visco-elasticity of the material by avoiding the problems caused by thermal cracking of low temperature.

ملخص

الضغوطات المتكررة لمرور وسائل النقل تحدث تشوهات دائمة على سطح الطريق كالتحديب مثلا. إن الزفت يمنح الطريق سلوكا يتعلق مباشرة بدرجة الحرارة و سرعة الحمولات و بهذا كل طبقة من طبقات الطريق تتأثر بالضغوطات والتقوسات. و للتخفيف من هذه التشوهات نقترح إضافة ألياف زجاجية في الزفت. التجارب التي أجريت على مخبريات اسطوانية (تجارب مقاومة قوى الضغط و التقوس) اطهرت تجاوب التقنية. ومنه فان الألياف الزجاجية تحسن الخصائص الميكانيكية للطريق إذ تلعب دور مقو كما تمنح الطريق مرونة تجعلها أكثر مقاومة للعوامل السابق ذكرها.

