

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



**Ecole Nationale Supérieure
des Travaux Publics**

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Code :

Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme de MASTER

Filière : TRAVAUX PUBLICS

Spécialité : INFRASTRUCTURES DE BASE

Thème

**Présentation des méthodes de détermination du
module complexe des
matériaux bitumineux**

Encadré par :

Pr. DERRICHE Zohra

Présenté par l'ingénieur :

MEGHLAOUI Mohammed

Promotion 2015

شكر:

بسم الله الرحمن الرحيم

أشكر الله الذي وفقني لإنجاز هذا العمل.

أشكر الوالدين الكريمين وكل أفراد عائلتي على ومساندتهم لي طيلة مشواري الدراسي.

أشكر المؤطر: البروفيسور دريش زهرة على فائقها وتوجيهاتها طيلة فترة إعداد العمل

و
جميع الأساتذة والموظفين بالمدرسة الوطنية العليا لأشغال العمومية.
الشكر موصول لجميع زملاء الدراسة بالمدرسة الوطنية العليا لأشغال العمومية

و
الأصدقاء: سفيان، محمد المالك، زكرياء، كمال.

مغلاوي محمد

Résumé :

Dans cette thèse, on va présenter une étude bibliographique sur les méthodes de détermination du module complexe des matériaux bitumineux.

Ce travail commence par des généralités sur les matériaux bitumineux dans le premier chapitre. Dans les deux chapitres suivants, on présente une étude de la rhéologie des enrobés bitumineux et les lois de comportement élastique et viscoélastique. Dans le chapitre quatre on a défini le module complexe, les différents types d'essais pour la détermination du module et les facteurs qui entrent dans la détermination du module complexe. Le chapitre cinq on va représenter les résultats des essais et les influence de la température et la fréquence sur le module complexe. On clôt l'étude par une conclusion générale qui résume les résultats de cette étude.

Mots clés : matériaux bitumineux, rhéologie, Élastique, viscoélastique, module complexe.

المخلص:

في هذه المذكرة، نقدم دراسة على طرق تحديد معامل الصلابة المركب الخاص بالمواد الزيتية.

في بداية العمل سنقدم عرض الخصائص العامة للمواد الزيتية في المحور الأول، في المحورين المواليين، نعرض دراسة ل الخصائص الريولوجية لهذه المواد والقوانين المتعلقة بسلوكها في المجالين المطاطي والمرن والمطاطي اللزج. في المحور الرابع نقدم عرض لمختلف الطرق الخاصة بتحديد معامل الصلابة المركب والعوامل التي تؤثر عليه، بعدها نقوم بعرض مختلف نتائج التجارب مع ابراز التأثير الواضح ل الحرارة والتواتر على معامل الصلابة. ختام العمل بخاتمة تلخص الملاحظات والنتائج المستخلصة من هذه الدراسة.

كلمات مفتاحية: مواد زيتية، ريولوجي، مطاطي -مرن-، اللزوجة، معامل الصلابة المركب

Table des matières :

Résumé :	i
Table des matières :	ii
Liste des figures :	v
Liste des tableaux :	vi
Principaux symboles :	vii
INTRODUCTION GÉNÉRALE :	1
chapitre I : Les enrobés bitumineux	2
I.1. Introduction :	2
I.2. Définition de l'enrobé bitumineux :	2
I.3. Composants de base :	2
I.3.1. Composants minéraux :	3
I.3.2. Liants hydrocarbonés	5
I.3.2.1. <i>Le bitume</i>	5
I.4. Formulation des enrobés bitumineux	10
I.5. Conclusion :	11
chapitre II : Notions d'élasticité et de visco-élasticité	12
II.1. Introduction :	12
II.2. Élasticité linéaire	12
II.3. Définition de la viscosité	12
II.4. Viscoélasticité linéaire	13
II.4.1. Mesure de la viscosité de l'enrobé	14
II.5. classes de comportement des bitumes purs en fonction de ϵ et t :	15
II.6. Phénomène de la fatigue des enrobes bitumineux	16
II.6.1. Hypothèse du comportement en petites déformations	18

II.7. Conclusion :	20
chapitre III : Ecriture des lois de comportement élastique visco-élastique et thermo-visco-élastique	21
III.1. Les lois de comportement élastique :	21
III.1.1. Loi de Hooke	21
III.2. Les lois de comportement viscoélastique :	23
III.2.1. Sollicitation en contrainte - Fonction de fluage (ou de retard)	23
III.2.2. Sollicitation en déformation - Fonction de relaxation	25
III.3. Les lois de comportement thermo-visco-élastique.	25
III.4. Conclusion :	27
chapitre IV : Les essais de module complexe	28
IV.1. Introduction :	28
IV.2. Module de l'enrobé	28
IV.3. Définition du module complexe.	28
IV.3.1. Module de rigidité :	29
IV.4. types d'essais et des chargements pour la mesure de module complexe :..	30
IV.4.1. Types d'essais :	30
IV.5. Type des sollicitations :	31
IV.5.1. Effet du trafic	32
IV.5.2. Effet de la température :	32
IV.6. Types de chargement :	33
IV.7. Essais de caractérisation :	36
IV.7.1. Essais non homogènes :	36
IV.7.2. Essai homogène :	38
IV.8. Détermination du module complexe par propagation des ondes :	39
IV.8.1. La méthode de l'impact écho pour estimer le module :	40

IV.8.2. Les méthodes dynamiques :.....	40
Reposant sur l'étude de la résonance libre du matériau étudié selon deux modes propres sur des éprouvettes cylindriques.....	40
IV.9. Conclusion :.....	41
chapitre V : PRESENTATION DES RESULTATS.....	42
V.1. Introduction :.....	42
V.2. LES COURBES ISOTHERMES :.....	42
V.2.1. Lecture des courbes :	42
V.3. LA COURBE MAITRESSE :.....	43
V.4. Courbes isochrones :.....	45
V.4.1. Lecture des courbes :	45
V.5. COURBES DANS LE PLAN COLE ET COLE	45
V.5.1. Lecture des courbes :	46
V.6. Courbe dans l'espace de Black :.....	47
V.6.1. Lecture des courbes :	47
V.7. Interprétation des résultats :.....	48
V.7.1. Variation du module en fonction de la température :	48
V.7.2. Variation du module en fonction de la fréquence :.....	48
V.7.3. Variation du module en fonction de l'angle de phase :	48
V.8. Conclusion :.....	49
CONCLUSION GÉNÉRALE :.....	50
Bibliographie	51

Liste des figures :

FIGURE I-1: REPRESENTATION EN VOLUME ABSOLU D'UN ENROBE COMPACTE.	2
FIGURE I-2: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA SEPARATION CHIMIQUE DU BITUME.	7
FIGURE I-3: EXEMPLE DE COMPOSITION CHIMIQUE D'UN BITUME.	7
FIGURE I-4: APPAREIL DE MESURE DE LA PENETRABILITE.	8
FIGURE I-5: SCHEMA DU TEST TEMPERATURE BILLA ANNEAU (TBA)	8
FIGURE I-6: SCHEMA DE L'ESSAI DE COMPORTEMENT A BASSE TEMPERATURE – FRAASS	9
FIGURE II-1:COMPORTEMENT VISCOELASTIQUE	13
FIGURE II-2: EXPERIENCE D'EFFACEMENT : CRENEAU DE DEFORMATION ET REPONSE DU MATERIAU EN CONTRAINTE.....	14
FIGURE II-3:MANIABILIMETRE NYNAS	15
FIGURE II-4:PRINCIPE D'EVALUATION DU COMPORTEMENT FREQUENTIEL DES MATERIAUX.....	15
FIGURE II-5: CLASSES DE COMPORTEMENT DES BITUMES EN FONCTION DE EET T.....	16
FIGURE II-6: COMPORTEMENTS "TYPES" DES ENROBES BITUMINEUX A TEMPERATURE FIXEE, (E) DEFORMATION - (N).....	18
FIGURE III-1:EXEMPLES TYPIQUES DE COMPORTEMENTS D'UN SOLIDE DEFORMABLE SOUS CONTRAINTE.	21
FIGURE III-2:LE MATERIAU PARALLELEPIPEDIQUE EST SOUMIS A UNE FORCE DE TRACTION DANS OX	21
FIGURE III-3: LE MATERIAU EST SOUMIS A UNE CONTRAINTE UNIFORME P SUR TOUTES SES FACES :	22
FIGURE III-4:ESSAI DE FLUAGE D'UN MATERIAU VISCOELASTIQUE LINEAIRE.....	24
FIGURE III-5: SOLLICITATION A CONTRAINTE VARIABLE DANS LE TEMPS.....	24
FIGURE III-6:ESSAI DE RELAXATION D'UN MATERIAU VISCOELASTIQUE LINEAIRE	25
FIGURE III-7:METHODE D'ESTIMATION DE LA CONTRAINTE DE RUPTURE THERMIQUE	26
FIGURE IV-1: SOLLICITATIONS INDUITES PAR LE TRAFIC.....	32
FIGURE IV-2:SOLLICITATIONS INDUITES PAR LA TEMPERATURE	33
FIGURE IV-3:MATERIELS DE LABORATOIRE POUR LA FABRICATION ET POUR LE COMPACTAGE D'ENROBES.....	36
FIGURE IV-4: ESSAI DE FLEXION 2-POINTS SUR EPROUVETTE TRAPEZOÏDALE.....	37
FIGURE IV-5: ESSAI DE MODULE COMPLEXE DE TYPE TRACTION	38
FIGURE IV-6:MESURE DE MODULE COMPLEXE SUR EPROUVETTE CYLINDRIQUE	39
FIGURE IV-7:COMPARAISON DES LOIS DE DECROISSANCE EXPONENTIELLE ENERGETIQUE DES DIFFERENTS MATERIAUX.	40
FIGURE V-1: COURBES ISOTHERMES.....	42
FIGURE-V-2: COURBE MAITRESSE A 15 ° C.....	44
FIGURE V-3 : LES COURBES ISOCHRONES	45

FIGURE V-4: COURBES DANS LE PLAN COLE ET COLE.....	46
FIGURE V-5: COURBE DANS L'ESPACE DE BLACK.....	47

Liste des tableaux :

TABLEAU I-1: TYPES DE COMPOSANTS MINERAUX SELON LEUR CLASSE GRANULAIRE.	4
TABLEAU III-1:PRINCIPE DE SUPERPOSITION DE BOLTZMANN	23
TABLEAU IV-1: LES PRINCIPAUX ESSAIS HOMOGENES DE MODULE COMPLEXE EXISTANT SUR LES ENROBES BITUMINEUX.....	34
TABLEAU IV-2:LES PRINCIPAUX ESSAIS NON HOMOGENES DE MODULE COMPLEXE EXISTANT SUR LES ENROBES BITUMINEUX.....	35

Principaux symboles :

a_T	coefficient de translation
C_1, C_2	constantes de la loi WLF
E^*	module d'Young complexe
E_1	partie réelle de E^*
E_2	partie imaginaire de E^* ou module de perte
$F(t)$	fonction de fluage
f	fréquence
$R(t)$	fonction de relaxation
T	température
T_R	température de référence
ω	pulsation
ϕ_E	angle de phase de E^*
η	viscosité
ν	coefficient de Poisson
ν^*	coefficient de Poisson complexe
B	contrainte
ϵ	déformation
Γ	facteur de forme
μ	facteur de masse

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

Les matériaux bitumineux composent la quasi-totalité du réseau routier algérien qui représente à lui seul des milliers de kilomètres. Comme le coût des matériaux bitumineux est trop important, Dans le cadre de constructions neuves, plusieurs points peuvent permettre de réduire ces coûts. D'une part, un travail sur l'élaboration du matériau notamment au niveau des granulats le composant, permet de réduire les coûts de fabrication tout en conservant les propriétés mécaniques requises pour le type de structure souhaitée. D'autre part, il se montre primordial d'avoir une parfaite connaissance du matériau autant au niveau des caractéristiques physiques que mécaniques. Dans le cadre de constructions existantes, un suivi efficace de l'endommagement de la structure avec une identification des mécanismes et du niveau de dégradation permet d'intervenir au bon moment afin de réduire les coûts de réparations.

Les structures de chaussées routières sont soumises, en service, à des sollicitations très complexes. La circulation automobile (trafic) et le climat ont une influence importante sur le comportement des matériaux de chaussées. Dans certains pays tels que l'ALGÉRIE, les chaussées subissent de grandes amplitudes thermiques et sont donc soumises au phénomène de fissuration thermique.

De nombreux essais de laboratoire existent afin d'effectuer la caractérisation des matériaux bitumineux en prenant en compte leur comportement thermo-viscoélastique comme l'essai de module complexe.

Dans ce mémoire on présente les composantes des matériaux bitumineux, les lois de comportement et les méthodes de détermination du module complexe des matériaux bitumineux (bitume et enrobés bitumineux) en tenant compte de leur comportement thermo-viscoélastique.

chapitre I : Les enrobés bitumineux

I.1. Introduction :

Dans ce premier chapitre on résume les connaissances acquises sur les propriétés des enrobés bitumineux afin d'établir le cadre général de cette étude.

Tout d'abord on présente des généralités sur l'enrobé bitumineux et ses composants ainsi que les essais permettant de définir leurs principales caractéristiques, et les conditions de leur fabrication

I.2. Définition de l'enrobé bitumineux :

Les enrobés bitumineux ce sont des mélanges dont les composants principaux sont le liant hydrocarboné (généralement du bitume) et les composants minéraux (filler, Sable, gravillons ou gravier, pierres). Le pourcentage de la masse du liant hydrocarboné est en général inférieur à 7%, le reste étant constitué par le squelette granulaire. [1]

I.3. Composants de base :

Pour la représentation du composants d'un enrobé on utilise une représentation en volume absolu, qui prend en compte les différentes densités des constituants. Cette méthode est présentée à la Fig I :1

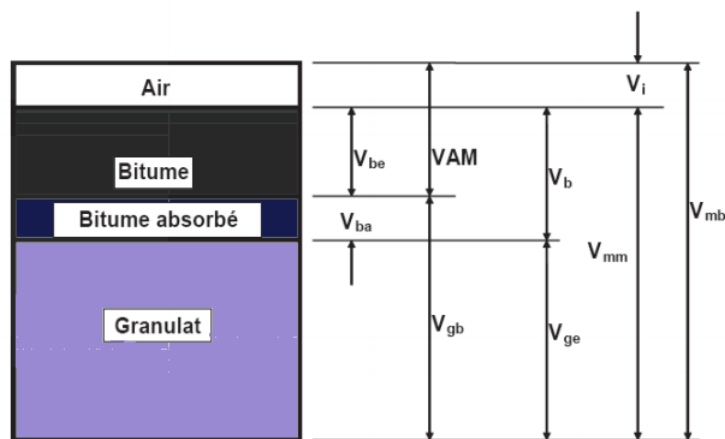


FIGURE I-2: REPRESENTATION EN VOLUME ABSOLU D'UN ENROBE COMPACTE. [2]

Où les termes suivants signifient :

V_{be} : Volume de bitume effectif,

V_{ba} : Volume de bitume absorbé,

VAM : Volumes des vides inter granulaires,

Les enrobés bitumineux

Vgb : Volume brut du granulat,

Vb : Volume total de bitume,

Vge : Volume effectif du granulat,

Vmm : Volume de l'enrobé sans vides interstitiels,

Vi : Volume des vides interstitiels,

Vmb : Volume brut de l'enrobé compacté.

I.3.1. Composants minéraux :

Les composants minéraux occupent environ 95% de la masse total d'un enrobé bitumineux (80-85% du volume) [1]. A cause de Cette importance quantitative des matériaux minéraux les caractéristiques mécaniques et les performances du mélange bitumineux dépendent des composants minéraux [2]

I.3.1.1. Les granulats

Les granulats sont un ensemble des grains dont la dimension varie entre 0 et 80mm.

3.1.1.1. Caractéristiques des granulats recherchés pour les enrobés :

Les caractéristiques des granulats utilisés dans les enrobés sont classés selon des divers critères.

Il existe trois catégories de caractéristiques géométriques, les caractéristiques intrinsèques et la caractéristique fabrication [3].

I.3.1.1.1. Granulométrie

La granularité :

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Elle conditionne la compacité de l'enrobé bitumineux ainsi que ses caractéristiques mécaniques [4].

L'essai qui permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat est l'essai d'analyse granulométrique.

La manipulation et les conditions de manipulation sont décrites par la norme

NF P 18-560.

Les enrobés bitumineux

Le but de l'essai est de séparer et classer à l'aide des tamis ces grains selon leur diamètre, est de tracer la courbe dite courbe granulométrique.

Une classe granulaire est caractérisée par la taille la plus petite **d** et du plus gros grain **D**

On distingue :

- Les granulats de type **0/D** dont la grosseur des grains est comprise entre 0 et D mm
- Les granulats constitués par une classe granulaire **d/D**

Selon la granularité l'on peut distinguer plusieurs types de composants minéraux destinés à la fabrication des mélanges bitumineux, comme représenté dans le TabI :1

Tableau I-2: Types de composants minéraux selon leur classe granulaire. [5]

<i>DESIGNATION</i>	<i>TYPE DE COMPOSANTS MINERAUX</i>	<i>EXEMPLES DE CLASSES GRANULAIRES UTILISEES DANS LE DOMAINE ROUTIER (MM) D/D</i>
<i>GRANULAT</i>	<i>PIERRES CONCASSEES, BALLAST, GRAVILLONS SABLE</i>	<i>0/2,0/4, 2/4, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22, >22</i>
<i>FILLER</i>	<i>FILLER, FINES ISSUS DE ROCHES</i>	<i>≤0.063 ; ≤0.080 OU ≤0.090</i>

I.3.1.1.1.2. Caractéristiques intrinsèques :

Les caractéristiques intrinsèques dépendent des propriétés de la roche, soit la dureté et la ténacité pour le gros granulat et la friabilité pour le granulat fin [3].

Pour la fabrication des granulats, il faut que les granulats obtenus respectent les critères de résistance aux différents types des charges et des sollicitations.

Résistance à la fragmentation (chocs) :

La méthode d'essai (Détermination de la résistance à l'abrasion au moyen de l'appareil Los Angeles selon la norme **NA 51-30**) .Permet d'obtenir la résistance à la fragmentation par chocs ainsi que l'usure provoquée par le frottement réciproque des granulats. Sur les routes, ces chocs peuvent être représentés par le compactage de l'enrobé ainsi que par le trafic pouvant entraîner une fragmentation par fatigue des granulats.

Résistance à l'attrition et à l'usure :

L'essai utilisé est le Micro Deval à sec ou en présence d'eau. Cette mesure ayant pour objectif de chiffrer l'usure qui se produit d'une part entre les gravillons

Les enrobés bitumineux

entre eux même dans une assise et d'autre part entre le pneumatique et le granulat à la surface des revêtements [4].

Pour les granulats fins, les critères sont la résistance à l'usure et à la friabilité. La méthode d'essai (Détermination du pourcentage d'usure par attrition du granulat fin au moyen de l'appareil Micro-Deval) qui permet d'obtenir la résistance à l'usure des granulats fins.

Un essai d'usure pour déterminer la résistance à la fragmentation et à l'écrasement du granulat est requis selon la méthode (Détermination du pourcentage de friabilité des granulats fins). Cet essai est également effectué à l'aide de l'appareil Micro-Deval.

Comparativement à l'essai, les charges abrasives de dimensions plus grosses et variées possèdent une action d'écrasement et de fragmentation sur les granulats fins et non une action d'usure [3].

I.3.1.1.1.3. Caractéristiques de fabrication :

Les caractéristiques de fabrication sont fonction du mode de production des granulats. Les particules peuvent avoir des formes angulaires, plates et allongées. Ces critères concernent le gros granulat seulement.

- Les caractéristiques granulométriques.
- Le coefficient d'aplatissement (A) ou la forme des gravillons.
- La propreté superficielle (P) [6].

I.3.2. Liants hydrocarbonés

Ce sont des substances constituées essentiellement d'assemblage d'atomes de carbone et d'hydrogène [7].qu'au contact de particules solides telles que les granulats, développent des forces d'adhésion et de cohésion, assurant de la sorte une certaine rigidité et une résistance à la déformation en traction. On distingue trois familles de liants hydrocarbonés : les liants naturels, les goudrons et les bitumes. De nos jours, on utilise principalement le bitume

I.3.2.1. Le bitume :

Est un matériau léger, ductile et souple doté de bonnes propriétés d'adhérence, de plasticité, d'élasticité. Il est insoluble dans l'eau et inerte à de nombreux agents chimiques [7].

3.2.1.1. Propriétés :

Le bitume est un matériau dont la souplesse d'emploi et les propriétés essentielles d'adhérence, de plasticité, d'élasticité, d'insolubilité dans l'eau et d'inertie à de nombreux agents chimiques lui ont valu un développement important en construction routière et industrielle. Il possède un grand pouvoir agglomérant car il adhère à la majorité des matériaux usuels : pierre, béton. Il se présente, à la température ambiante, sous l'aspect d'un liquide viscoélastique de couleur noire. Il est complètement liquide à chaud, à des températures supérieures à 80° C.

3.2.1.2. Fabrication :

Le bitume est issu du raffinage du pétrole. Il est obtenu par traitement de la fraction de distillation la plus lourde de bruts sélectionnés dits à bitume. Ce traitement est réalisé dans des unités spécifiques de la raffinerie, pour amener le produit aux spécifications officielles ou requises par les utilisateurs [8].

3.2.1.3. Composition chimique des bitumes et structure des bitumes

Le bitume est constitué de composés insolubles dans le n-heptane appelés «asphaltènes» (représentant jusqu'à 20% en masse pour les bitumes routiers), et de composés solubles dans le n-heptane appelés « maltènes ». [9]

- **les asphaltées** : 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. [10]
- **les maltènes**: regroupent trois espèces chimiques (saturés ,aromatiques et racines)
 - les Saturés : constitués d'hydrocarbures aliphatiques à chaînes linéaires ou ramifiées, comprenant en majeure partie des carbonés des hydrogènes, représentent 5 à 20 % en masse bitume ;
 - les Aromatiques, qui sont des composés naphthéniques aromatiques de faible masse moléculaire (300 à 2000 g/mole), constitués de chaînes carbonées non polaires où dominent les aromatiques mono et bi cycliques, représentent 40à 65% de la masse ;
 - les racines qui sont des composés naphthéno-aromatiques de masse moléculaire plus élevée (entre 500 et 50000 g/mole) de nature très

Les enrobés bitumineux

polaire avec des propriétés adhésives très fortes, représentent 10% à 20% de sa masse.

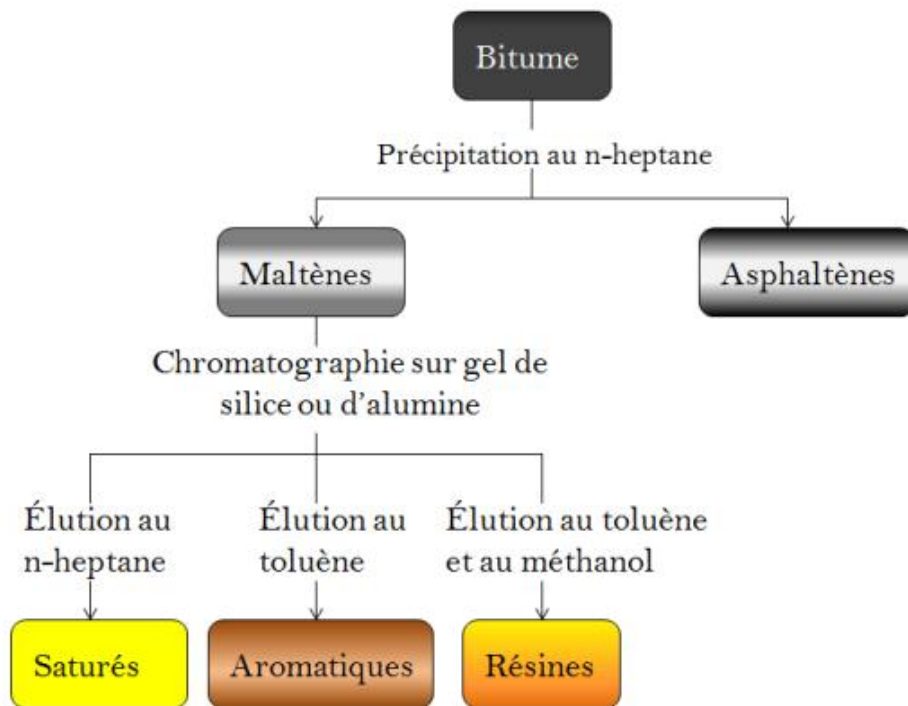


FIGURE I-3: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA SEPARATION CHIMIQUE DU BITUME. [11]

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 flocculés. 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 n'interagissent pas et on a une structure "sol" (visqueuse). La classe intermédiaire appelée "sol-gel" correspond aux bitumes intermédiaires [9].

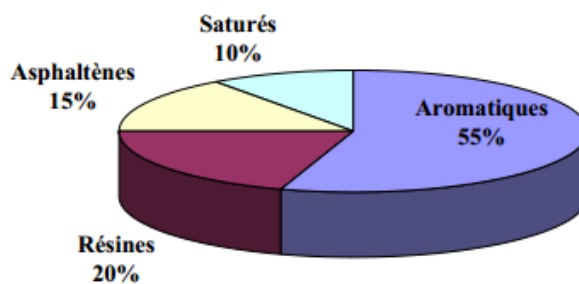


FIGURE I-4: EXEMPLE DE COMPOSITION CHIMIQUE D'UN BITUME. [9]

3.2.1.4. Principaux essais standards de caractérisation du bitume :

- L'essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF T66-804) qui consiste à mesurer en $10^{\text{ème}}$ de mm, l'enfoncement dans un échantillon de bitume à température donnée, d'une aiguille standard au bout d'un temps de 5 s. La valeur de pénétration est d'autant plus grande que le bitume est mou ;



FIGURE I-5: APPAREIL DE MESURE DE LA PENETRABILITE.

- le point de ramollissement bille-anneau (NF T66-804) qui consiste à déterminer la température, notée TBA, pour laquelle une bille d'acier normalisée traverse un échantillon de bitume maintenu dans un anneau métallique. Il caractérise la susceptibilité thermique du matériau : plus la température bille-anneau est faible, plus le bitume est susceptible ;

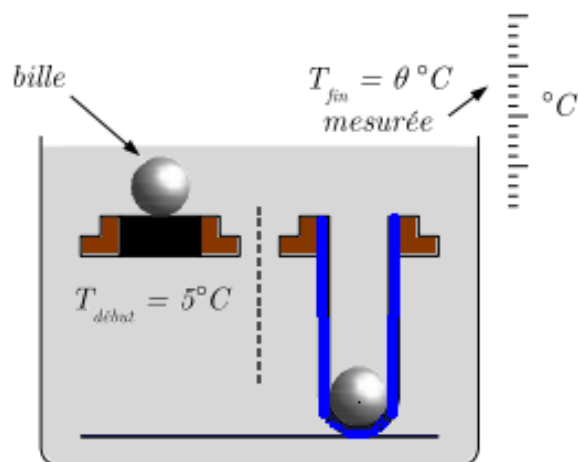


FIGURE I-6: SCHEMA DU TEST TEMPERATURE BILLA ANNEAU (TBA)

- **L'essai RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) (NF T66-032)**

Est employé pour caractériser le vieillissement des bitumes à l'enrobage. Pour cet essai, le bitume placé en film mince est régulièrement exposé à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé. Les propriétés habituelles du liant sont ensuite mesurées (pénétrabilité, température de ramollissement bille-anneau). Ces valeurs après RTFOT qui sont plus proches de celles du liant extrait de l'enrobé, sont comparées à celles obtenues auparavant.

- **le point de fragilité de FRAAS (NF T66-026)**

Qui correspond à la température à laquelle un film de bitume déposé sur une lamelle d'acier se fissure lorsque l'on plie cette lamelle à basse température. Il caractérise la fragilité du liant à basse température.

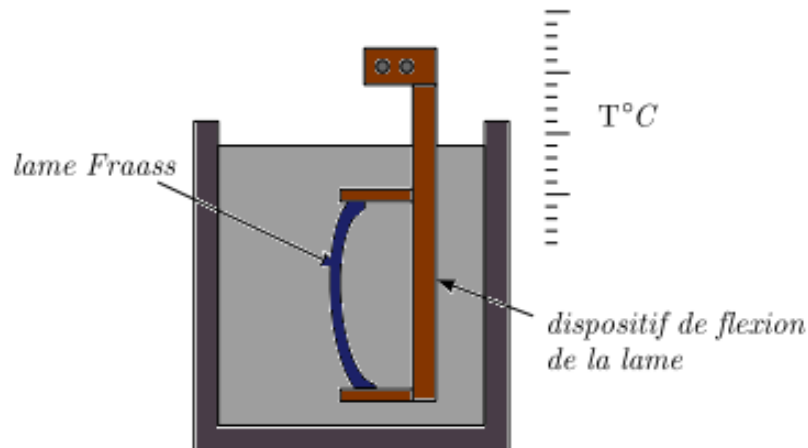


FIGURE I-7: SCHEMA DE L'ESSAI DE COMPORTEMENT A BASSE TEMPERATURE – FRAASS

Les valeurs obtenues lors de ces différents essais sont à la base des spécifications sur les bitumes.

Ceux-ci sont répartis en classes correspondant à une gamme donnée de valeurs de pénétrabilité à 25°C :

- 10/20 bitume dur (non normalisé) ;
- 20/30 bitume dur (normalisé) ;
- 35/50 et 50/70 bitumes semi-durs ;
- 70/100 et 180/220 bitumes mous. [12]

I.4. Formulation des enrobés bitumineux

Les matériaux bitumineux sont des mélanges en proportions bien définies, de composants minéraux, d'un liant bitumineux et d'éventuels additifs.

Dans le mélange bitumineux, le liant assure la cohésion entre les grains minéraux en les mouillant et les enrobant d'un film continu. Le squelette granulaire est l'ossature rigide du mélange.

La distribution de taille de différents agrégats donne la composition granulométrique du squelette granulaire qui peut être continue ou discontinue selon la destination du mélange et les propriétés visées.

Le but de cette formulation est de 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 minimisant des problèmes de fluage et d'orniérage trop prononcés à haute température. [11].

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

$$100 \Sigma = 0.17G + 0.33g + 2.3S + 12s + 135f$$

Avec :

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

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

S : pourcentage de gros sable ($\emptyset 0,3/6$)

s : pourcentage de sable fin ($\emptyset 0,08/0,3$)

f : pourcentage de filler ($\emptyset < 0,08$)

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

$$\Sigma = 2.5 + 1.3f$$

Les enrobés bitumineux

La teneur en liant optimale, fonction de la surface spécifique des granulats, est donnée par la formule expérimentale suivante : $P = \alpha k^5 \sqrt{\Sigma}$

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 les plus souples) [13].

I.5. Conclusion :

D'après ce qu'on a vu dans ce chapitre en conclure :

- Les enrobés bitumineux c'est des mélanges de deux composantes les granulats et les liant hydrocarbonée.
- Des essais pour la classification de ces composantes.
- En respect les teneurs en liants hydrocarbonée lors du mélange à l'aide des expressions expérimentales.

chapitre II : Notions d'élasticité et de visco-élasticité

II.1. Introduction :

La rhéologie des enrobés bitumineux, est définie comme l'étude des déformations et du fluage de la matière. La rhéologie explique le comportement des corps quand ils sont soumis à des contraintes. Les corps peuvent réagir de façon élastique, visqueuse ou entre les deux (qu'on appelle viscoélastique), dépendant du matériau, de la charge et de la vitesse de chargement (fréquence) [14].

II.2. Élasticité linéaire

Dans le cas d'un comportement élastique le solide soumis à une contrainte atteint un état d'équilibre, avec une réponse réversible indépendante du temps et proportionnelle à la contrainte imposée. sans dissipation d'énergie, l'énergie fournie pour déformer le matériau est totalement restituée au déchargement

II.3. Définition de la viscosité

La viscosité exprime la dépendance entre la vitesse de déformation d'un matériau et la contrainte à laquelle il est soumis. Elle caractérise la résistance d'un matériau à l'écoulement (mesure de son frottement interne). L'étude de la rhéologie d'un matériau consiste à analyser l'écoulement ou la déformation sous l'effet des contraintes appliquées et de leur évolution dans le temps [1].

La viscosité fait en sorte que la contrainte et la déformation sont déphasées. Soumis à une contrainte, les matériaux peuvent présenter deux types de comportements idéaux : comportement élastique ou comportement visqueux. Le plus souvent, on observera un comportement viscoélastique situé entre ces deux extrêmes

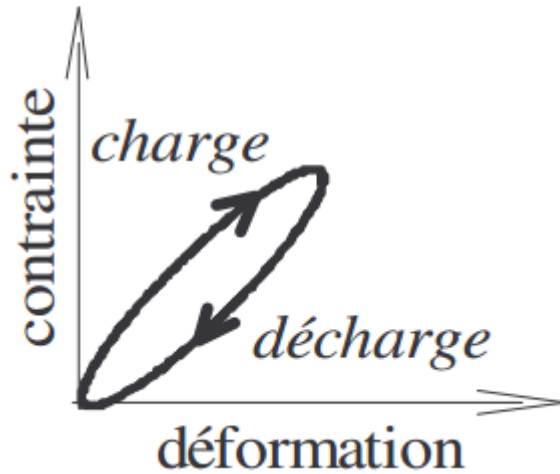


FIGURE II-1: COMPORTEMENT VISCOELASTIQUE

La viscosité du bitume peut être en fonction de la fraction volumique effective de solide (asphaltènes péptisés) et de la viscosité et de la phase maltène :

$$\eta = \eta_{0,m} \left(1 - \frac{\phi_{\text{eff}}}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m}$$

Avec : η est la viscosité du bitume, $\eta_{0,m}$ correspond à la viscosité des maltènes, ϕ_{eff} est la fraction volumique effective de solide, ϕ_m est la fraction d'empilement maximum et $[\eta]$ correspond à la viscosité intrinsèque [15].

II.4. Viscoélasticité linéaire

La viscoélasticité linéaire caractérise le comportement élastique et dissipatif d'un matériau en petites déformations [6].

Un matériau non vieillissant (dont les propriétés mécaniques restent inchangées si le matériau ne subit aucune sollicitation) est dit viscoélastique si l'effacement des contraintes est total lors d'une expérience d'effacement. Cette expérience illustrée figure II :2 ,consiste à appliquer un créneau de déformation à un matériau. Le matériau est viscoélastique si la contrainte à l'infini σ_{∞} est égale à 0

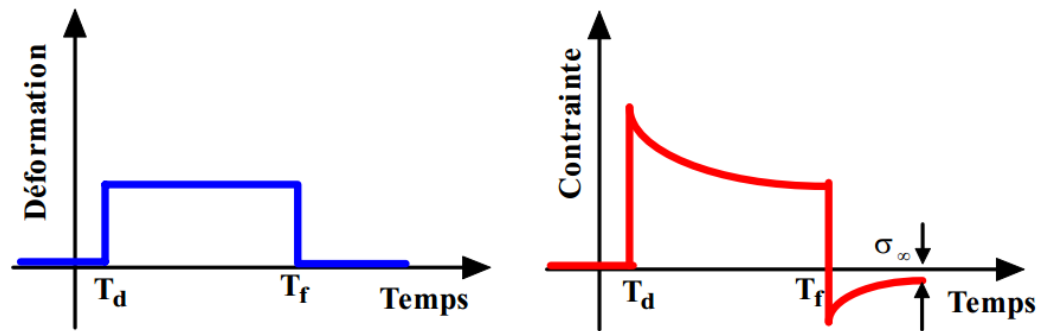


FIGURE II-3: EXPERIENCE D'EFFACEMENT : CRENEAU DE DEFORMATION ET REPOSE DU MATERIAU EN CONTRAINTE [2]

II.4.1. Mesure de la viscosité de l'enrobé

La viscosité d'un enrobé bitumineux n'est pas mesurable de manière directe, mais elle est souvent caractérisée par sa compactibilité ou sa maniabilité.

La mesure de la compactibilité (aptitude au compactage) la plus courante est effectuée avec la presse à cisaillement giratoire. L'évolution de la compacité peut être déterminée en fonction du nombre de girations appliquées. La compactibilité peut également être quantifiée par des compactages Marshall avec un nombre de coups variables.

L'évaluation de la maniabilité d'un enrobé peut être faite par différentes méthodes. Un premier indicateur qualitatif est fourni sur chantier par l'appréciation des ouvriers. Des appareils ou mesures ont été développés afin de caractériser la maniabilité. Le maniabilimètre Nynas, inspiré de la boîte de Casagrande, a pour but de caractériser l'aptitude au répandage de l'enrobé entre la phase de malaxage et la mise en œuvre sur chantier. Cet appareil développé initialement pour l'analyse des enrobés à froid permet d'évaluer la maniabilité ainsi que son évolution dans le temps. Le principe de l'essai consiste à mesurer la résistance à une sollicitation de cisaillement-poussée d'un matériau à la sortie de son malaxage. On considère l'effort maximum développé pour une vitesse de cisaillement constante de l'éprouvette. On appelle cet effort « force de cohésion ». Cette force est déterminée par un capteur, couplé au piston du vérin de poussée [1].

L'essai est destructif. La détermination de l'évolution de la force de cohésion en fonction du temps peut nécessiter une certaine masse de matériau, un essai demandant environ 12 kg d'enrobé. Le remplissage du moule est normalisé afin de simuler la chute du matériau, du malaxeur dans le camion.

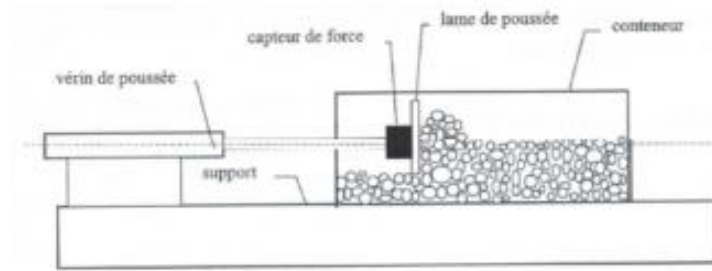


FIGURE II-4:MANIABILIMETRE NYNAS

Par exemple, si un matériau est soumis à des cycles de chargement et de déchargement, et que les déformations suivent des cycles qui sont en phase (0°) avec les cycles de chargement, alors le comportement est élastique. Au contraire, si les cycles sont complètement déphasés (90°) le comportement est dit parfaitement visqueux.

En réalité, tous les matériaux, et en particulier les enrobés, ont un comportement entre les deux. C'est-à-dire qu'ils présentent un angle de déphasage φ qui varie entre 0° et 90° ($0^\circ < \varphi < 90^\circ$) (fig II :5)

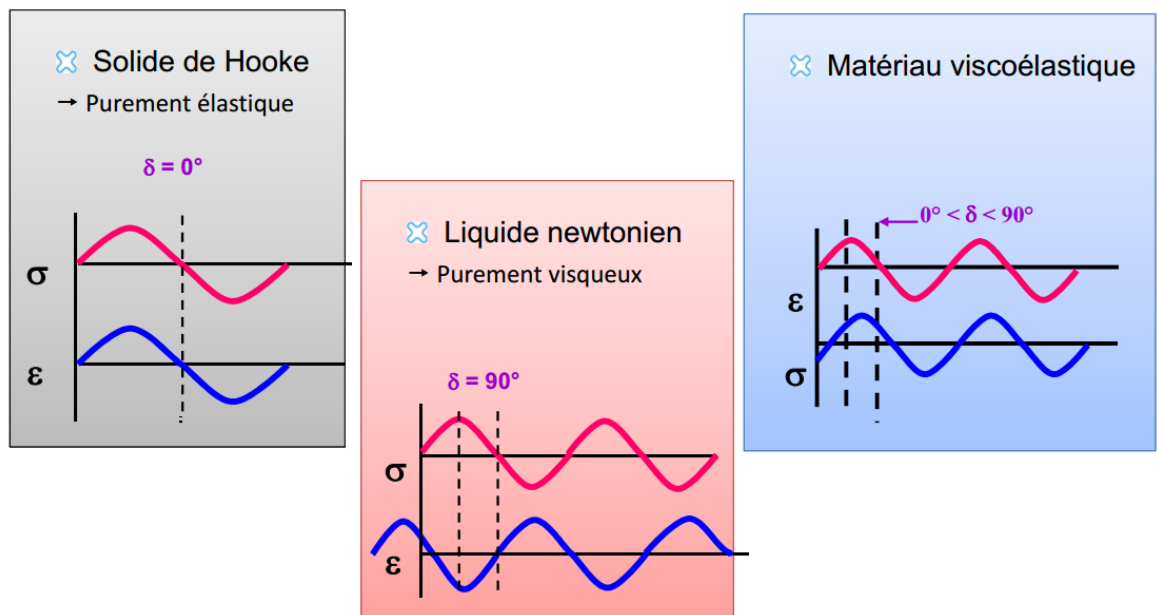


FIGURE II-5:PRINCIPE D'EVALUATION DU COMPORTEMENT FREQUENTIEL DES MATERIAUX

II.5. classes de comportement des bitumes purs en fonction de $|\epsilon|$ et t :

La Fig II :6 permet d'identifier simplement les principaux types de comportement des bitumes en fonction de l'amplitude de la déformation $|\epsilon|$ et de la température T , pour une vitesse de déformation fixée.

On y distingue :

Notions d'élasticité et de visco-élasticité

- 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 où 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 [13].

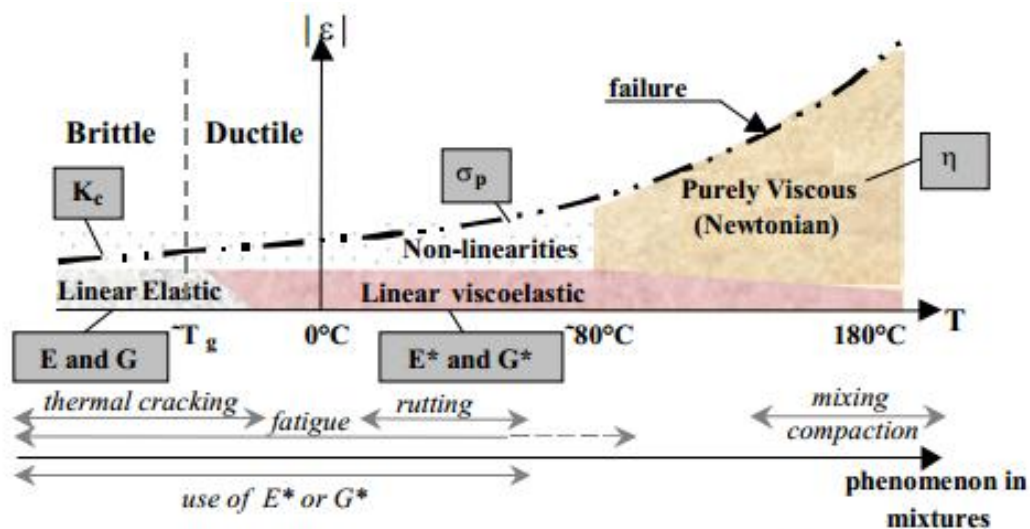


FIGURE II-7: CLASSES DE COMPORTEMENT DES BITUMES EN FONCTION DE $|\epsilon|$ ET T

On constate sur la Figure II:8 ,que pour des températures comprises entre la température de transition vitreuse T_g du bitume (généralement comprise entre -50°C et -10°C et environ 80°C , le comportement du bitume est viscoélastique linéaire.

II.6. Phénomène de la fatigue des enrobés bitumineux

Les enrobés quant à eux présentent quatre grandes classes de comportement Fig II :6

- Pour un faible nombre de chargements et des déformations de quelques certains pour cents, le comportement observé est fortement non linéaire.
- Pour des chargements de quelques centaines de cycles et des déformations faibles ($<10^{-4}$), le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire (VEL).

•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.

La Fig II :6 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, ...). Dans ces conditions, les quatre propriétés mécaniques importantes pour les enrobés sont :

- la rigidité ou le module (comportement viscoélastique linéaire : VEL),
- le comportement en fatigue,
- le comportement à l'orniérage (accumulation de déformations permanentes liée aux irréversibilités et aux non linéarités déjà existantes dans le domaine des faibles déformations),
- la fissuration et la propagation de fissure au sein de la structure de chaussée. En particulier, les phénomènes de fissuration liés aux variations de température (dilatation et/ou contraction thermique) constituent un aspect important qui introduit un couplage thermique/mécanique [16].
- les limites de linéarité de 10^{-4} et quelques 10^{-5} . La limite du comportement linéaire des enrobés correspond à des déformations proches de 10^{-4} et cette limite dépend peu du module complexe (donc de la température du matériau) à la différence des bitumes [16].

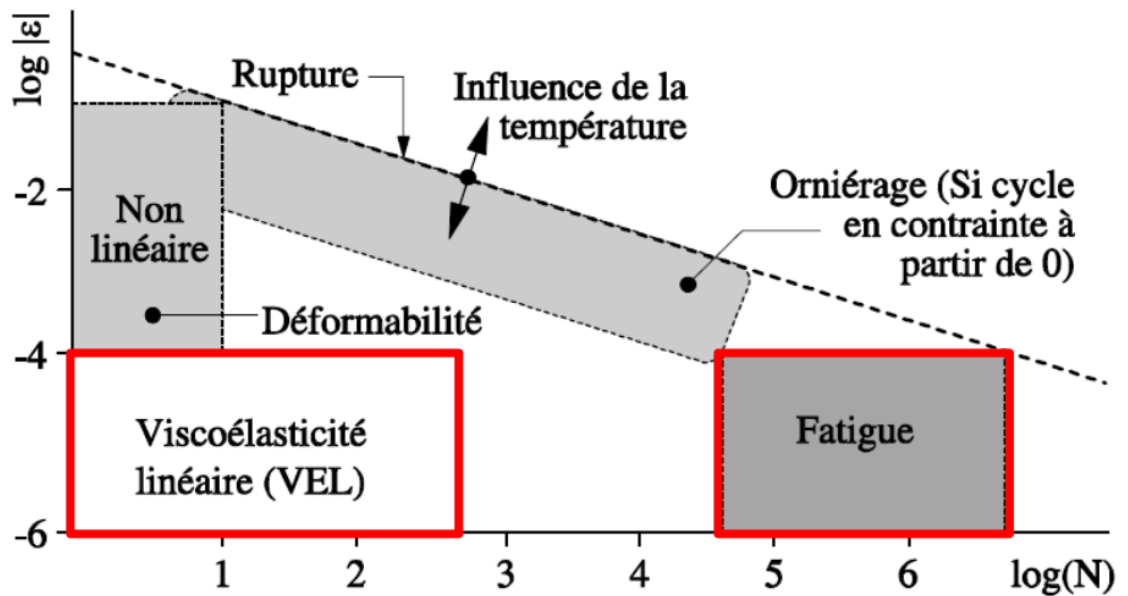


FIGURE II-9: COMPORTEMENTS "TYPES" DES ENROBES BITUMINEUX A TEMPERATURE FIXEE, (E) DEFORMATION - (N)

II.6.1. Hypothèse du comportement en petites déformations

L'enrobé bitumineux hérite des caractéristiques viscoélastiques du liant qu'il contient.

Ses propriétés mécaniques dépendent de la durée de sollicitation (ou de sa fréquence) et de la température. Ils entrent dans la catégorie des matériaux viscoélastiques et thermoplastiques [17].

Dans la littérature, les matériaux bitumineux sont généralement considérés comme étant homogènes, isotropes, viscoélastiques, linéaires et thermo susceptibles [18]

II.6.1.1. Milieux continus :

Bien que leur structure composite grenue confère aux enrobés bitumineux un caractère hétérogène, on peut faire l'hypothèse de milieu continu à l'échelle d'une couche de chaussée (sauf dans le cas de couches très minces). Pour les éprouvettes de laboratoire, on considère généralement qu'un rapport de 5 entre la taille du plus gros granulat et celle de l'éprouvette est au moins nécessaire pour considérer cette hypothèse de milieu continu.

II.6.1.2. Isotropie :

Le mode de mise en œuvre de l'enrobé sur chaussées (répandage du matériau foisonné par couche et compactage par passage successif de compacteurs à la surface) confère au

matériau une certaine anisotropie (gradient de densité dans le sens de l'épaisseur de la couche, orientation privilégiée des grains par le compactage).

De la même façon, les éprouvettes fabriquées en laboratoire présentent ce type de propriétés. Des mesures du module en traction - compression réalisées sur des échantillons cylindriques prélevés suivant trois axes de carottage dans des plaques d'enrobé fabriquées en laboratoire [19], ont montré des variations pouvant atteindre 20%.

Pour minimiser ces effets, on réalise souvent les essais sur des échantillons prélevés au cœur du matériau. Dans les calculs de dimensionnement routier, on fait l'hypothèse d'isotropie du matériau.

II.6.1.3. *Viscoélasticité et linéarité :*

L'enrobé bitumineux hérite des caractéristiques viscoélastiques du liant qu'il contient. C'est un matériau viscoélastique thermosensible (ou thermosusceptible) [2]. L'hypothèse de comportement viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux est utilisée pour décrire de façon fine la réponse temporelle de ces matériaux. On l'utilise, par exemple, pour retrouver par le calcul l'allure des signaux de déformations transversales ou longitudinales mesurées à la base des couches bitumineuses au passage des charges roulantes [12], ou lorsque que l'on veut évaluer la dissipation visqueuse liée à l'accumulation des sollicitations.

L'hypothèse de comportement viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux est utilisée pour décrire de façon fine la réponse temporelle de ces matériaux. On l'utilise, par exemple, pour retrouver par le calcul l'allure des signaux de déformations transversales ou longitudinales mesurées à la base des couches bitumineuses au passage des charges roulantes [20], où lorsque l'on veut évaluer la dissipation visqueuse liée à l'accumulation des sollicitations. Dans certains cas, on se contente de l'hypothèse d'élasticité linéaire pour décrire le comportement du matériau.

II.6.1.4. *Influence de la température :*

Comme le liant qui entre dans sa composition, l'enrobé bitumineux est thermosusceptible, c'est à dire que ses propriétés dépendent fortement de sa température. A basse température, l'enrobé possède sous sollicitation usuelle (trafic routier) une rigidité élevée et il peut se montrer fragile du fait de la fragilité du liant à basse température. A température élevée, il présente un module faible et une déformabilité importante [2].

II.7. Conclusion :

Une classification des matériaux :

- Matériau non visqueux élastiques : est un matériau dont la réponse est indépendante de la vitesse de sollicitation.
- Matériau visqueux : est un matériau dont la réponse est dépendante de la vitesse de sollicitation.

La viscoélasticité linéaire caractérise le comportement élastique et dissipatif d'un matériau en petites déformations.

chapitre III : Ecriture des lois de comportement élastique visco-élastique et thermo-visco-élastique

III.1. Les lois de comportement élastique :

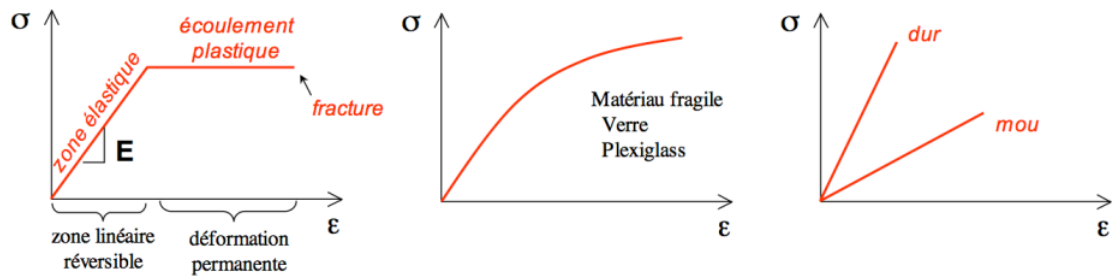


FIGURE III-1: EXEMPLES TYPIQUES DE COMPORTEMENTS D'UN SOLIDE DEFORMABLE SOUS CONTRAINTE.

Voir les exemples typiques sur la Fig III :2 :

On travaille dans la zone linéaire, quel que soit le matériau.

- Dans cette zone, la déformation est réversible : quand on relâche la contrainte, les substances retrouvent leur taille et leur forme initiales (cela n'est plus vrai quand on dépasse la limite élastique, i. e. quand on sort du régime linéaire).
- Matériau purement élastique : retour instantané quand on lâche la contrainte. S'il existe une viscosité, le système met un certain temps pour revenir à son état initial (comportement visco-élastique).

Elasticité linéaire : cas d'une contrainte normale uniaxiale

III.1.1.Loi de Hooke

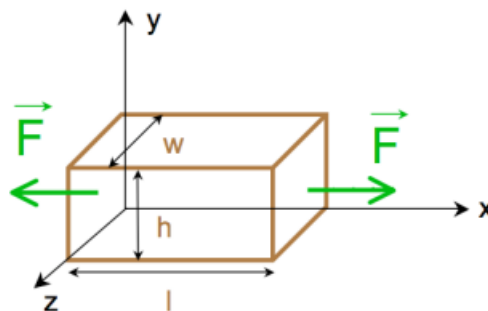


FIGURE III-3: LE MATERIAU PARALLELEPIPEDIQUE EST SOUMIS A UNE FORCE DE TRACTION DANS OX

REFERENTIEL (OX ; OY ; OZ)

Loi de Hooke dans le cas d'une contrainte normale :

$$\mathbf{B} = \mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon}$$

$\boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{l} - \mathbf{l}_0)/\mathbf{l}_0$ = allongement relatif ou déformation, Algébrique : possède un signe (cf traction/ compression).

\mathbf{B} = **contrainte**, Algébrique : possède un signe (cf traction/ compression).

\mathbf{E} = **module d'Young**, caractéristique du matériau.

Contraction transverse

Il y a une contrepartie à cet allongement : quand on étire un matériau dans une traction, il se contracte dans le plan perpendiculaire à l'étirement

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \Delta l / l ; \Delta w / w = \Delta h / h = -\nu \Delta l / l$$

ν = **Coefficient de poisson** ; $-1 \leq \nu \leq 0.5$

III.1.1.1. Déformation sous contrainte uniforme :

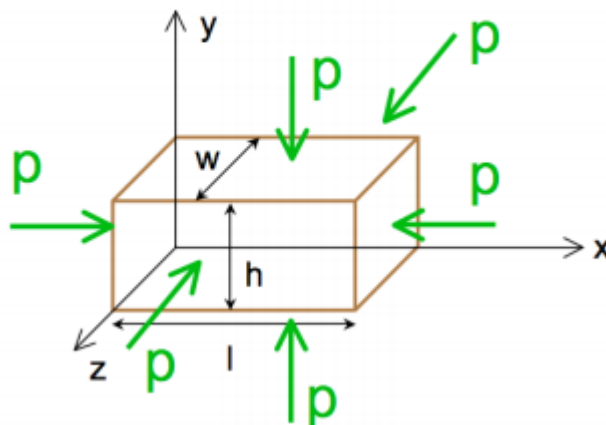


FIGURE III-4: LE MATERIAU EST SOUMIS A UNE CONTRAINTE UNIFORME P SUR TOUTES SES FACES :

Un matériau de forme parallélépipédique soumis à une pression uniforme P_0 . On soumet ce matériau à une augmentation de pression p FigIII :3, On cherche à décrire la déformation du matériau [21].

Les contraintes sur chaque paire de face sont identiques : $\bar{\sigma} = p$.

La loi de Hooke dans le cas d'une contrainte normale (dans la limite des petites déformations) :

$\Delta l_x/l_x = -p/E$ (variation relative de l due à la contrainte sur les faces perpendiculaire à x)

$\Delta l_y/l_y = +\nu p/E$ (variation relative de l due à la contrainte sur les faces perpendiculaire à y)

$\Delta l_z/l_z = +\nu p/E$ (variation relative de l due à la contrainte sur les faces perpendiculaire à z)

Soit :

$$\Delta l_x/l_x = \Delta l_x/l_x + \Delta l_y/l_y + \Delta l_z/l_z = -(1-2\nu) p/E$$

De même pour les 2 autres faces :

$$\Delta l_w/l_w = -(1-2\nu) p/E$$

$$\Delta l_h/l_h = -(1-2\nu) p/E$$

La variation relative de volume est donc (toujours dans la limite de la petite déformation) :

$$\Delta V/V = \Delta l_x/l_x + \Delta l_y/l_y + \Delta l_z/l_z = -3(1-2\nu) p/E$$

Que l'on réécrit : $P = -K \Delta V/V$

K : module de compression uniforme

$$K = 3(1-2\nu)/E ; K \text{ est fonction de } E, \nu. [21]$$

III.2. Les lois de comportement viscoélastique :

L'hypothèse d'un comportement viscoélastique linéaire se traduit par le fait que la réponse d'un matériau à une sollicitation composée d'une somme de sollicitations élémentaires est la somme des réponses à chacune de ces sollicitations élémentaires. On dit alors que le comportement du matériau obéit au principe de superposition de Boltzmann illustré dans le (Tab III :1)

Tableau III-2: Principe de superposition de Boltzmann

<i>SOLLICITATION</i>	<i>REPONSE</i>
$\mathcal{E}_1(T)$	$B_1(T)$
$\mathcal{E}_1(T)$	$B_1(T)$
$\lambda \mathcal{E}_1(T) + \mu \mathcal{E}_1(T)$	$\lambda B_1(T) + \mu B_1(T)$

III.2.1. Sollicitation en contrainte - Fonction de fluage (ou de retard)

Le fluage est l'accroissement de la déformation d'un matériau en fonction du temps sous l'action d'une sollicitation à contrainte constante. On détermine la fonction du fluage

d'un matériau viscoélastique en imposant, à température constante, une contrainte σ_0 à partir d'un instant t_0 (Fig III 5), la sollicitation en contrainte est notée :

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t - t_0)$$

Où H est la fonction de Heaviside :

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

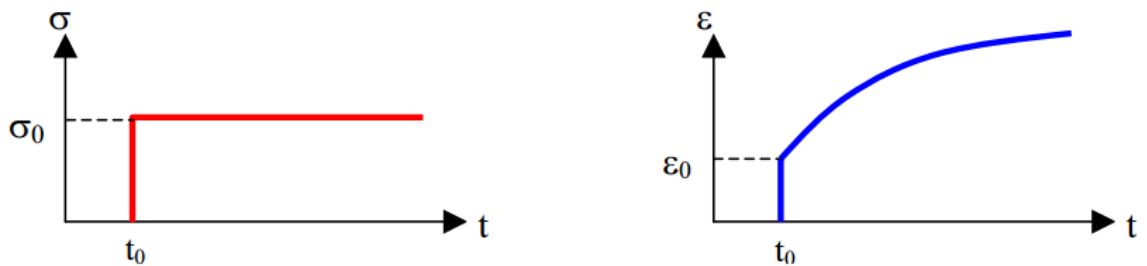


FIGURE III-6: ESSAI DE FLUAGE D'UN MATERIAU VISCOELASTIQUE LINEAIRE

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

Pour un matériau viscoélastique linéaire, la réponse en déformation est alors :

$$\text{Pour } t - t_0 < 0, \varepsilon(t) = 0$$

$$\text{Pour } t - t_0 \geq 0, \varepsilon(t) = \sigma_0 F(t_0, t)$$

Où $F(t_0, t)$ est la fonction de fluage ou de retard (fonction croissante dans le temps) [6].

Pour une contrainte qui varie dans le temps (Fig III :5) on utilise la notation incrémentale. A l'instant t , la réponse à l'incrément de contrainte $d\sigma$ effectué à l'instant τ vaut : $d\varepsilon(t) = d\sigma F(\tau, t)$

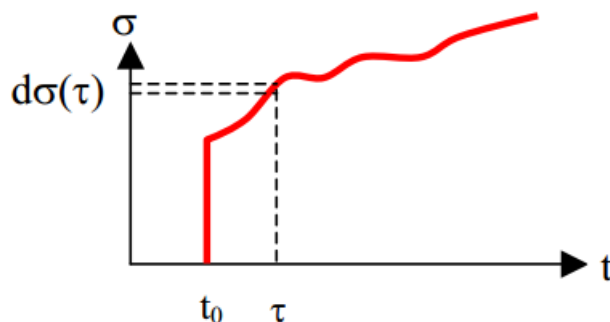


FIGURE III-7: SOLLICITATION A CONTRAINTE VARIABLE DANS LE TEMPS

En appliquant le principe de superposition de Boltzmann (cas des matériaux viscoélastiques linéaires), pour un matériau non vieillissant, la déformation $\varepsilon(t)$ est calculée selon l'équation :

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t F(\tau, t) d\sigma_\tau$$

Lorsque σ est dérivable, sauf en 0 : $d\sigma_\tau = \dot{\sigma} d\tau$

Pour un solide, la fonction de fluage tend vers une limite finie lorsque $t \rightarrow \infty$. Pour un liquide, elle croît sans limite. [2]

III.2.2. Sollicitation en déformation - 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 (Fig III :6)

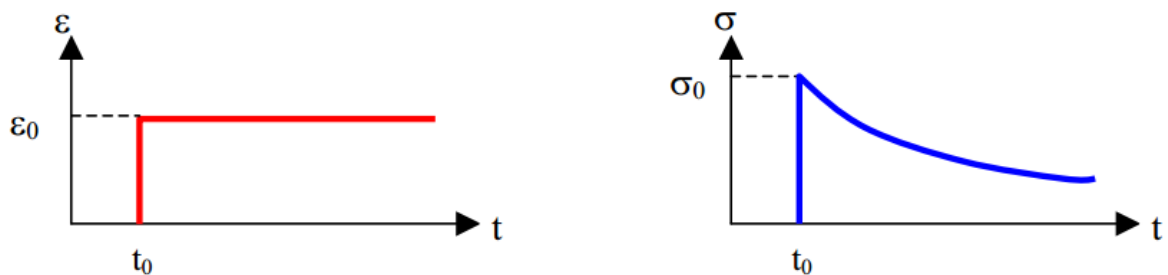


FIGURE III-8: ESSAI DE RELAXATION D'UN MATERIAU VISCOELASTIQUE LINEAIRE

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

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t - t_0)$$

La réponse en contrainte est alors :

$$\text{Pour } t - t_0 < 0, \sigma(t) = 0$$

$$\text{Pour } t - t_0 \geq 0, \sigma(t) = \varepsilon_0 R(t_0, t)$$

Où $R(t_0, t)$ est la fonction de relaxation (fonction décroissante selon le temps). Pour un matériau non vieillissant et une déformation qui varie dans le temps, à température constante, la contrainte peut s'écrire :

$$\sigma(t) = \int_{t_0}^t R(\tau, t) d\varepsilon_\tau$$

Lorsque ε est dérivable, sauf en 0 : $d\varepsilon_\tau = \dot{\varepsilon} d\tau$ [6]

III.3. Les lois de comportement thermo-visco-élastique

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 thermo-mécanique est par exemple à l'origine des problèmes de fissuration observés à basse température sur les chaussées.

Ecriture des lois de comportement élastique visco-élastique et thermo-visco-élastique

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 (Fig III :9). 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°C/h).

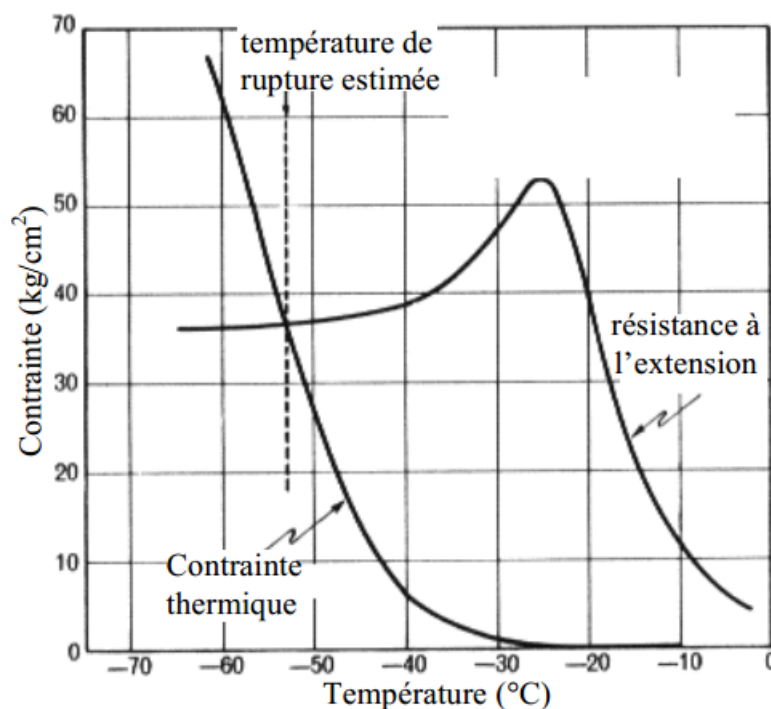


FIGURE III-10: METHODE D'ESTIMATION DE LA CONTRAINTE DE RUPTURE THERMIQUE

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

$$\epsilon^{\text{totale}} = \epsilon^{\text{mécanique}} + \epsilon^{\text{thermique}}$$

Etant donné que le retrait est empêché :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{totale}}=0$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{mécanique}} = - \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{thermique}} = - \alpha \Delta T$$

avec α le coefficient de dilatation/contraction thermique moyen de l'enrobé ($\alpha \approx 30 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$) [16].

III.4. Conclusion :

Chaque domaine de comportement on écrit les lois de comportement :

- Domaine élastique : on a la loi de Hook ou on exprime la relation entre les contraintes et les déformations.
- Domaine viscoélastique : on a vu les fonctions du fluage et de la relaxation

Comme les enrobés bitumineux sont sensibles à la température on présente des lois de comportement thermo-visco-élastique .

chapitre IV : Les essais de module complexe

IV.1. Introduction :

Le module de rigidité est un indicateur du degré de cohésion au sein de la structure d'un matériau. La plupart des matériaux de construction se caractérisent par un module d'élasticité permettant une bonne appréciation de leur comportement mécanique. Dans le cas d'un enrobé bitumineux, ce comportement est fort lié à la température et la fréquence de chargement, du fait de la rhéologie du liant hydrocarboné. L'étude des propriétés de l'enrobé conduit à introduire la notion de module complexe qui se traduit par la norme du module complexe (c.à.d. le module de rigidité) et l'angle de phase. Plusieurs méthodes normatives existantes pour déterminer le module des enrobés bitumineux. L'essai de module en traction directe et essai de module complexe en flexion sur éprouvettes trapézoïdales sont parmi les méthodes les plus utilisées. On décrit en détails ces deux méthodes d'essais.

IV.2. Module de l'enrobé

Pour caractériser les enrobés bitumineux on définit Trois modules qui sont : Le module complexe E^* , le module sécant S_{met} le module résilient E_{res} qui correspondent à trois types de chargement quasi-statiques (accélération nulle ou négligeable) [1].

IV.3. Définition du module complexe

La mesure du module complexe, E^* , est réalisée pour des sollicitations sinusoïdales de fréquences variées. Pour ce faire, on utilise un signal de chargement sinusoïdal de fréquence f et de pulsation $\omega=2\pi f$, dans le domaine des petites déformations. Dans ces conditions l'enrobé se comporte principalement de façon viscoélastique linéaire, si bien que la réponse du matériau à la sollicitation sinusoïdale est sinusoïdale [12]

Physiquement, le module complexe E^* représente en module ($|E^*|$) le rapport des amplitudes de la contrainte sinusoïdale de pulsation ω appliquée au matériau :

$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$ et de l'amplitude de la déformation sinusoïdale correspondante (ou réciproquement), compte tenu du caractère viscoélastique du matériau, la déformation accuse

Les essais de module complexe

un retard sur la contrainte, se traduisant par un angle de déphasage (φ) entre les deux signaux : $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$ [13].

IV.3.1. Module de rigidité :

Le passage par une écriture complexe permet alors d'utiliser une écriture simple entre la contrainte et la déformation uni axiales et de définir le module complexe E^* en utilisant l'écriture suivante :

$$\mathbf{B}(t) = \text{Im} [\mathbf{B}^*(t)] \quad \text{avec : } \mathbf{B}^*(t) = \mathbf{b}_0 e^{i\omega t}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \text{Im} [\boldsymbol{\varepsilon}^*(t)] \quad \text{avec : } \boldsymbol{\varepsilon}^*(t) = \boldsymbol{\varepsilon}_0 e^{i(\omega t - \varphi)}$$

$$\mathbf{E}^*(t) = \frac{\mathbf{b}_0}{\boldsymbol{\varepsilon}_0 e^{-i\varphi}} = |\mathbf{E}^*| e^{i\varphi}$$

$$|\mathbf{E}^*| = \frac{\mathbf{b}_0}{\boldsymbol{\varepsilon}_0}$$

$|\mathbf{E}^*|$: appelé module de rigidité. Sa valeur est utilisée dans le dimensionnement des chaussées.

φ : appelé angle de déphasage du matériau (il permet l'estimation de l'énergie dissipée dans la matière). φ est compris entre 0 et $\pi/2$. Il caractérise le comportement visqueux du matériau. Sa valeur donne une idée sur la prédominance élastique ou visqueuse du comportement. Pour un matériau parfaitement élastique, φ est nul, et le module devient un nombre réel.

Le rapport des deux modules est égal à la tangente de l'angle de perte (déphasage) proportionnel au rapport de l'énergie dissipée à l'énergie totale stockée pendant le cycle

$$\varphi(\omega, t) = \text{Arctan} \left(\frac{E_2}{E_1} \right)$$

L'analyse du module complexe se fait aussi au travers de l'analyse de sa partie réelle (la partie élastique) et de sa partie imaginaire (la partie visqueuse) en utilisant l'écriture suivante :

$$E^* = E_1 + i E_2$$

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

E_1 : est appelé module d'élasticité dynamique : partie réelle du module le terme « dynamique » utilisé de façon impropre puisque aucun effet d'inertie à l'échantillon n'est pris en compte (pas de propagation d'onde dans le matériau) , compte tenu des fréquences de

Les essais de module complexe

chargement et de la taille des échantillons on vérifie qu'aucune onde ne se propage dans le matériau lors des essais de module complexe [5].

E2 : est appelé module de perte : partie imaginaire du module, représente le module de perte qui traduit la viscosité (module irréversible). Il quantifie l'énergie dissipée par frottement interne sous l'effet d'une sollicitation. Cette énergie dissipée se transforme en chaleur [11].

IV.4. types d'essais et des chargements pour la mesure de module complexe :

Pour mesurer le module complexe d'un matériau à un comportement viscoélastique, il faut prendre en considération les types d'essais utilisés, les types de chargement en fonction du temps.

IV.4.1. Types d'essais :

IV.4.1.1. *Selon l'état de contrainte et de déformation :*

Les essais appliqués aux enrobés bitumineux peuvent être distingués, suivant deux catégories principales : Les essais homogènes et les essais non-homogènes [18].

- Les essais homogènes :

L'état de contrainte et de déformation est le même en chaque point de l'éprouvette, donne directement accès aux contraintes et déformations, et par conséquent à la loi de comportement [22].

Leur analyse permet d'identifier de façon simple les paramètres de loi de comportement et les limites du domaine linéaire. Parmi ces essais, on peut citer :

- L'essai triaxial ;
- L'essai de compression (traction) simple sur cylindre
- Quelques essais de cisaillement

- Les essais non homogènes :

Il faut postuler une loi de comportement à priori (viscoélastique linéaire) et prendre en compte la structure de l'éprouvette (la géométrie de l'éprouvette) pour obtenir après des calculs qui sont plus compliqués, les paramètres de la loi de comportement (le module complexe par exemple).

Ils peuvent être utilisés dans le cadre d'un comportement du matériau simple de type viscoélasticité linéaire isotrope [18] [22].

Parmi ces essais, on peut citer :

Les essais de module complexe

Les essais de flexion :

- deux points
- trois points
- quatre points

les essais homogènes sont les plus appropriés pour décrire un comportement viscoélastique linéaire : en effet, les paramètres du comportement ainsi que les limites du domaine linéaire sont plus facilement déterminables. Par contre, en note que dans le domaine viscoélastique linéaire, les résultats obtenus avec les essais non homogènes donnent des résultats acceptables [22].

De manière générale, pour tous les essais, à partir des valeurs de force \mathbf{F} et déplacement \mathbf{D} appliquées aux bornes de l'éprouvette et du déphasage φ entre les deux signaux on détermine le module complexe de l'enrobés bitumineux à l'aide de deux facteurs :

Un facteur de forme Υ , dépend des dimensions de l'éprouvette ;

Un facteur de masse μ , pour les essais non homogènes prenant en considération les effets d'inertie liés à la masse \mathbf{M} de l'éprouvette en mouvement et à la masse \mathbf{m} des accessoires mobiles (casque de fixation, liaison éprouvette-organe moteur etc.)

Les parties réelles et imaginaires du module complexe sont données par les relations suivantes :

$$E1 = \gamma \left(\frac{F}{D} \cos \varphi + \mu \omega \right)$$

$$E2 = \gamma \left(\frac{F}{D} \sin \varphi \right)$$

Où ω est la pulsation

IV.5. Type des sollicitations :

Les principales sollicitations externes imposées sur les enrobés bitumineux sont les chargements mécaniques dus aux trafics et les sollicitations climatiques. Sous ces sollicitations, des phénomènes complexes, couplant mécanique, thermique, physique et chimie se produisent

Les essais de module complexe

IV.5.1. Effet du trafic

L'effet du trafic est issu du passage des véhicules qui imposent un chargement sur la surface de la chaussée sous forme de chargements surfaciques répétés. Les amplitudes de chargement sont faibles, produisant des déformations de l'ordre de 10^{-4} .

Le calcul des efforts et des déformations, si effectuée par un modèle multicouche élastique linéaire isotrope, donne une bonne approximation des modes de fonctionnement de chaque couche suivant sa position en profondeur dans la structure (Fig IV :1) [7]

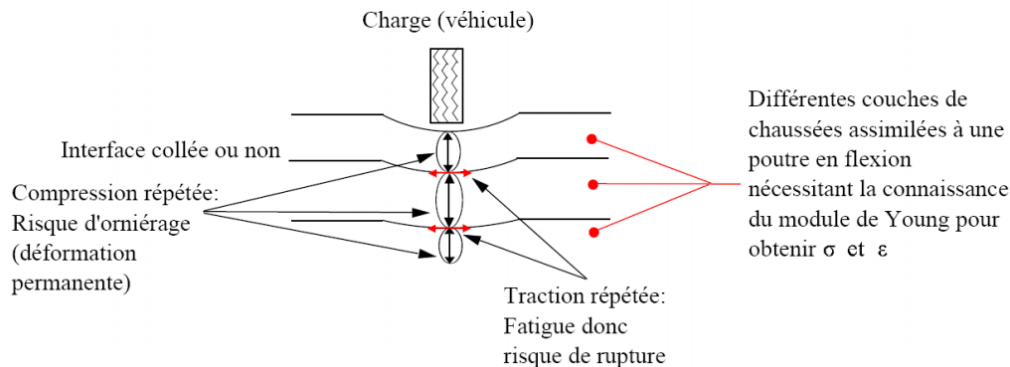


FIGURE IV-2: SOLLICITATIONS INDUITES PAR LE TRAFIC

Sous les sollicitations cycliques du trafic, la base des couches structurales subit une traction répétée qui peut créer des micros dégradations et entraîner la ruine des couches. Ce phénomène de fatigue peut entraîner des fissures au travers de la chaussée. Dans le même temps, la partie supérieure de chaque couche est soumise aux efforts de compression répétée qui peuvent entraîner des déformations permanentes induisant un orniérage à la surface de la chaussée.

IV.5.2. Effet de la température :

Outre les chargements mécaniques, les chaussées subissent des chargements consécutifs aux variations de la température. À température basse, l'enrobé possède sous sollicitation usuelle (trafic routier) une rigidité élevée, à température élevée, il présente un module faible et une déformabilité importante. La température a deux effets mécaniques principaux :

Un changement de la rigidité (module) du matériau. Un enrobé bitumineux devient mou avec l'augmentation de la température, à température basse, l'enrobé possède sous sollicitation usuelle (trafic routier) une rigidité élevée, à température élevée, il présente un module faible et une déformabilité

Les essais de module complexe

La création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison de dilatation thermique lors des changements de température, lorsque des températures très basses sont appliquées, des fissures peuvent apparaître et se propager avec les cycles thermiques. (Journaliers ou autres) (Fig IV :2) [5].

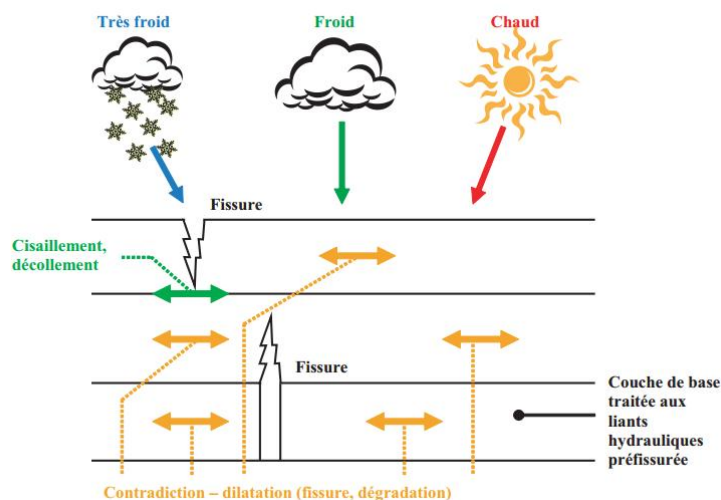


FIGURE IV-3: SOLLICITATIONS INDUITES PAR LA TEMPERATURE

IV.6. Types de chargement :

Pour la description du comportement viscoélastique linéaire d'un matériau peut être effectué en utilisant plusieurs types de signaux de chargement en fonction du temps.

Les trois principaux types de chargement appliqués lors des essais sur les matériaux bitumineux sont :

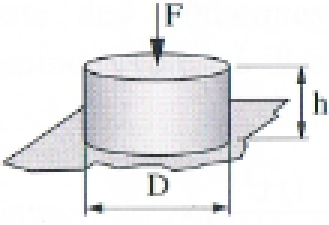
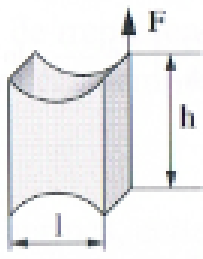
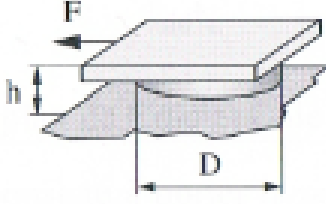
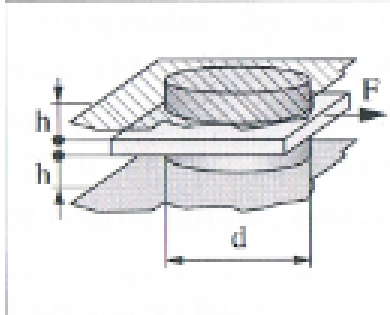
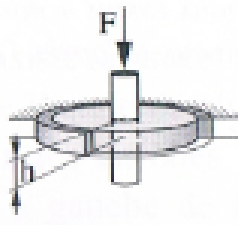
- Chargement quasi statique analysé en introduisant le temps (module temporel)
- Chargement sinusoïdal analysé en introduisant la fréquence (la pulsation). Le module complexe (E^*) est obtenue à partir de ce type d'essais

Les composantes du module complexe varient avec la fréquence et également avec la température. Ces deux paramètres sont donc fixés pour chaque mesure élémentaire. Les fréquences et les températures habituellement testées dépendent des capacités de l'appareillage d'essai et des matériaux testés. Elles varient entre 1 et 40 Hz pour la fréquence et -10°C et 40°C pour la température [5].

Les deux tableaux suivants regroupent les différents essais existants.

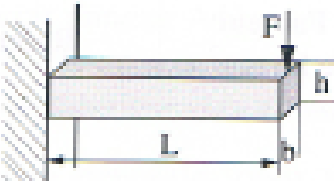
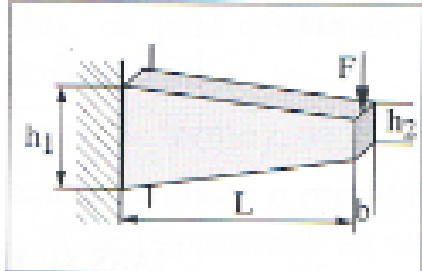
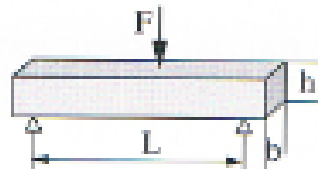
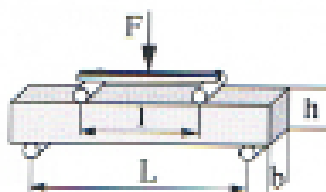
Les essais de module complexe

Tableau IV-1: Les principaux essais homogènes de module complexe existant sur les enrobés bitumineux [23]

	SCHEMA DE PRINCIPE	FACTEUR DE FORME γ
TRACTION (COMPRESSION) AVEC OU SANS CONFINEMENT		$\frac{4h}{\pi D^2}$
ESSAI DE SCISSION LCPC		$\frac{l}{he}$
ESSAI DE CISAILLEMENT A HAUTEUR CONSTANTE		$\frac{4h}{\pi D^2}$
SHEARING TEST MACHINE		$\frac{4h}{\pi D^2}$
CO-AXIAL SHEAR TEST		$\frac{\ln(\frac{d}{D})}{2\pi h}$

Les essais de module complexe

Tableau IV-2: Les principaux essais non homogènes de module complexe existant sur les enrobés bitumineux [23]

	SCHEMA DE PRINCIPE	FACTEUR DE FORME γ	FACTEUR DE FORME μ
FLEXION 2 POINTS		$\frac{4L^3}{bh^3}$	$\frac{M}{4} + M$
		$\frac{12L^3}{b(h_1-h_2)}$ $[(2-\frac{h_2}{2h_1})\frac{h_2}{h_1}-(3/2)-LN(H_2/H_1)]$	$0.135M+M$
FLEXION 3 POINTS		$\frac{24L^3}{\pi^4bh^3}$	$0.5M+M$
FLEXION 4 POINTS		$\frac{2L^3 - 3Ll^2 + l^3}{8bh^3}$	$0.5M+M$

Les essais de module complexe

IV.7. Essais de caractérisation :

IV.7.1. Essais non homogènes :

Essai deux point flexion :

IV.7.1.1. Préparation des éprouvettes :

Les enrobés sont fabriqués dans le malaxeur (Fig IV :3(a)) et compactés sous forme de plaques dans le compacteur de plaques représenté sur la (Fig IV :3(b)) Les dimensions des plaques sont : 600x400x120 mm³.

Le compactage est réalisé suivant la norme **NF EN 12697- 33+A1** portant sur la méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, partie **33** : Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque. Les plaques d'enrobés obtenues sont ensuite sciées pour produire des éprouvettes trapézoïdales. Ces éprouvettes trapézoïdales ont une grande base de **50 mm**, une petite base de **25 mm**, une hauteur de **250 mm** et une épaisseur de **25 mm**.

Ces dimensions d'échantillon permettent de considérer les éprouvettes d'enrobés comme des milieux continus et homogènes.



(a) : Malaxeur



(b) : Compacteur de plaques

FIGURE IV-4: MATERIELS DE LABORATOIRE POUR LA FABRICATION ET POUR LE COMPACTAGE D'ENROBES [11]

IV.7.1.2. Réalisation d'un essai de module complexe essai deux point flexion :

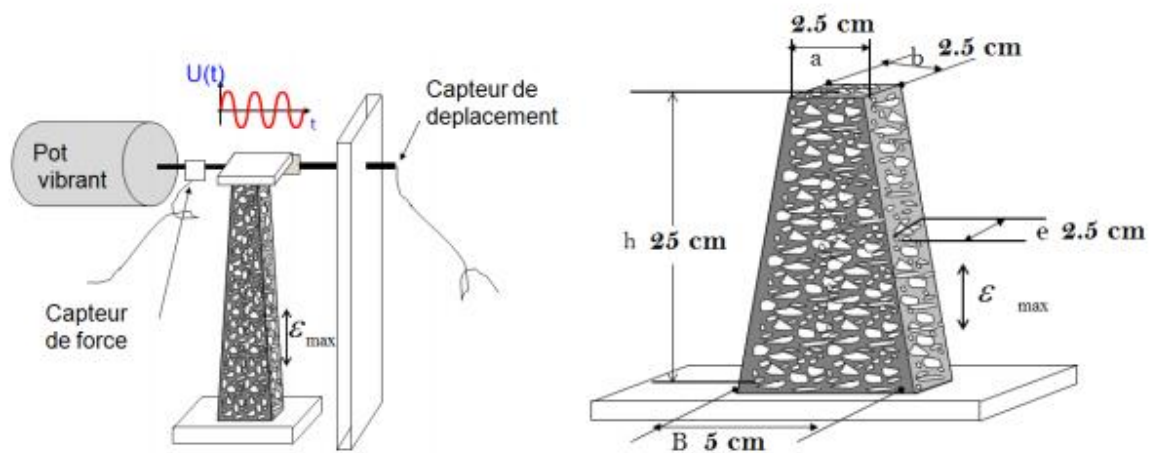
L'essai de flexion 2-points est utilisé pour l'étude du module complexe. Cet essai normalisé (**EN 12697-26**) consiste à imposer un déplacement de façon à ce que la déformation maximale "max dans l'éprouvette soit inférieure ou égale à **50 x 10⁻⁶**. Il est en

Les essais de module complexe

général admis qu'à de faibles niveaux de déformation et pour des temps de sollicitation très courts (**30 s à 2 mn** maximum selon la norme **EN12697-26**), le mélange hydrocarboné présente un comportement viscoélastique linéaire. Les mesures des paramètres (**F, D,...**) nécessaires au calcul du module sont réalisées pendant les **10** dernières secondes de l'essai. Plusieurs températures et fréquences sont balayées au cours de l'essai correspondant aux conditions de service des chaussées bitumineuses.

NB : Le module complexe doit être déterminé avec au minimum de **4** températures séparées au maximum de **10 °C**, et pour chaque température à au moins **3** fréquences espacées de manière égale sur une échelle logarithmique, avec un rapport minimal de **10 Hz** entre les fréquences extrêmes.

La (Fig IV :4) présente le schéma de principe de l'essai de module complexe en flexion deux points



(a) Principe de l'essai de flexion sur éprouvette - (b) Éprouvette trapézoïdale pour essai de module trapézoïdale

FIGURE IV-5: ESSAI DE FLEXION 2-POINTS SUR EPROUVETTE TRAPEZOÏDALE

Les valeurs de contrainte et de déformation maximales σ_{max} et ϵ_{max} atteintes par l'éprouvette sont calculées à partir des caractéristiques géométriques des éprouvettes à l'aide des formules issues d'un calcul de résistance des matériaux.

$$E_{max} = \frac{(b-a)^2}{8h^2 a \left(\ln \frac{b}{a} - \frac{(b-a)(3b-a)}{2b^2} \right)} \cdot d$$

$$\sigma_{max} = \frac{3h}{2ea(b-a)} \cdot F$$

Les essais de module complexe

IV.7.2. Essai homogène :

Essai de traction - compression sur éprouvette cylindrique :

C'est un essai de type homogène L'éprouvette cylindrique est soumise à des sollicitations axiales de type traction-compression alternée et centrées à zéro. L'essai est homogène dans la partie centrale de l'éprouvette. Il peut être réalisé en contrôle de déformation ou de contrainte. La (Fig IV :5) présente le montage d'un exemple de l'essai de module complexe de type traction - compression sur éprouvette cylindrique

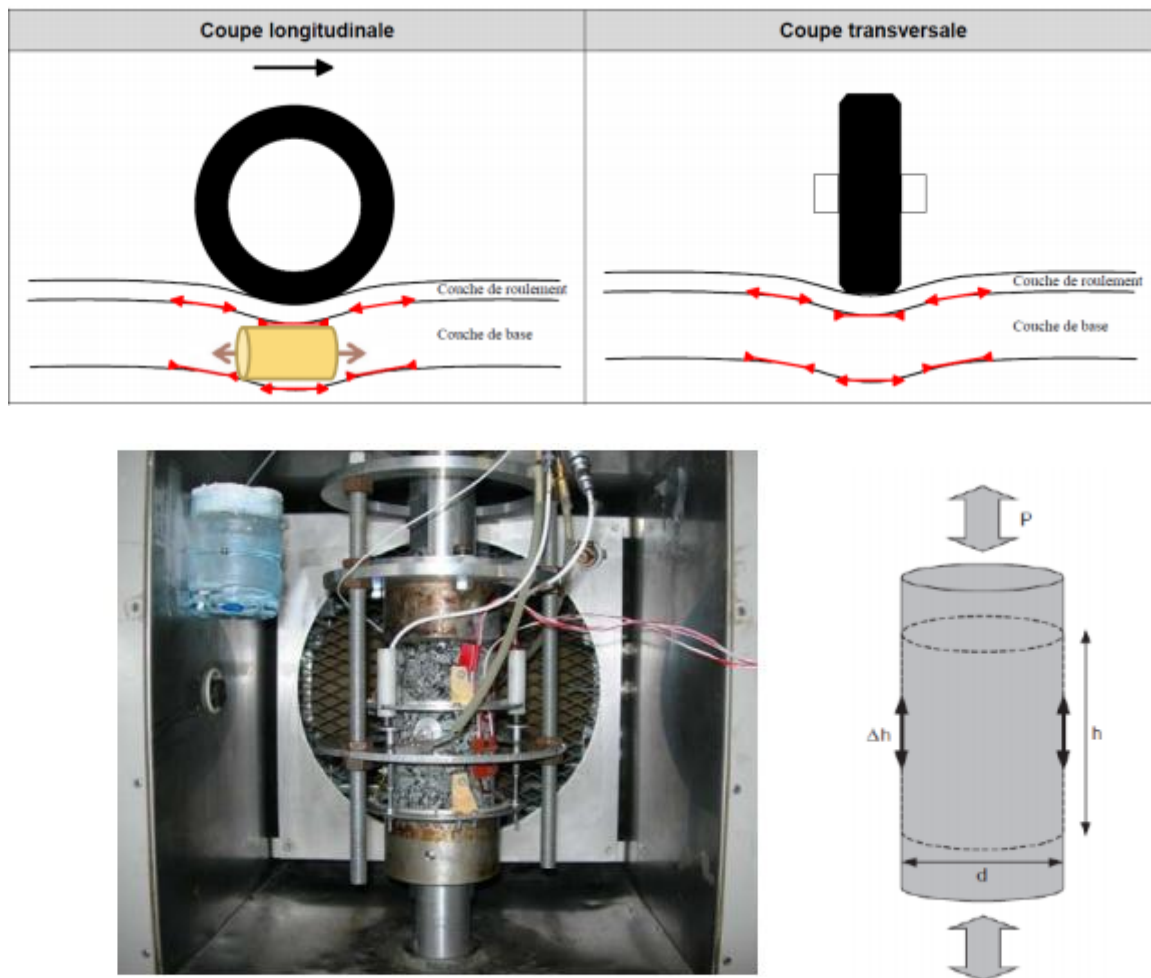


FIGURE IV-6: ESSAI DE MODULE COMPLEXE DE TYPE TRACTION

Avec l'essai de traction - compression sur éprouvette cylindrique, on peut mesurer non seulement le module complexe du matériau testé, mais aussi le coefficient de Poisson complexe. Si on applique sur une éprouvette cylindrique d'enrobé une contrainte sinusoïdale dans la direction axiale (direction 1, Fig IV :6) $\sigma_1(t) = \sigma_{01} \cdot \sin(\omega t)$, alors la réponse en déformation axiale dans cette direction est sinusoïdale en régime établi de la forme

Les essais de module complexe

$\varepsilon_1(t) = \varepsilon_{01} \sin(\omega t - \varphi_E)$ et vice-versa. La réponse en déformation radiale (direction 2) est établie de la forme

$$\varepsilon_2(t) = \varepsilon_{02} \sin(\omega t - \varphi_E + \pi + \varphi_V) = -\varepsilon_{02} \sin(\omega t - \varphi_E + \varphi_V).$$

φ_E est l'angle de phase (déphasage) entre la contrainte et la déformation dans la direction 1.

φ_V est le déphasage entre la déformation axiale (direction 1) et la déformation radiale (direction 2).

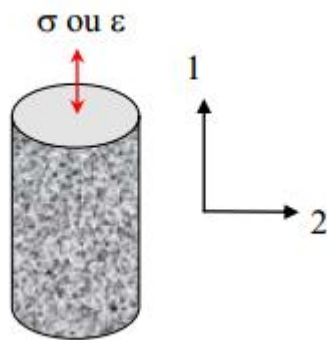


FIGURE IV-7: MESURE DE MODULE COMPLEXE SUR EPROUVETTE CYLINDRIQUE

En notation complexe, nous avons le module complexe E^* le coefficient de Poisson complexe ν^* peuvent être obtenus selon les équations : [6]

$$E^* = \sigma_1^* / \varepsilon_1^* = \sigma_{01} e^{i(\omega t + \varphi_E)} / \varepsilon_{01} e^{i\omega t} = (\sigma_{01} / \varepsilon_{01}) e^{i\varphi_E} = |E^*| e^{i\varphi_E}$$

$$\nu^* = -\varepsilon_2^* / \varepsilon_1^* = -\varepsilon_{02} e^{i(\omega t - \varphi_E + \varphi_V)} / \varepsilon_{01} e^{i(\omega t - \varphi_E)} = |\nu^*| e^{i\varphi_V}$$

IV.8. Détermination du module complexe par propagation des ondes :

Une nouvelle génération d'essai est en pleine expansion, ce sont les essais non destructifs. Parmi ces essais, ceux utilisant la propagation d'ondes mécaniques (active ou passive) ont déjà fait leurs preuves sur les matériaux du Génie Civil comme le béton ou l'acier. Seulement, ces matériaux ont un comportement mécanique élastique qui facilite le traitement du signal acoustique. Or dans le cadre des bétons bitumineux, le comportement mécanique thermo-viscoélastique entraîne un déphasage et une atténuation de l'onde. De plus, les hétérogénéités présentes dans le matériau peuvent être à l'origine de la diffusion de l'onde et perturber le parcours du signal.

Les essais de module complexe

La détermination du module complexe par propagation d'onde a donné lieu à de nombreuses études utilisant les méthodes actives présentées auparavant (soniques, dynamiques et ultrasonores).

IV.8.1. La méthode de l'impact écho pour estimer le module :

Basée sur une étude de la décroissance énergétique des signaux en fonction du temps, une loi exponentielle est déterminée mettant en évidence la capacité de stockage énergétique et le taux de décroissance des différents matériaux (Fig IV :7). Ainsi, les matériaux montrant la plus grande capacité de stockage et le taux de décroissance énergétique le plus élevé se sont révélés être ceux ayant le module le plus élevé.

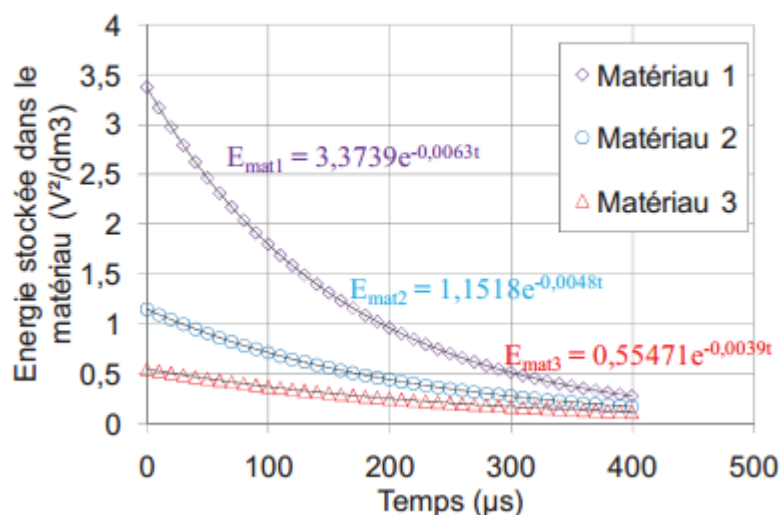


FIGURE IV-8: COMPARAISON DES LOIS DE DECROISSANCE EXPONENTIELLE ENERGETIQUE DES DIFFERENTS MATERIAUX.

IV.8.2. Les méthodes dynamiques :

Reposant sur l'étude de la résonance libre du matériau étudié selon deux modes propres sur des éprouvettes cylindriques.

L'utilisation des méthodes ultrasonores a donné lieu à de nombreuses déterminations du module complexe des enrobés bitumineux en utilisant les différents types d'ondes existants et en faisant deux hypothèses de comportement mécanique majeures.

Le module complexe a d'abord été déterminé en faisant l'hypothèse d'un comportement mécanique élastique isotrope. On a utilisé la propagation d'ondes de compression sur des éprouvettes cylindriques [22].

IV.9. Conclusion :

La détermination du module complexe d'un enrobé revêt un intérêt certain pour bien comprendre le rôle mécanique de l'enrobé dans la structure de la chaussée. Compte tenu du comportement visqueux de l'enrobé, il est impératif de déterminer non seulement son module complexe mais surtout l'évolution de ses modules sur une grande étendue de températures et de fréquences de chargement.

L'essai de module complexe par flexion sur éprouvettes trapézoïdales est un essai fondamental pour les études de formulations, les contrôles et le dimensionnement des structures de chaussées.

chapitre V : PRÉSENTATION DES RESULTATS.

V.1. Introduction :

Les différentes composantes du module complexe varient avec la température et la fréquence de sollicitation, fixées pour chaque essai élémentaire.

Les résultats expérimentaux $|E^*|$, ϕ , E_1 , E_2 sont usuellement exprimés à l'aide de plusieurs représentations classique présentées ci-après :

V.2. LES COURBES ISOTHERMES :

En fixe la température T pour chaque essai, et on trace variation de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la fréquence, sur une courbe de coordonnées bilogarithmiques. Comme montre dans la (Fig V :1) [24]. La pente des isothermes permet d'estimer la susceptibilité cinétique du matériau bitumineux (C'est-à-dire la variation de module avec la vitesse de la sollicitation) [5].

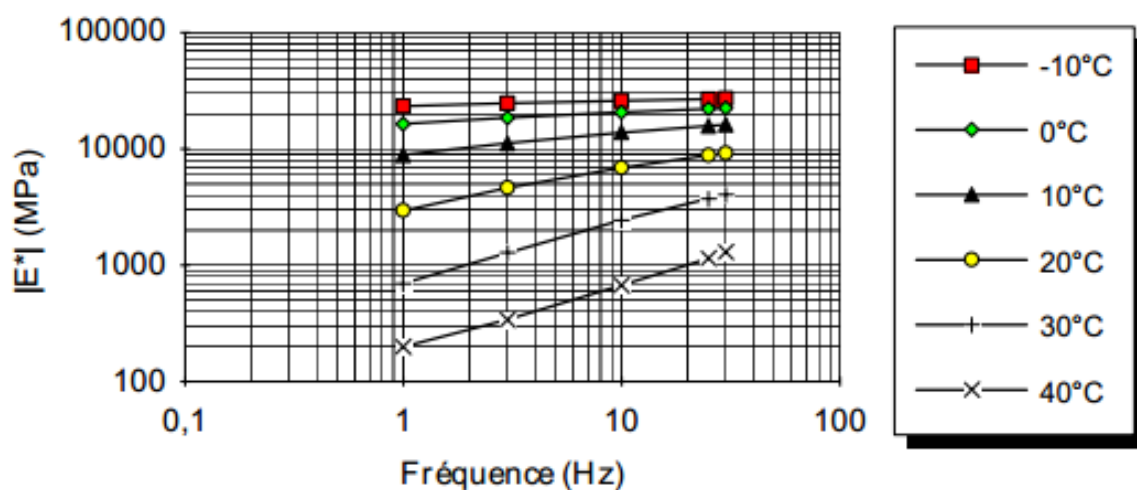


FIGURE V-1: COURBES ISOTHERMES [25]

V.2.1. Lecture des courbes :

D'après la (FigV : 1), qui représente la variation de la norme du module en fonction de la fréquence : l'allure des courbes sont des droites avec des pentes différents. Le module varie avec la variation des fréquences et aussi avec la variation des températures. La variation du module avec les fréquences est une relation proportionnelle (augmentation du module avec

PRÉSENTATION DES RESULTATS

l'augmentation de la fréquence). Au contraire avec la température où la relation est proportionnelle inverse (le module est augmenté pour des températures basse). La pente des isothermes est variée proportionnellement avec la température (la pente augmentée avec l'augmentation de la température).

V.3. LA COURBE MAITRESSE :

(Principe d'Equivalence Temps –Température PETT)

Le module est, dans le cas général, une fonction de deux variables indépendantes (fréquence ou pulsation (ou temps) et température) : $E^*(\omega, T)$. La propriété d'équivalence fréquence (ou temps) température suppose que l'on peut introduire une seule variable réduite pour décrire la variation du module avec la fréquence (ou le temps) et la température : $E^*(\omega.f(T))$. Les matériaux possédant cette propriétés sont appelés thermorhéologiquement simples.

Cette propriété implique également les relations particulières suivantes entre les fonctions de fluage (définie dans le chap 3) (resp. relaxation, définie dans chap 3) obtenues à différentes températures :

$$F_T(t) = F_{TR}\left(\frac{t}{a_T}\right) \text{ et } R_T(t) = R_{TR}\left(\frac{t}{a_T}\right)$$

Où T_R : est une température arbitraire de référence,

a_T , une fonction qui dépend de T_R et de T , appelée coefficient de translation entre les températures T et T_R . Pour les valeurs de module complexe, cette propriété se traduit en particulier par l'existence d'une courbe unique dans les représentations de Cole-Cole et de Black.

Lorsque le principe d'équivalence temps température est respecté pour un matériau donné, il est possible de construire une courbe unique ($\log E^*$; $\log f$), où F est la fréquence pour une température de référence T_R choisie arbitrairement. Cette courbe est obtenue par translation parallèlement à l'axe des fréquences de chaque isotherme par rapport à l'isotherme correspondant à la température de référence jusqu'à superposition des points de mêmes ordonnées. La courbe ainsi obtenue est appelée courbe maîtresse à la température de référence T_R Elle permet d'obtenir des valeurs de modules à des fréquences inaccessibles par l'expérimentation (Fig V :2). Exemple d'une courbe maitresse de 15 ° C. [11] [2].

PRÉSENTATION DES RESULTATS

Cette courbe est obtenue par translation parallèle à l'axe des fréquences (en logarithme), de chaque isotherme par rapport à l'isotherme correspondant à la température de référence jusqu'à superposition des points de mêmes ordonnées. En abscisse logarithmique,

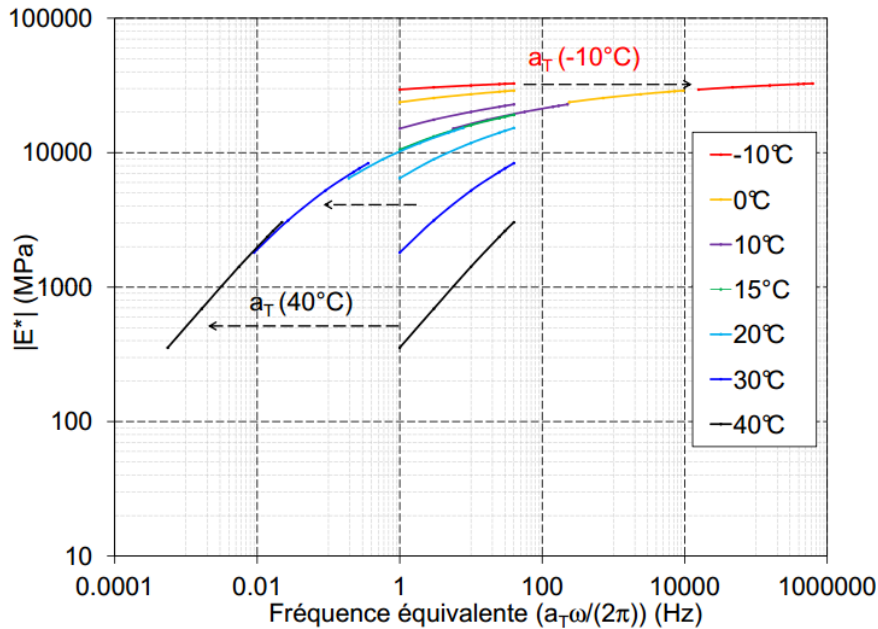


FIGURE-V-2: COURBE MAITRESSE A 15 ° C

V.3.1.1. Détermination du facteur de translation

le coefficient de translation de l'isotherme T par rapport à l'isotherme TR de référence choisie est $\log(a_T)$ tel que $E^*(\omega, T) = E^*(\omega * a_{TR}, T_R)$ avec $a_{TR}=1$ et $a_T = f(T) / f(T_R)$.

Quelques formules analytiques qui sont proposées pour représenter $\log(a_T)$.

La formule dite "de WLF" obtenue par William, Landel et Ferry :

$$\text{Log}(a_T) = \frac{-C_1(T-T_R)}{(T-T_R) + C_2}$$

Les paramètres C_1 et C_2 sont des constantes dépendant des matériaux étudiés et la température de référence possèdent les propriétés suivantes :

$$C_1 \times C_2 = C_1' \times C_2' ; (T_{ref} - C_2) = (T_{ref}' - C_2')$$

V.3.1.2. Équation D'ARRHENIUS :

$$\text{Log } a_T = \frac{\delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right)$$

PRÉSENTATION DES RESULTATS

Avec δH l'énergie apparente d'activation caractérisant le matériau, R la constante des gaz parfaits ($8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et T et T_R les températures exprimées en K.

V.4. Courbes isochrones :

Dans les courbes isochrones on fixe la fréquence f pour chaque essai, et on varie la température, en traçant la variation du de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la fréquence sur une courbe de coordonnées bi logarithmiques, comme montré dans la (Fig V :3) [12].

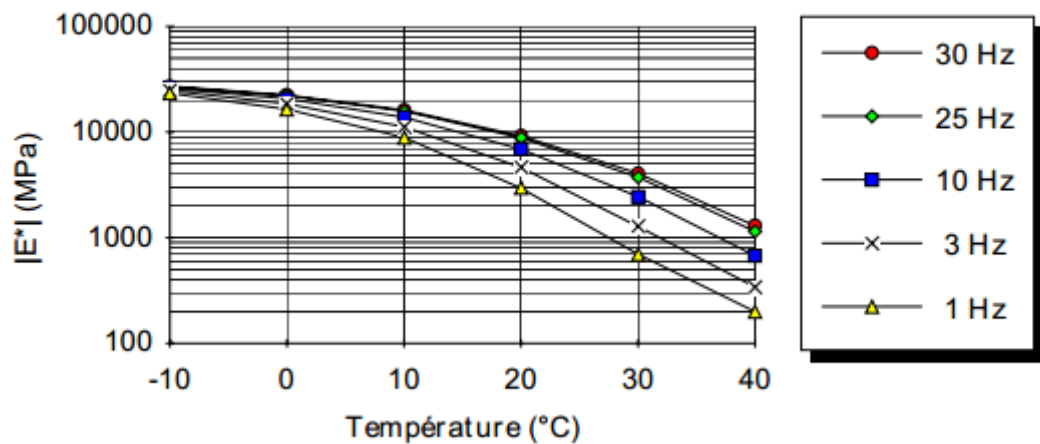


FIGURE V-3 : LES COURBES ISOCHRONES [25]

V.4.1. Lecture des courbes :

Sur la (Fig V :3) qui représente la variation du la norme du module en fonction de la température : le module diminue avec l'augmentation de la température. A Basse température les pentes des graphes sont petites (la variation du module est petit) Ces courbes tendent vers la même valeur. Au contraire la variation du module est grande et les pentes des graphes sont grands, quel que soit la fréquence d'essai. La relation entre le module et la fréquence c'est une relation proportionnelle.

V.5. COURBES DANS LE PLAN COLE ET COLE

Le module complexe peut être présenté dans un plan complexe à partir de la partie réelle (E_1 module élastique) en abscisse et de la partie imaginaire (E_2 module visqueux) en ordonnées. Pour les matériaux VEL, auxquels le principe d'équivalence temps-température est applicable. Cette courbe est indépendante de la température et de la fréquence [26].

PRÉSENTATION DES RESULTATS

Les points expérimentaux aux différentes fréquences et températures permettent de définir une courbe unique. Cette courbe est caractéristique du matériau étudié. Elle peut être utilisée pour caler un modèle de comportement rhéologique (Fig V :4).

Cette représentation, présente un inconvénient. Les coordonnées ce sont des coordonnées arithmétiques, donc la précision devient moins bonne pour les faibles valeurs du module. Pour améliorer le calage aux faibles valeurs de module, on utilise la représentation dans l'espace de Black [11].

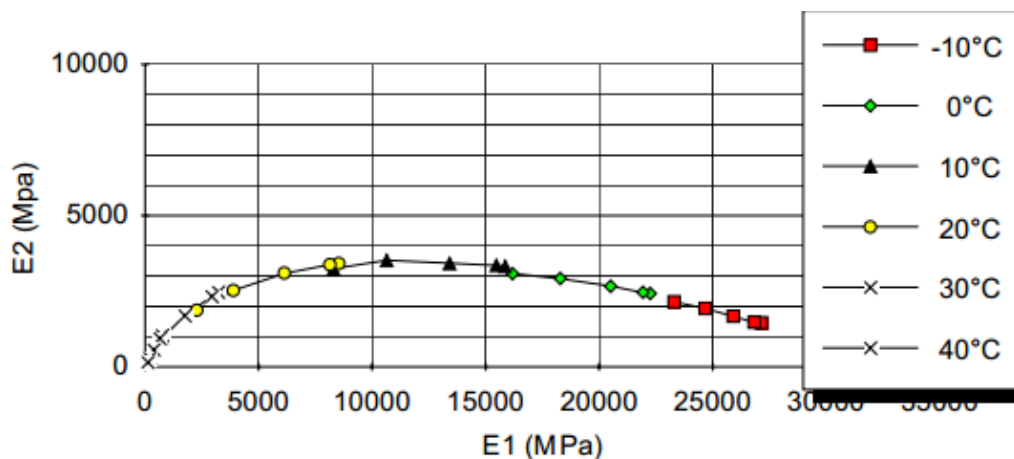


FIGURE V-4: COURBES DANS LE PLAN COLE ET COLE. [25]

V.5.1. Lecture des courbes :

Sur la (Fig V :4), qui représente la variation du module visqueux E_2 en fonction du module élastique E_1 , il apparaît que les points expérimentaux se placent sur une même courbe global proche d'un arc de cercle passant par E_0 (valeur proche de 0) et par E_∞ et présentant une dissymétrie. À l'origine, l'angle que fait la courbe expérimentale avec l'axe E_1 est beaucoup plus grand que celui qu'elle fait avec cet axe à l'autre extrémité, Cette courbe tend vers l'origine pour les températures croissantes et les fréquences décroissantes, et vers un point asymptotique E_∞ situé sur l'axe réel, quand la fréquence tend vers l'infini et quand la température décroît.

V.6. Courbe dans l'espace de Black :

Cette représentation consiste à tracer le logarithme de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de l'angle de phase correspondant (Fig V :5). Une des particularités de cette représentation pour les enrobés consiste à placer l'abscisse (à savoir l'angle de phase) à gauche de l'axe des ordonnées, croissant de droite à gauche. Lorsque le matériau obéit au principe d'équivalence temps-température, les points expérimentaux permettent de définir une courbe unique, caractéristique du matériau testé. [12]

Lorsque le matériau obéit au principe d'équivalence temps-température, les points expérimentaux permettent de définir une courbe unique, caractéristique des matériaux étudiés

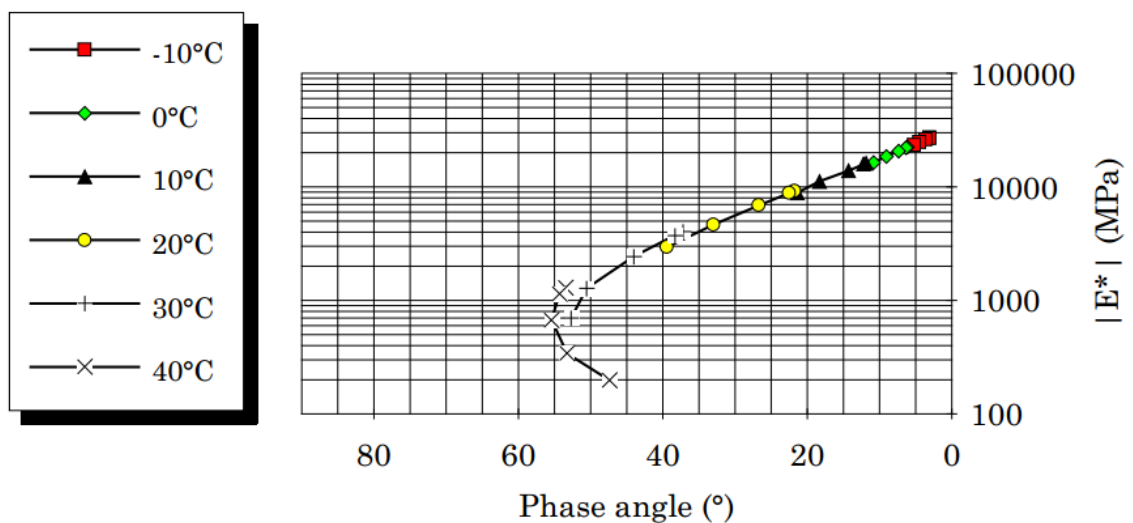


FIGURE V-5: COURBE DANS L'ESPACE DE BLACK [25]

V.6.1. Lecture des courbes :

Les points expérimentaux se répartissent autour d'une même courbe globale, La courbe de Black montre que le déphasage ϕ de l'enrobé augmente lorsque le $|E^*|$ diminue. Par ailleurs, le déphasage ϕ augmente avec la température jusqu'à une valeur de température palier puis diminue au-delà. Par contre la relation entre la norme du module complexe et la température est proportionnellement inverse (l'augmentation de la norme correspond la diminution de la température et l'inverse).

V.7. Interprétation des résultats :

V.7.1. Variation du module en fonction de la température :

Les causes de cette relation de proportionnalité inverse sont à l'échelle microscopique (chimique), avec l'augmentation de la température les liaisons chimiques entre les molécules du bitume deviennent faible, ce qui implique des effets négatifs à l'échelle macroscopique (diminution résistance et la rigidité du bitume). En ce qui concerne les enrobées, l'augmentation de la température influence sur la force de cohésion entre les granulats car le bitume qui enrobe les granulats fond sous l'effet de l'augmentation de la température et l'enrobée devient mou avec une faible rigidité par rapport à la rigidité à basse température.

Donc La susceptibilité thermique désigne le changement des propriétés mécaniques d'un matériau bitumineux avec la température. Le bitume qui est un liquide newtonien peu visqueux, son comportement rhéologique s'approche du comportement viscoélastique avec l'augmentation de la température (au-dessus de 80°C, devient un matériau viscoélastique, linéaire ou non).

V.7.2. Variation du module en fonction de la fréquence :

Plus la fréquence est petit plus la durée de chargement est grand ; plus le matériau travaille beaucoup plus. Car dans ce cas le matériau n'as pas le temps pour revenir à son état initial. Le contraire dans le cas où on a des fréquences grande le temps d'application du contrainte est réduit donc le matériau à le temps pour revenir à son état initial.

V.7.3. Variation du module en fonction de l'angle de phase :

La relation est inverse proportionnelle entre le module et l'angle de phase parce que :

Si on dit l'angle de phase on dit la quantité d'énergie dissipée. Cette énergie augmente avec l'augmentation de l'angle de phase. Cette énergie dissipée se transforme et redégager sous la forme de l'énergie calorifique (forme de chaleur). La variation du module en fonction de l'angle de phase est la même que la relation entre le module et la température.

En ce qui concerne la variation de l'angle de phase en fonction de la température, le bitume devient suffisamment fluide pour ne plus intervenir dans la rigidité du mélange. Il joue le rôle de lubrifiant entre des grains minéraux et le comportement tend vers celui d'un matériau granulaire non lié.

PRÉSENTATION DES RESULTATS

NB : plus que Φ tends vers 0 plus que le comportement du matériau proche au comportement élastique (le matériau devient parfaitement élastique si $\Phi=0$).

V.8. Conclusion :

Les caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux (le module de rigidité) dans le domaine viscoélastique linéaire montrent une forte dépendance en fonction de :

- les paramètres environnementaux (température, vieillissement,...) ;
- les paramètres de chargement mécanique (vitesse de sollicitation, fréquence,...).

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Pour améliorer la durabilité des chaussées, le choix et le contrôle des matériaux bitumineux doivent être pertinents. Cela rend nécessaire l'établissement des critères d'analyse de ces matériaux bitumineux.

On a présenté dans cette étude brièvement la méthode de détermination du module complexe par les méthodes classique et de propagation d'onde. Ces dernières méthodes non destructives basent sur les caractéristiques des propagations d'ondes dans les milieux continus isotropes.

Le module complexe à une forte dépendance en fonction :

- ✓ des paramètres environnementaux - **la température**-
- ✓ des paramètres de chargement mécanique-**la fréquence**-

Dans un pays avec un climat caractérisé par un écart de température entre la nuit et le jour, entre l'hiver et l'été, le nord et le sud comme l'Algérie où la température dépasse 40°C largement, il faut faire au moins des modélisations numériques à l'aide des logiciels comme COMSOL sur les essais de détermination du module complexe.

On espère qu'une connaissance plus approfondie de ces phénomènes permettra d'intégrer leur influence dans une méthode rationnelle pour étudier la résistance à la fatigue des matériaux bitumineux et adapter les méthodes de dimensionnement des chaussées

Bibliographie

- [1] N. BUECHE, Evaluation des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes, LAUSANNE, 2011.
- [2] J. Sohm, Prédiction des déformations permanentes des matériaux bitumineux, Nantes, 2011.
- [3] T. MARCOTTE, Évaluation de l'effet de la teneur en eau sur le comportement à l'orniérage et sur le module complexe des enrobés semi-tièdes comportant des enrobés recyclés, MONTRÉAL, 2013.
- [4] M. Djamel, Amélioration des performances des enrobés bitumineux par la modification à base de polymères : poudre de caoutchouc, Alger, 2009.
- [5] H. e. J. F. C. Di Benedetto, Matériaux routiers bitumineux, 2005.
- [6] M. L. NGUYEN, Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux, Lyon, 2009.
- [7] D.-T. NGUYEN, Prédiction des déformations permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses, Paris, 2006.
- [8] A. Béghin, Apport de mesures rhéologiques et de pelage à l'analyse de la rupture de liants bitumineux, Paris, 2003.

Bibliographie

- [9] S. PARANHOS, Approche multi-échelles des émissions d'un procédé d'élaboration des enrobés a chaud, Rouen , france, 2007.
- [10] A. Badra, Comportement mécanique des enrobés bitumineux renforcés par la fibre de verre, BATNA, 2008.
- [11] S. C. SOMÉ, Comportement thermomécanique des enrobés tièdes et de l'interface bitume-granulat, Nantes, 2012.
- [12] Y. LEFEUVRE, Contribution à l'étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux Etude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffus Expérimentation - Modélisation, paris, 2001.
- [13] F. OLARD, Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé, LYON, 2003.
- [14] CÉSAR BARCO, Influence de la température de compactage des plaques d'enrobés sur la résistance à l'orniérage, MONTRÉAL, 2007.
- [15] M. MOUAZEN, Evolution des propriétés rhéologiques des enrobés bitume, vers une loi vieillissement/viscosité, Paris, 2011.
- [16] F. OLRAD, Relations entre la composition, la structure et les propriétés thermo-mécaniques des matériaux bitumineux, Lyon, 2013.
- [17] F. L, Module complexe des mélanges bitumineux, paris, 1977.

Bibliographie

- [18] H. BAAJ, Comportement a la fatigue des materiaux granulaires traites aux liants hydrocarbones, LYON, 2002.
- [19] D. E, Comportement mécanique des enrobés bitumineux des petites aux grandes déformations, LYON, 1995.
- [20] H. M, the Rheology of bituminous mixtures" Eurobitume Workshop-the rheology of bituminous binders, Bruxelles, 1995.
- [21] T. PUCCI, Approche prévisionnelle de le fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux, LAUSANNE, 2000.
- [22] N. LARCHER, Contribution à la caractérisation des matériaux au comportement viscoélastique par méthode ultrasonore Application aux matériaux bitumineux, paris, 2014.
- [23] H. B. .. L. R. S. André, Materials and structures/ Matériaux et constructions.vol.34, 2001.
- [24] D. L. R. C. DI BENEDETTO H., State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue Bituminous Mixtures .Bituminous Binders and Mixtures, 1998.
- [25] D. I. Roche, module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux, paris, 1996.
- [26] D. A. Carter, LA mesure du module complexe des enrobés bitumineux, Québec, 2002.

Bibliographie

- [27] S. C. Somé, Comportement thermomécanique des enrobés tiédes et de l'interface bitume-granulat, Nantes, 2012.