ICS: 93.080.20

norme belge enregistrée

NBN EN 12697-24+A1

2e éd., octobre 2007

Indice de classement: B 63

Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 24: Résistance à la fatigue

Bitumineuze mengsels - Beproevingsmethoden voor warm bereid asfalt - Deel 24: Weerstand tegen vermoeiing

Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue

Autorisation de publication: 25 octobre 2007

Remplace NBN EN 12697-24 (2004).

La présente norme européenne EN 12697-24+A1:2007 a le statut d'une norme belge.

La présente norme européenne existe en trois versions officielles (allemand, anglais, français).

standards for .be

Bureau de Normalisation - Avenue de la Brabançonne 29 - 1000 Bruxelles - Belgique
Tél: +32 2 738 01 12 - Fax: +32 2 733 42 64 - E-mail: info@nbn.be - NBN Online: www.nbn.be
Banque 000-3255621-10 IBAN BE41 0003 2556 2110 BIC BPOT BEB1 TVA: BE 0880.857.592

© NBN 2007

Prix: groupe 23

ICS: 93.080.20

Geregistreerde Belgische norm

NBN EN 12697-24+A1

2e uitg., oktober 2007

Normklasse: B 63

Bitumineuze mengsels - Beproevingsmethoden voor warm bereid asfalt - Deel 24: Weerstand tegen vermoeiing

Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 24: Résistance à la fatigue

Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue

Toelating tot publicatie: 25 oktober 2007

Vervangt NBN EN 12697-24 (2004).

Deze Europese norm EN 12697-24+A1:2007 heeft de status van een Belgische norm.

Deze Europese norm bestaat in drie officiële versies (Duits, Engels, Frans).

Bureau voor Normalisatie Brabançonnelaan 29 B-1000 Brussel België
Tel: +32 2 738 01 12 - Fax: +32 2 733 42 64 - E-mail: info@nbn.be - NBN Online: www.nbn.be
Bank 000-3255621-10 IBAN BE41 0003 2556 2110 BIC BPOT BEB1 BTW: BE 0880.857.592

© NBN 2007

Prijsgroep: 23

NORME EUROPÉENNE

EUROPÄISCHE NORM

EUROPEAN STANDARD

EN 12697-24:2004+A1

Juillet 2007

ICS 93.080.20

Remplace l'EN 12697-24:2004

Version Française

Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 24: Résistance à la fatigue

Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung

Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue

La présente Norme européenne a été adoptée par le CEN le 2 mars 2004 et comprend l'amendement 1 adopté par le CEN le 16 mai 2007.

Les membres du CEN sont tenus de se soumettre au Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, qui définit les conditions dans lesquelles doit être attribué, sans modification, le statut de norme nationale à la Norme européenne. Les listes mises à jour et les références bibliographiques relatives à ces normes nationales peuvent être obtenues auprès du Centre de Gestion du CEN ou auprès des membres du CEN.

La présente Norme européenne existe en trois versions officielles (allemand, anglais, français). Une version dans une autre langue faite par traduction sous la responsabilité d'un membre du CEN dans sa langue nationale et notifiée au Centre de Gestion du CEN, a le même statut que les versions officielles.

Les membres du CEN sont les organismes nationaux de normalisation des pays suivants: Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Chypre, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède et Suisse.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION

Centre de Gestion: rue de Stassart, 36 B-1050 Bruxelles

© 2007 CEN Tous droits d'exploitation sous quelque forme et de quelque manière que ce soit réservés dans le monde entier aux membres nationaux du CEN.

Réf. n° EN 12697-24:2004+A1:2007 F

Sommaire

Page

Avant-propos 4

1 Domaine d'application 7

2 Références normatives 7

3 Termes et définitions symboles et abréviations 7
3.1 Généralités 8
3.2 Essai de flexion en deux points sur éprouvettes trapézoïdales 8
3.3 Essai de flexion deux points sur éprouvettes prismatiques 9
3.4 Essai de flexion trois points sur éprouvettes prismatiques 12
3.5 Essai de flexion quatre points sur éprouvettes prismatiques 13
3.6 Essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques 19

4 Rupture 19

5 Calculs 20

6 Résumé des procédures 20
6.1 Essai de flexion deux points sur éprouvettes trapézoïdales 20
6.2 Essai de flexion deux points sur éprouvettes prismatiques 20
6.3 Essai de flexion trois points sur éprouvettes prismatiques 20
6.4 Essai de flexion quatre points sur éprouvettes prismatiques 20
6.5 Essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques 21

7 Rapport d'essai 21

Annexe A (normative) Essai de flexion en deux points sur des éprouvettes de forme trapézoïdale 22
A.1 Principe 22
A.2 Appareillage 23
A.3 Préparation des éprouvettes 24
A.4 Procédure 27
A.5 Calcul et expression des résultats 28
A.6 Rapport d'essai 30
A.7 Fidélité 30

Annexe B (normative) Essai de flexion en deux points sur des éprouvettes prismatiques 31
B.1 Principe 31
B.2 Appareillage 31
B.3 Préparation de l'éprouvette 32
B.4 Procédure 33
B.5 Calcul et expression des résultats 33
B.6 Rapport d'essai 36
B.7 Fidélité 36

Annexe C (normative) Essai de flexion en trois points sur des éprouvettes prismatiques 37
C.1 Principe 37
C.2 Appareillage 37
C.3 Préparation de l'éprouvette 38
C.4 Procédure 39
C.5 Calcul et expression des résultats 40
C.6 Rapport d'essai 43
C.7 Fidélité 44

Annexe D (normative) Essai de flexion en quatre points sur éprouvettes prismatiques 45
D.1 Principe 45
D.2 Appareillage 47

D.3 Préparation de l'éprouvette 49
D.4 Procédure 50
D.5 Calcul et expression des resultants 53
D.6 Rapport d'essai 53
D.7 Fidélité 54

Annexe E (normative) Essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques 55
E.1 Principe 55
E.2 Matériel 55
E.3 Préparation de l'éprouvette 58
E.4 Mode opératoire 59
E.5 Calcul et expression des résultats 60
E.6 Rapport d'essai 62
E.7 Fidélité 62

Bibliographie 63

Avant-propos

Le présent document (EN 12697-24:2003+A1:2007) a été élaboré par le Comité Technique CEN/TC 227 « Matériaux pour les routes », dont le secrétariat est tenu par DIN.

Cette Norme européenne devra recevoir le statut de norme nationale, soit par publication d'un texte identique, soit par entérinement, au plus tard en janvier 2008, et toutes les normes nationales en contradiction devront être retirées au plus tard en janvier 2008.

Le présent document comprend l'Amendement 1, approuvé par le CEN le 2007-05-16.

Le présent document remplace l'EN 12697-24:2004.

Le début et la fin du texte ajouté ou modifié par l'amendement est indiqué dans le texte par des repères ▌A1⟩ ⟨A1▌.

Cette Norme européenne fait partie de la série de normes suivante :

EN 12697-1, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 1 : Teneur en liant soluble.*

EN 12697-2, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 2 : Granulométrie.*

EN 12697-3, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 3 : Récupération des bitumes : Évaporateur rotatif*.

EN 12697-4, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 4 : Récupération des bitumes : Colonne à distiller.*

EN 12697-5, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 5 : Masse volumique maximale (masse volumique réelle) des matériaux bitumineux*

EN 12697-6, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 6 : Détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses.*

EN 12697-7, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 7 : Détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses par les rayons gamma.*

EN 12697-8, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 8 : Détermination des pourcentages de vides caractéristiques.*

EN 12697-9, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 9 : Détermination de la masse volumique de référence.*

EN 12697-10, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 10 : Compactabilité.*

EN 12697-11, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 11 : Détermination de l'affinité granulat - bitume.*

EN 12697-12, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 12 : Détermination de la sensibilité de l'eau des éprouvettes bitumineuses*.

EN 12697-13, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 13 : Mesure de la température.*

EN 12697-14, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 14 : Teneur en eau*.

EN 12697-15, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 15 : Détermination de la sensibilité à la ségrégation*.

EN 12697-16, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 16 : Abrasion par pneus à crampons*.

EN 12697-17, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 17 : Perte de matériau des éprouvettes d'enrobé drainant.*

EN 12697-18, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 18 : Essai d'égouttage du liant*.

EN 12697-19, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 19 : Perméabilité des éprouvettes*.

EN 12697-20, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 20 : Essai d'indentation sur cubes ou éprouvettes Marshall*.

EN 12697-21, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 21 : Essai d'indentation de plaques*.

EN 12697-22, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 22 : Essai d'orniérage*.

EN 12697-23, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 23 : Détermination de la résistance à la traction indirecte des éprouvettes bitumineuses*.

EN 12697-24, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 24 : Résistance à la fatigue*.

EN 12697-25, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 25 : Essai de compression cyclique*.

EN 12697-26, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 26 : Module de rigidité*.

EN 12697-27, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 27 : Prélèvements d'échantillons*.

EN 12697-28, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 28 : Préparation des échantillons pour la détermination de la teneur en liant, de la teneur en eau et de la granularité*.

EN 12697-29, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 29 : Détermination des dimensions des éprouvettes d'enrobées hydrocarbonés*.

EN 12697-30, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 30 : Confection d'éprouvettes par compacteur à impact*.

EN 12697-31, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 31 : Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire*.

EN 12697-32, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 32 : Compactage en laboratoire de mélanges bitumineux par compacteur vibratoire*.

EN 12697-33, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 33 : Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque*.

EN 12697-34, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 34 : Essai Marshall*.

EN 12697-35, *Mélange bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 35 : Malaxage en laboratoire*.

EN 12697-36, *Mélange bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 36 : Détermination des épaisseurs de chaussée bitumineuse*.

EN 12697-37, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 37 : Essai au sable chaud pour l'adhérence du liant sur des gravillons pré-enrobés pour HRA (hot rolled asphalt)*.

EN 12697-38, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 38 : Appareillage commun, calibrage et étalonnage.*

EN 12697-39, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 39 : Détermination de la teneur en liant par calcination.*

EN 12697-40, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 40 : Drainabilité in situ.*

EN 12697-41, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 41 : Résistance aux fluides de déverglaçage.*

EN 12697-42, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 42 : Quantité de matériaux étrangers présents dans les agrégats d'enrobés.*

EN 12697-43, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 43 : Résistance aux carburants*.

[A1] *texte supprimé* [A1].

Selon le Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, les instituts de normalisation nationaux des pays suivants sont tenus de mettre cette Norme européenne en application : Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Chypre, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède et Suisse.

1 Domaine d’application

Le présent document spécifie les méthodes qui sont utilisées pour caractériser la fatigue des mélanges bitumineux par différents types d’essais, dont des essais de flexion et des essais de traction directe et indirecte. Les essais sont réalisés sur des matériaux bitumineux compactés, au moyen d’une charge sinusoïdale ou d’une autre charge contrôlée, en utilisant différents types d’éprouvettes et de supports.

La procédure est utilisée pour classer les mélanges bitumineux selon leur résistance à la fatigue, prise comme guide comparatif des performances dans les structures de chaussée, de manière à obtenir des données permettant d’estimer le comportement structurel du matériau dans la chaussée et de pouvoir juger les résultats d’essais en fonction des spécifications des mélanges bitumineux.

Comme le présent document n’impose pas un type de dispositif d’essai particulier, le choix précis des conditions d’essai dépend des possibilités et de la plage de fonctionnement du dispositif utilisé. Pour le choix des conditions d’essai spécifiques, il sera nécessaire de respecter les critères des normes produit des mélanges bitumineux. Le domaine d’application du présent document est décrit dans les normes produit des mélanges bitumineux. Il n’est pas certain que les résultats obtenus selon les différentes méthodes d’essai soient comparables.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

[A1] EN 12697-6:2003+A1 [A1], *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 6 : Détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses*.

EN 12697-26, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 26 : Module de rigidité.*

EN 12697-27, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 27 : Prélèvements d'échantillons*

EN 12697-29, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 29 : Détermination des dimensions des éprouvettes d'enrobés hydrocarbonés*.

EN 12697-31, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 31 : Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire*.

[A1] EN 12697-33:2003+A1, *Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Partie 33 : Confection d’éprouvettes au compacteur de plaques*. [A1]

3 Termes et définitions symboles et abréviations

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions, symboles et abréviations suivants s'appliquent.

3.1 Généralités

3.1.1
fatigue
réduction de la résistance d'un matériau sous charge répétée, par rapport à sa résistance au premier chargement

3.1.2
critères conventionnels de rupture (déplacement constant)
nombre d'applications de charge, $N_{f/50}$, correspondant à une diminution de moitié du module complexe de rigidité par rapport à sa valeur initiale

3.1.3
module de rigidité complexe initial
module de rigidité complexe, $s_{mix,0}$, après application de 100 chargements

3.1.4
critères conventionnels de fatigue (force constante)
lorsque le déplacement d'une éprouvette sous force constante en tête a augmenté du double par rapport au début de l'essai

3.1.5
résistance à la fatigue d'une éprouvette
le nombre de cycles $N_{i,j,k}$ correspondant aux critères de rupture conventionnels dans les conditions d'essai *k* (température, fréquence et mode de charge, par exemple à flèche constante ou à force constante et ou toute autre condition de charge constante)

3.2 Essai de flexion en deux points sur éprouvettes trapézoïdales

3.2.1
constante correspondant à la contrainte maximum
constante qui permet de convertir en déformation maximale, le déplacement en tête *z* de l'éprouvette trapézoïdale de dimensions [*B, b, e, h*], sur laquelle est appliquée une contrainte de flexion ε.

NOTE La relation entre K_ε et les paramètres mentionnés ci-dessus est la suivante :

$$K_\varepsilon \times z = \varepsilon \tag{1}$$

$$K_\varepsilon = \frac{B^2 \times (B-b)^2}{4b \times h^2 \times \left[(b-B) \times (3B-b) + 2B^2 \times \ln\left(\frac{B}{b}\right)\right]} \tag{2}$$

3.2.2 Symboles

Les symboles sont les suivants, avec une déformation de 1 micro-déformation (µdéformation) égale à 10^{-6} par convention :

i est l'indice de l'éprouvette pour un essai élémentaire (varie de 1 à *n*)

h_i est la hauteur, en mètres (m)

B_i est la longueur de la grande base, en mètres (m)

b_i est la longueur de la petite base, en mètres (m)

e_i est l'épaisseur, en mètres (m)

v_i est le pourcentage de vide par méthode géométrique de l'éprouvette *i*, en pour-cent (%)

$K_{\varepsilon i}$ est la constante correspondant à la déformation maximale, en mètres puissance moins un (m^{-1})

z_i est l'amplitude du déplacement imposé en tête de l'éprouvette *i*, en mètres (m)

ε_i est la déformation relative maximale de l'éprouvette *i*, correspondant au déplacement imposé en tête

N_i est la durée de vie conventionnelle en fatigue de l'éprouvette *i*

a est l'ordonnée de la droite de fatigue selon l'équation $\lg(N) = a + (1/b)\lg(\varepsilon)$

r_2 est le coefficient de régression linéaire ($\lg(N_i)$, $\lg(\varepsilon_i)$)

$1/b$ est la pente de la droite de fatigue

$\lg(\varepsilon)$ est la valeur moyenne de $\lg(\varepsilon_i)$

$s_{\lg(\varepsilon)}$ est l'écart-type de $\lg(\varepsilon_i)$

$s_{\lg(N)}$ est l'écart-type de $\lg(N_i)$

ε_6 est la déformation correspondant à 10^6 cycles

s_N est l'estimation de l'écart-type résiduel des logarithmes décimaux des durées de vie en fatigue

$\Delta\varepsilon_6$ est l'indice qualité de l'essai

n est le nombre d'éprouvettes

3.3 Essai de flexion deux points sur éprouvettes prismatiques

3.3.1
durée de vie moyenne en fatigue d'une série d'éprouvettes
moyenne sur une série de *n* éprouvettes au niveau de contrainte $\sigma_{j\,max}$ donné par l'équation (3)

$$N_{j\,max} = \frac{e}{n} \times \sum_{i=1}^{n} \ln\left(N_{ij}\right) \tag{3}$$

dans laquelle

$N_{j\,max}$ est le nombre moyen de cycles obtenus au niveau de contrainte $\sigma_{j\,max}$;

N_{ij} est la durée de vie en fatigue de l'éprouvette *i* au niveau de contrainte $\sigma_{j\,max}$;

j est le nombre de cycles au niveau de contrainte $\sigma_{j\,max}$;

n est le nombre d'éprouvettes au niveau de contrainte $\sigma_{j\ max}$;

l est l'épaisseur, en millimètres (mm).

3.3.2
écart-type de la durée de vie en fatigue d'une série d'éprouvettes
écart-type du logarithme naturel de la durée de vie en fatigue obtenu au niveau de contrainte $\sigma_{j\ max}$ pour n répétitions, donné par l'équation (4)

$$S_{j\ max} = \frac{1}{(n-1)} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\ln\left(N_{ij}\right) - \ln\left(N_{\varepsilon\ j\ max}\right)\right)^2} \tag{4}$$

dans laquelle

$S_{j\ max}$ est l'estimation de l'écart-type ;

j est le nombre de cycles au niveau de contrainte $\sigma_{j\ max}$;

N_{ij} est la durée de vie conventionnelle en fatigue au niveau de contrainte $\sigma_{j\ max}$;

$N_{j\ max}$ est le nombre moyen de cycles obtenus au niveau de contrainte $\sigma_{j\ max}$;

n est le nombre d'éprouvettes au niveau de contrainte $\sigma_{j\ max}$.

3.3.3
constantes pour la prise en compte de la géométrie de l'éprouvette
constantes qui permettent à la résistance en tête P_{ij} de l'éprouvette i de dimensions b_i, e_i et h_i sur laquelle un effort de flexion est appliqué, d'être convertie en une contrainte maximale.

NOTE La relation entre $K_{\varepsilon\ i}$ et les paramètres mentionnés ci-dessus est la suivante :

$$K_{\sigma i} \times P_{ij} = \sigma_{j\ max} \tag{5}$$

dans laquelle

$K_{\sigma i}$ est la constante permettant de prendre en compte la géométrie de l'éprouvette à effort constant ;

P_{ij} est l'amplitude de la force appliquée en tête, en Newton (N) ;

$\varepsilon_{j\ max}$ est la déformation relative maximum de l'éprouvette, correspondant au déplacement imposé en tête ;

$\sigma_{j\ max}$ est la plus forte contrainte relative de l'éprouvette, correspondant à la force appliquée en tête.

$$K_{\sigma i} = \frac{6h_i}{b_i^{\ 2} \times e_i} \tag{6}$$

dans laquelle

$K_{\sigma\ i}$ est la constante pour la prise en compte de la géométrie de l'éprouvette à force imposée (facteur en conformité avec la EN 12697-26) ;

b_i est la base, en millimètres (mm) ;

h_i est la hauteur, en millimètres (mm) ;

e_i est l'épaisseur, en millimètres (mm).

3.3.4 Symboles

Les symboles sont les suivants, avec une déformation de 1 micro-déformation (μdéformation) égale à 10^{-6} par convention :

3.3.4.1 Échantillon *i*

h_I est la hauteur, en millimètres (mm)

b_I est (A) la petite base ou (B) la base, en millimètres (mm)

e_I est l'épaisseur, en millimètres (mm)

m_I est la masse, en grammes (g)

v_I% est le vide obtenu par la méthode géométrique en pourcentage (%) de la pression atmosphérique

$K_{\sigma i}$ est la constante pour la prise en compte de la géométrie de l'éprouvette à force imposée, en millimètres puissance moins un (mm^{-1}).

3.3.4.2 Effort en tête et contrainte maximale pour l'éprouvette *i* au niveau de contrainte $\varepsilon_{j\ max}$

P_{ij} est l'amplitude de la force appliquée en tête, en Newton (N)

$\sigma_{j\ max}$ est la plus forte contrainte relative de l'éprouvette, correspondant à la force appliquée en tête.

3.3.4.3 Durée de vie en fatigue de l'éprouvette *i* au niveau de contrainte $\sigma_{j\ max}$

N_{ij} est la durée de vie en fatigue.

3.3.4.4 Durée de vie en fatigue de l'échantillon *i* pour un niveau de déformation ε_j

N_{ij} est la durée de vie conventionnelle en fatigue.

3.3.4.5 Droite de fatigue

p_σ est la pente de la droite de fatigue $\ln(\sigma_{j\ max}) = f\ (\ln(N_{ij}))$

$\hat{\sigma}_6$ est la contrainte correspondant à 10^6 cycles en mégapascals (MPa)

$s_{\sigma x/y}$ est l'estimation de l'écart-type résiduel des logarithmes naturels des durées de vie en fatigue

$\Delta\hat{\sigma}_6$ est l'intervalle de confiance de $\hat{\sigma}_6$ pour une probabilité de 95 %

N est le nombre d'essais élémentaires (nombre d'éprouvettes au niveau de contrainte $\sigma_{j\ max}$ fois le nombre de niveaux) dans lequel $N = n*l$

s_N est l'estimation de l'écart-type de $\ln(N_{ij})$

3.3.4.6 Durée de vie en fatigue d'une série de *n* éprouvettes (A) à un niveau de déformation $\varepsilon_{j\ max}$ ou (B) au niveau de contrainte $\sigma_{j\ max}$

$N_{\varepsilon jmax}$ est le nombre moyen de cycles obtenus à la contrainte $\sigma_{j\ max}$

l est le nombre de cycles au niveau de contrainte $\sigma_{j\ max}$

n est le nombre d'éprouvettes au niveau de contrainte $\sigma_{j\ max}$.

3.4 Essai de flexion trois points sur éprouvettes prismatiques

3.4.1 Symboles

Les symboles ont les significations suivantes :

$2A_t$ est l'amplitude de la fonction de contrainte approchée, en mégapascals (MPa)

$2A_t$ est l'amplitude de la fonction de déformation approchée

B est la base de mesure de l'extensomètre, en millimètres (mm)

B_t est l'angle de phase de la fonction de contrainte approchée, en radians (rad)

B_ε est l'angle de phase de la fonction de déformation approchée, en radians (rad)

D_c est le déplacement à l'instant *t* en microns (μm)

$2D_0$ est l'amplitude totale de la fonction de déplacement, en microns (μm)

DDE est la densité d'énergie dissipée, en mégapascals (MPa) ou mégajoules par mètre cube (MJ/m^3)

DE(totale) est la densité totale d'énergie dissipée durant tout l'essai, en mégajoules par mètre cube (MJ/m^3)

DDE(*x*) est la densité d'énergie dissipée au cycle *x,* en mégajoules par mètre cube (MJ/m^3)

EXT est le signal d'extensomètre instantané, en millimètres (mm)

L est la distance entre les points d'appui, en millimètres (mm)

MD est le module dynamique, en mégapascals (MPa)

N est le nombre de cycles à la fin de l'essai

P est la charge instantanée, en mégapascals (MPa)

W est la densité totale d'énergie dissipée durant tout l'essai, en mégajoules par mètre cube (MJ/m^3)

b est la largeur de l'éprouvette, en millimètres (mm)

e est l'épaisseur de l'éprouvette, en millimètres (mm)

f est la fréquence du signal, en Hertz (Hz)

m est (N – 200)/500

t est le temps, en secondes (s)

ε est la déformation instantanée ou l'amplitude demi-cyclique de la fonction de déformation au cycle 200

ε_a est la valeur approchée de la fonction de déformation

ε_c est l'amplitude cyclique de la fonction de déformation

ε_6 est la déformation à 10^6 cycles

σ est la contrainte instantanée, en mégapascals (MPa)

σ_a est la valeur approchée de la fonction de contrainte, en mégapascals (MPa)

σ_c est l'amplitude cyclique de la fonction de contrainte, en mégapascals (MPa)

Φ est l'angle de différence de déphasage, en degrés (°).

3.5 Essai de flexion quatre points sur éprouvettes prismatiques

3.5.1
module de rigidité (complexe)
rapport $s = s_{mix,n} \times e^{i\phi}$ entre la contrainte et la déformation dans l'éprouvette, calculées au cycle *n*.

NOTE Le module de rigidité définit la relation entre la contrainte et la déformation pour un matériau viscoélastique soumis à une charge sinusoïdale.

3.5.2
module de rigidité (complexe) initial
valeurs en mégapascals (MPa) pour le module initial $s_{mix,0}$ du module complexe et pour le retard de phase initial ϕ_0 en degrés du module complexe pris à la 100e application de charge

3.5.3
durée de vie en fatigue $N_{i,j,k}$
le nombre de cycles pour l'éprouvette *i,* correspondant aux critères de rupture choisis *j* (par exemple, rupture conventionnelle $j = f/50$) aux conditions d'essai *k* (température, fréquence et mode de chargement, par exemple à flèche constante, ou à effort constant et ou toute autre condition de charge constante)

3.5.4
conditions d'essai *k*
ensemble des conditions d'essais d'une éprouvette. Cet ensemble comprend la fréquence appliquée f_0, la température d'essai Θ et le mode de chargement (flèche constante ou force constante et/ou énergie dissipée constante par cycle)

3.5.5
durée de vie moyenne en fatigue d'une série d'éprouvettes
la valeur définie selon les critères de rupture *j* sur une série de m éprouvettes soumises à des conditions d'essai *k* donnée par l'équation :

$$\overline{N}_{\bar{J},\bar{k}} = \frac{e^{\sum_{i=1}^{m} \ln\left(N_{i,j,k}\right)}}{m} \qquad (7)$$

3.5.6
écart-type de la durée de vie en fatigue d'une série d'éprouvettes
logarithme naturel de la durée de vie moyenne en fatigue pour un critère de rupture *j* sous des conditions d'essai *k* donné par l'équation :

$$St_{j,k} = \frac{1}{(m-1)} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \left(\ln\left(N_{i,j,k}\right) - \ln\left(\overline{N}_{\bar{j},\bar{k}}\right)\right)^2} \qquad (8)$$

3.5.7
longueur totale L_{tot}
longueur totale de l'éprouvette prismatique, en millimètres (mm)

3.5.8
longueur utile *L*
distance entre les deux brides de maintien extérieures, en millimètres (mm)

3.5.9
largeur *B*
largeur de l'éprouvette prismatique, en millimètres (mm)

3.5.10
hauteur *H*
hauteur de l'éprouvette en forme de prisme, en millimètres (mm)

3.5.11
longueur médiane *a*
distance entre les deux brides intérieures, en millimètres (mm)

3.5.12
coordonnée *A*
distance entre la bride extérieure gauche ($x = 0$) et la bride intérieure gauche ($x = A$) en millimètres (mm)

3.5.13
coordonnée *x*
distance entre x et la bride extérieure gauche ($0 \leq x \leq L/2$), en millimètres (mm)

3.5.14
coordonnée x_s
coordonnée x à laquelle la flèche est mesurée ($A \leq x_s \leq L/2$), en millimètres (mm)

3.5.15
masse volumique ρ
masse volumique géométrique de l'éprouvette, en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3)

$$\rho = \frac{M_{\text{beam}} \times 10^9}{(H \times L \times B)} \tag{9}$$

3.5.16
masse M_{beam}
masse totale de la poutre prismatique, en kilogrammes (kg)

3.5.17
coefficient d'adaptation *T*
coefficient nécessaire pour le calcul des pertes du système, en kilogrammes par seconde (kg/s)

NOTE Ce coefficient ne peut être établi qu'en réglant le matériel à l'aide d'une poutre de référence dont le module de rigidité et l'angle de phase (du matériau) sont connus. Avec un matériel en bon état de fonctionnement, le coefficient *T* peut être négligé (on adoptera en ce cas la valeur zéro).

3.5.18
fonction de pondération *R(x)*
fonction sans dimensions dépendant de la distance *x* par rapport à la bride extérieure gauche, de la coordonnée *A* de la bride intérieure gauche et de la longueur effective *L* entre les deux brides extérieures :

$$R(x) = \frac{12L^3}{A \times \left(3L \times x - 3x^2 - A^2\right)} \tag{10}$$

3.5.19
masse équivalente M_{eq}
masse pondérée en kilogrammes (kg) des pièces en mouvement de la poutre (M_{beam}), du capteur (M_{sensor}) et des brides (M_{clamp}) dont la valeur dépend de l'endroit où la flèche $Z(x_{\text{s}})$ est mesurée :

$$M_{\text{eq}} = \frac{R\left(x_{\text{s}}\right)}{\pi^4} \times M_{\text{beam}} + \frac{R\left(x_{\text{s}}\right)}{R(A)} \times M_{\text{clamp}} + M_{\text{sensor}} \tag{11}$$

3.5.20
coefficient d'adaptation équivalent
coefficient pondéré pour l'amortissement dans le système, en kilogrammes par seconde (kg/s), dont la valeur dépend de l'endroit où la flèche $Z(x_{\text{s}})$ est mesurée

$$T_{\text{eq}} = \frac{R\left(x_{\text{s}}\right)}{R(A)} \times T \tag{12}$$

3.5.21
flèche $Z(x_{\text{s}})$
amplitude de la flèche de la poutre pendant un cycle, mesurée sur ou entre les deux brides intérieures à une distance x_{s} de la bride extérieure gauche, en millimètres (mm)

3.5.22
effort F_0
amplitude de l'effort total au niveau des deux brides intérieures en Newtons (N)

3.5.23
fréquence f_0 [Hz] et pulsation angulaire ω_0 [rad/s]
fréquence de la charge sinusoïdale appliquée :

$$\omega_0 = 2\pi \times f_0 \tag{13}$$

3.5.24
fonction d'inertie $I(x_s)$
fonction sans dimensions dépendant de la distance x_s pour tenir compte des effets d'inertie de masse :

$$I\left(x_s\right) = M_{eq} \times \frac{Z\left(x_s\right)}{F_0} \times \omega_0^2 \times 10^{-3} \tag{14}$$

3.5.25
fonction d'amortissement $J(x_s)$
fonction sans dimensions dépendant de la distance x_s pour tenir compte des effets d'amortissement (non visqueux) dans le système (pertes du système) :

$$J\left(x_s\right) = T_{eq} \times \frac{Z\left(x_s\right)}{F_0} \times \omega_0 \times 10^{-3} \; . \tag{15}$$

3.5.26
déphasage mesuré $\varphi^*(x_s)$
retard de phase mesuré en degrés pendant un cycle entre la charge sinusoïdale appliquée et la flèche mesurée $Z(x_s)$

3.5.27
déphasage système $\theta(x_s)$
retard de phase calculé en degrés pendant un cycle représentant les pertes du système :

$$\tan\left(\theta \times \frac{\pi}{180}\right) = \frac{T_{eq} \times \omega_0}{M_{eq} \times \omega_0^2} \tag{16}$$

3.5.28
déphasage ϕ
retard de phase calculé en degrés pendant un cycle entre la contrainte et la déformation, apparaissant dans l'éprouvette à la fréquence appliquée :

$$\tan\left(\phi \times \frac{\pi}{180}\right) = \frac{\sin\left(\phi^*\left(x_s\right) \times \frac{\pi}{180}\right) - J\left(x_s\right)}{\cos\left(\phi^*\left(x_s\right) \times \frac{\pi}{180}\right) + I\left(x_s\right)} \tag{17}$$

3.5.29
module S_{mix} du module (de rigidité) complexe ou du module dynamique de rigidité
module calculé du module complexe pour l'éprouvette pendant un cycle, en mégapascals (MPa) :

$$S_{mix} = \frac{12F_0 \times L^3}{Z(x_s) \times R(x_s) \times B \times H^3} \times \sqrt{1 + 2\left[\cos\left(\phi^*(x_s)\right) \times I(x_s) - \sin\left(\phi^*(x_s)\right) \times J(x_s)\right] + \left[I^2(x_s) + J^2(x_s)\right]} \quad (18)$$

3.5.30
constante *K* correspondant à la contrainte (maximum)
constante qui permet le calcul de l'amplitude de la contrainte de flexion maximum à l'endroit où la flèche est mesurée, en millimètres puissance moins un (mm^{-1}) :

$$K(x_s) = \frac{H \times A}{4L^3} \times R(x_s) \quad (19)$$

3.5.31
amplitude de déformation $\varepsilon = \varepsilon(x_s)$
amplitude de déformation maximale qui apparaît au cours d'un cycle entre les deux brides intérieures, en microns par mètre (µm/m) :

$$\varepsilon = K(x_s) \times Z(x_s) \times 10^6 \quad (20)$$

3.5.32
amplitude de contrainte σ
amplitude de contrainte maximale qui apparaît au cours d'un cycle entre les deux brides intérieures, en mégapascals (MPa) :

$$\sigma = S_{mix} \times \varepsilon \quad (21)$$

3.5.33
énergie dissipée par cycle
l'énergie visqueuse dissipée dans la poutre par unité de volume ΔW_{dis} et par cycle, en kilojoules par mètre cube (KJ/m^3), pour des signaux de contrainte et de déformation sinusoïdaux est

$$\Delta W_{dis} = \pi \times \varepsilon \times \sigma \times \sin\left(\phi(x_s) \times \frac{\pi}{180}\right) \quad (22)$$

3.5.34
énergie dissipée cumulée
somme des énergies dissipées par cycle jusqu'au cycle *n* :

$$W_{dis,n(m)} = \sum_{i=1}^{n} \Delta W_{dis,i} \quad (23)$$

NOTE Si les mesures sont faites à intervalles *n*(*i*), il est conseillé d'utiliser la règle des trapèzes :

$$W_{dis,n(m)} = n(1) \times \Delta W_{dis,n(1)} + \sum_{i=1}^{m}\left[0{,}5 \times (n(i+1) - n(i)) \times \left(\Delta W_{dis,n(i+1)} + \Delta W_{dis,n(i)}\right)\right] \quad (24)$$

3.5.35
amplitude
la moitié de la différence entre le maximum et le minimum d'un signal sinusoïdal mesurés pendant un cycle

3.5.36
erreur de mesure
différence entre la valeur vraie d'une quantité physique et la valeur indiquée par l'instrument de mesure, exprimée en pourcentage (%) de la valeur vraie

3.5.37
classe d'exactitude
erreur maximale tolérée du signal de sortie d'un transducteur ou d'un capteur

3.5.38 Symboles
Les symboles ont les significations suivantes :

A_1 est l'estimation de la pente p

A_0 est l'estimation du niveau de la charge Q

B est la largeur de l'éprouvette prismatique, en millimètres (mm)

D est la granularité nominale maximum du mélange soumis à essai, en millimètres (mm)

H est la hauteur de l'éprouvette prismatique, en millimètres (mm)

L est la longueur utile de l'éprouvette prismatique, en millimètres (mm)

L_{tot} est la longueur totale de l'éprouvette prismatique, en millimètres (mm)

M_{beam} est la masse du poutre complet, sans les masses des brides montées, en grammes (g)

M_{clamp} est la masse des deux brides intérieures, y compris la masse de la colle et la masse du cadre de chargement entre la cellule dynamométrique et le vérin, en grammes (g)

M_{sensor} est la masse des pièces mobiles du capteur, en grammes (g)

M_{eq} est la masse équivalente, en grammes (g)

$N_{i,j,k}$ est la durée de vie de l'éprouvettes numéro i selon les critères de rupture choisis j et pour l'ensemble des conditions d'essai

K est le nombre de cycles

$N_{f/50}$ est le nombre d'applications de charge lors de la rupture conventionnelle, lorsque le module du module (complexe) de rigidité a diminué de moitié par rapport à sa valeur initiale.

Q est le niveau des conditions d'essai du mode de chargement correspondant à une durée de vie en fatigue de 10^6 cycles selon les critères de rupture choisis, k

ΔQ est l'intervalle de confiance de Q

S_{mix} est la valeur calculée du module initial

$S_{x/y}$ est l'estimation de l'écart-type de la dispersion résiduelle des logarithmes népériens des durées de vie en fatigue, $\sigma_{x/y}$

T est le coefficient tenant compte pertes du système dans les équations d'interprétation du module de Young

f_0 est la fréquence des applications de charges sinusoïdales

p est la pente de la droite de fatigue

r est le coefficient de régression

x est la distance depuis l'extrémité de l'échantillon, en millimètres (mm)

x_s est la distance depuis l'extrémité de l'éprouvette jusqu'à l'endroit où est placé le capteur, en millimètres (mm)

ε_i est l'amplitude de déformation initiale mesurée au 100e cycle de charge

ω_0 est la fréquence d'essai

Θ est la température d'essai, en degrés Celsius (°C).

3.6 Essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques

3.6.1 Symboles

Les symboles ont les significations suivantes :

ΔH est la déformation horizontale, en millimètres (mm)

N_f est le nombre d'applications de charges correspondant à durée de vie en fatigue

P est la charge maximale, en Newtons (N)

k, n sont des constantes du matériau

t est l'épaisseur de l'éprouvette en millimètres (mm)

σ_o est la contrainte de traction au centre de l'éprouvette, en mégapascals (MPa)

ε_o est la déformation de traction en $\mu\varepsilon$ au centre de l'éprouvette

Ω est le diamètre de l'éprouvette en millimètres (mm)

$\mu\varepsilon$ est la micro-déformation = 10^{-6} déformation.

4 Rupture

Les critères de rupture conventionnels du type d'essai réalisé, tels que définis en 3.1, doivent être utilisés pour déterminer la durée de vie avant rupture d'un matériau, sauf indications contraires. En de tels cas, les critères utilisés doivent être mentionnés au rapport d'essai.

5 Calculs

Les charges d'essai et les fréquences doivent être choisies de telle manière que les résultats soient calculés par interpolation et non par extrapolation.

6 Résumé des procédures

6.1 Essai de flexion deux points sur éprouvettes trapézoïdales

Cette méthode caractérise le comportement des mélanges bitumineux en fatigue sous chargement à déplacement imposé par flexion en deux points, en utilisant des éprouvettes de forme trapézoïdale. La méthode peut être utilisée pour des mélanges bitumineux d'une dimension des granulats maximale de 20 mm, sur des éprouvettes préparées en laboratoire ou provenant de chaussées d'une épaisseur d'au moins 40 mm. Pour les mélanges d'une dimension supérieure *D*, allant de 20 mm à 40 mm, l'essai peut être réalisé en utilisant le même principe, mais avec des éprouvettes de taille adaptée. Pour une fréquence donnée de déplacement sinusoïdal, la méthode doit être appliquée à plusieurs éprouvettes soumises à essai en atmosphère ventilée et à température régulée.

6.2 Essai de flexion deux points sur éprouvettes prismatiques

Cette méthode caractérise le comportement des mélanges bitumineux en fatigue sous chargement par flexion en deux points en utilisant des éprouvettes en forme de prisme quadrangulaire. La méthode peut être utilisée pour des mélanges bitumineux d'une dimension de granulat maximale de 20 mm, sur des éprouvettes préparées en laboratoire, ou provenant de chaussées d'une épaisseur d'au moins 40 mm.

6.3 Essai de flexion trois points sur éprouvettes prismatiques

Cette méthode caractérise le comportement des mélanges bitumineux en fatigue sous chargement avec déplacement imposé par flexion en trois points, en utilisant des éprouvettes en forme de poutre prismatique. Le comportement est caractérisé par la détermination de la loi de fatigue en termes de déformation (relation entre la déformation et le nombre de cycles de charge à la rupture) et la loi d'énergie associée. La méthode peut être utilisée pour des éprouvettes de mélanges bitumineux d'une dimension de granulat maximale de 22 mm ou pour des échantillons provenant de chaussées d'une épaisseur d'au moins 50 mm.

Pour une fréquence donnée de déplacement sinusoïdal, la méthode doit être appliquée à plusieurs éprouvettes soumises à essai à température régulée.

6.4 Essai de flexion quatre points sur éprouvettes prismatiques

Cette méthode caractérise le comportement des mélanges bitumineux en fatigue sous chargement au moyen d'un matériel d'essai de flexion en quatre points dans lequel les brides intérieures et extérieures sont disposées symétriquement et en utilisant des éprouvettes rectangulaires minces (poutres prismatiques). Le poutre prismatique doit être soumis à une flexion périodique en quatre points, avec rotation et translation libres à tous les points de charge et de réaction. La flexion doit être réalisée en chargeant les deux points de charge intérieurs (brides intérieures) dans la direction verticale, perpendiculairement à l'axe longitudinal du poutre. La position verticale des appuis d'extrémité (brides extérieures) doit être fixe. Cette configuration de charge doit créer un moment constant et de ce fait une déformation constante, entre les deux brides intérieures. La charge appliquée doit être sinusoïdale. Pendant l'essai, la charge nécessaire pour la flexion de l'éprouvette, la flèche et le déphasage entre ces deux signaux doivent être mesurés en fonction du temps. Les caractéristiques de fatigue du matériau soumis à essai doivent être déterminées à partir de ces mesures.

6.5 Essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques

Cette méthode caractérise le comportement des mélanges bitumineux en fatigue sous chargements répétés avec de valeur constante, par une méthode de traction indirecte. Une éprouvette cylindrique fabriquée en laboratoire ou carottée dans une couche d'enrobé peut être utilisée pour cet essai. Une éprouvette d'essai de forme cylindrique doit être soumise à des charges de compression répétées selon un signal de chargement en sinus carré dans le plan diamétral vertical. Cette charge développe une contrainte de traction relativement uniforme, perpendiculairement à la direction de la charge appliquée et le long du plan diamétral vertical, ce qui provoque la rupture de l'éprouvette qui se fend sur la partie centrale du diamètre vertical. La déformation horizontale de l'éprouvette qui en résulte doit être mesurée et un coefficient de Poisson au pifomètre doit être utilisé pour calculer la déformation en traction au centre de l'éprouvette. La durée de vie à la rupture doit être définie comme étant le nombre total d'applications de charge avant effondrement de l'éprouvette.

7 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit comporter :

a) l'identification du mélange ;

b) la date de réalisation de l'essai ;

c) le pourcentage de vide moyen de l'éprouvette (EN 12697-8) ;

d) la méthode de fabrication ou d'échantillonnage (le cas échéant) ;

e) les conditions de l'essai de fatigue (température, fréquence, etc.) ;

f) les critères de rupture choisis (si différents des critères de rupture conventionnels) ;

g) le nombre moyen de cycles et l'écart-type obtenu pour chaque niveau de déformation ou de contrainte ;

h) la représentation de la droite de fatigue ;

i) le titre de l'annexe appropriée du présent document ;

j) les autres résultats exigés dans l'annexe appropriée ;

k) les informations de détail non précisées dans ce document ;

l) tout incident pouvant affecter les résultats.

Annexe A
(normative)
Essai de flexion en deux points sur des éprouvettes de forme trapézoïdale

A.1 Principe

A.1.1 Généralités

A.1.1.1 Cette annexe décrit une méthode pour caractériser le comportement des mélanges bitumineux en fatigue, sous chargement à déplacement imposé par flexion deux points en utilisant des éprouvettes de forme trapézoïdale.

A.1.1.2 La méthode peut être utilisée pour des mélanges bitumineux d'une dimension granulaire maximale de 20 mm sur des éprouvettes préparées en laboratoire, ou provenant de couches de chaussées d'une épaisseur d'au moins 40 mm. Pour les mélanges d'une dimension granulaire supérieure *D*, comprise entre 20 mm et 40 mm, l'essai peut être réalisé en utilisant le même principe, mais avec des éprouvettes de dimensions adaptées.

A.1.1.3 Pour une fréquence donnée de déplacement sinusoïdal, la méthode doit être appliquée à plusieurs corps d'épreuve soumis à essai en atmosphère ventilée à température contrôlée.

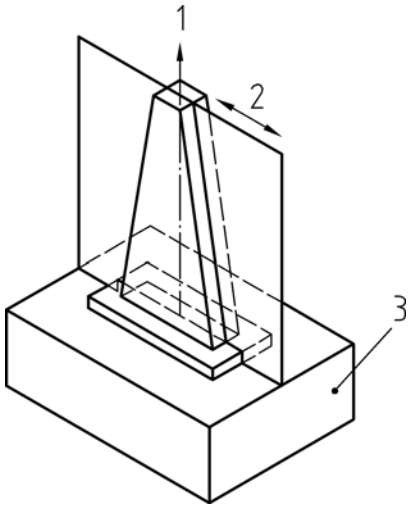
A.1.2 Essai élémentaire

Un essai élémentaire doit consister à :

— imposer un déplacement sinusoïdal d'amplitude constante en tête d'un corps d'épreuve console trapézoïdal isocèle, comme le montre la Figure A.1 ;

— enregistrer ce faisant, les variations d'amplitude de l'effort en tête, en fonction de la réaction du corps d'épreuve ;

— mesurer la durée de vie du corps d'épreuve en détectant que les critères de rupture sont atteints.



Légende

1 Amplitude de la force en tête relative à la réaction de l'éprouvette

2 Déplacement sinusoïdal à amplitude constante

3 Rainure dans le socle métallique

Figure A.1 — Déplacement sinusoïdal en tête de l'éprouvette

A.1.3 Droite de fatigue

La droite de fatigue doit être tracée en fonction des différentes amplitudes de déplacement auxquelles les essais élémentaires pour un mélange ont été faits. La droite de fatigue doit être estimée dans un système bi-logarithmique en tant que régression linéaire de la durée de vie en fatigue par rapport aux niveaux d'amplitude. La déformation ε_6, correspondant à une moyenne de 10^6 cycles et la pente de la droite de fatigue $1/b$ doivent être déterminées à partir de ces résultats. L'écart-type résiduel des durées de s_N et l'indice de qualité de ε_6, $\Delta\varepsilon_6$ peuvent aussi être calculés.

A.2 Appareillage

A.2.1 Machine d'essai

La machine d'essai doit se composer d'un système permettant d'appliquer un déplacement sinusoïdal en tête de l'éprouvette à une fréquence fixée. La variation de déplacement pendant l'essai doit être inférieure à 0,1 µm/*N*. La machine d'essai doit être capable d'appliquer aux éprouvettes une fréquence de chargement de (25 ± 1) Hz et si nécessaire pour des besoins particuliers, d'autres fréquences ± 4 %.

NOTE Si une fréquence autre que 25 Hz est utilisée, elle devra être indiquée dans le rapport d'essai. Les résultats provenant d'essais réalisés à des fréquences différentes ne seront pas directement comparables.

A.2.2 Enceinte thermostatique

L'enceinte thermostatique doit être ventilée et capable de faire en sorte que la température du socle métallique des éprouvettes et la température moyenne du flux d'air à une distance d'une dizaine de millimètres des éprouvettes soient régulées avec une exactitude de ± 1 °C, pendant toute la durée de l'essai.

A.2.3 Dispositif de mesure

A.2.3.1 *Force*

Le dispositif de mesure de la force en tête des éprouvettes doit avoir une exactitude de ± 2 % pour des valeurs ≥ 200 N et une exactitude de ± 2 N pour des valeurs < 200 N.

A.2.3.2 *Déplacement*

Le dispositif de mesure des déplacements en tête des éprouvettes au moyen de capteurs doit être capable de mesurer en statique avec une exactitude d'au moins $\pm 1{,}5 \times 10^{-6}$ m. Si le calibrage est fait par une méthode statique, l'indication de déplacement en dynamique doit être égale à celle obtenue en statique à moins de 2 %.

A.3 Préparation des éprouvettes

A.3.1 Découpe et entreposage

A.3.1.1 Les éprouvettes doivent avoir une forme trapézoïdale isocèle et une épaisseur constante, comme le montre la Figure A.2 avec les dimensions données dans le Tableau A.1.

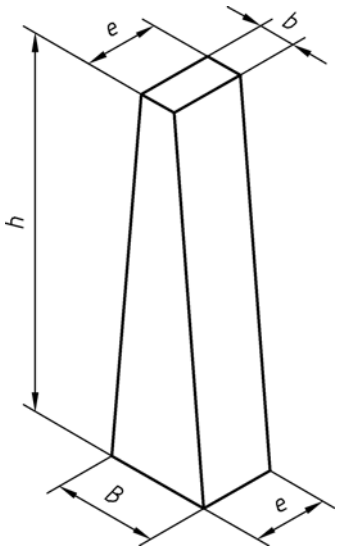


Figure A.2 — Géométrie des éprouvettes

Tableau A.1 — Dimensions des éprouvettes

Dimensions des éprouvettes	Type de mélange		
	D **≤ 14 mm**	**14 < *D* ≤ 20 mm**	**20 < *D* ≤ 40 mm**
B	(56 ± 1) mm	(70 ± 1) mm	(70 ± 1) mm
b	(25 ± 1) mm	(25 ± 1) mm	(25 ± 1) mm
e	(25 ± 1) mm	(25 ± 1) mm	(50 ± 1) mm
h	(250 ± 1) mm	(250 ± 1) mm	(250 ± 1) mm

A.3.1.2 Les éprouvettes soumises à l'essai doivent être obtenues, par sciage de plaques fabriquées en laboratoire selon ▌A1⟩ EN 12697-33:2003+A1 ⟨A1▐, de plaques ou de carottes d'un diamètre minimal de 200 mm provenant de couches de chaussées. Les plaques doivent être de dimensions adéquates (voir Tableau A.1) et doivent avoir une épaisseur d'au moins 40 mm.

A.3.1.3 Les éprouvettes doivent être entreposées sur une surface plane et protégées du soleil, à une température < 30 °C, dans des conditions qui évitent le gauchissement.

A.3.2 Caractéristiques des éprouvettes

Les éprouvettes doivent être mesurées avec une exactitude de 0,1 mm. L'écart-type sur v_i % doit être ≤ 0,7 %.

A.3.3 Contrôle d'encastrement

Les éprouvettes doivent être encastrées selon une procédure conforme à la procédure de vérification d'encastrement.

La vérification d'encastrement doit être réalisé en utilisant une éprouvette de section rectangulaire (13,5 ± 1) mm × (30 ± 1) mm, fabriquée en alliage aluminium de type EN W 017T4 et d'une longueur minimum de 220 m (exemple dans la Figure A.3). L'éprouvette métallique doit être fixée sur la machine d'essai. Un effort d'environ 200 N doit être appliqué en tête. Le déplacement et la déformation doivent être enregistrés. L'éprouvette métallique doit être fixée sur un cadre en acier en forme de *L*, de section supérieure à 80 mm × 80 mm. Un effort doit être appliqué en tête de l'éprouvette pour que la déformation mesurée soit égale à la déformation enregistrée sur la machine d'essai avec une exactitude de ± 1 %. Le déplacement ne doit pas différer de plus de 5 %. Exemple de dispositif en Figure A.4.

NOTE D'autres procédures peuvent être utilisées si elles peuvent donner les mêmes résultats.

Dimensions en millimètres

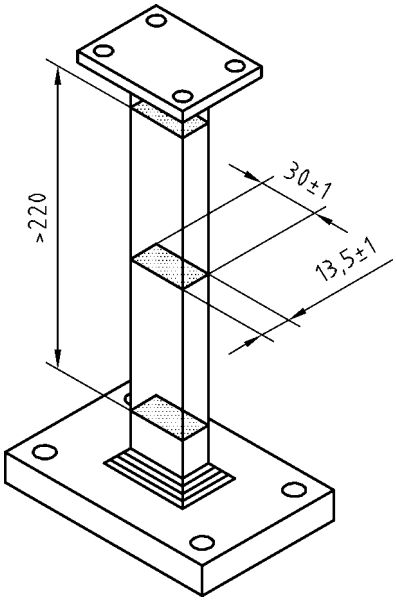
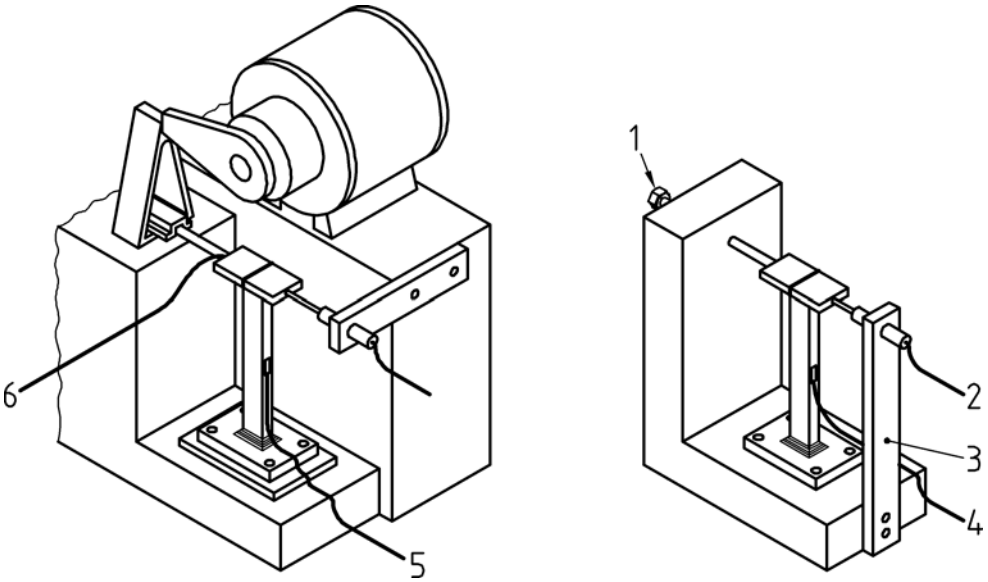


Figure A.3 — Exemple d'une éprouvette en alliage d'aluminium



Légende

1 Vis pour appliquer la déformation

2 Mesure de la flèche

3 Support

4 Déformation mesurée par jauge

5 Déformation enregistrée

6 Contrainte enregistrée

Figure A.4 — Exemple d'instrumentation pour vérification de la procédure d'encastrement

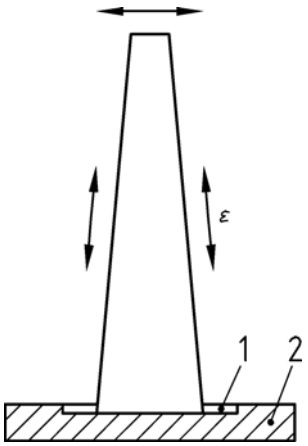
A.3.4 Stabilisation des éprouvettes

Les éprouvettes doivent être soumises à essai entre 2 semaines et 8 semaines après la date de découpe.

A.3.5 Collage des extrémités

Avant le passage sur les machines d'essai, la grande base de chaque éprouvette doit être fixée par collage dans une rainure (de 2 mm de profondeur environ) d'un socle métallique ayant une épaisseur minimale de 20 mm, comme le montre la Figure A.5. Cette opération doit être effectuée sur un banc de collage permettant de positionner correctement l'éprouvette sur le bâti. Le film de colle doit être aussi fin que possible. D'autres modes de fixation pourront être utilisés à condition qu'il soit démontré qu'il n'y a pas de déplacement à la base de l'échantillon.

NOTE Un casque collé sur la tête de l'éprouvette permet l'application du déplacement.



Légende

1 Rainure d'environ 2 mm

2 Socle métallique

Figure A.5 — Fixation de l'éprouvette

A.4 Procédure

A.4.1 Préparation du dispositif d'essai

A.4.1.1 L'enceinte thermostatique et le dispositif d'essai doivent être portés à la température d'essai. Pour chaque éprouvette *i*, le déplacement en tête souhaité doit être calculé en utilisant l'équation suivante :

$$z_i = \frac{\varepsilon_i}{K_i} \qquad \text{(A.1)}$$

A.4.1.2 L'éprouvette à essayer doit être alors montée sur la machine d'essai. Le réglage du déplacement doit être réalisé à ± 5 μm. Si une éprouvette métallique est utilisée pour régler le déplacement, elle doit être du même type que l'éprouvette métallique décrite en A.2.1. L'essai de fatigue ne doit pas commencer avant vérification que la température d'essai est atteinte dans l'éprouvette (si nécessaire en utilisant une éprouvette factice).

NOTE Les éprouvettes ne devront en aucune façon avoir subi de maltraitances au préalable, car les résultats pourraient être faussés.

A.4.2 Exécution de l'essai de fatigue

L'éprouvette *i* doit être soumise à un déplacement sinusoïdal en tête de l'amplitude de déplacement imposée ± 5 µm, jusqu'à atteindre les critères de rupture. Entre 100 cycles et 500 cycles, les forces de réaction doivent être enregistrées avec une exactitude de ± 2 % et la force de réaction moyenne doit être calculée. Le déplacement z_i doit être mesuré et ε_i doit être calculé pour cet essai élémentaire. Le nombre de cycles N_i nécessaire pour atteindre les critères de rupture, doit être mesuré avec une exactitude de 300 cycles.

NOTE La force de réaction moyenne entre 100 cycles et 500 cycles se définit comme la valeur initiale de la force de réaction.

A.4.3 Choix des seuils de déformation

A.4.3.1 Les déformations ε_i doivent être sélectionnées pour que :

— les valeurs soient approximativement espacées de manière régulière sur une échelle logarithmique, ou

— qu'il y ait au moins 3 niveaux de déformation, avec un nombre d'éprouvettes homogène (à 1 ou 2 éprouvettes près) à chaque niveau. Les valeurs moyennes doivent être approximativement espacées de manière régulière sur une échelle logarithmique.

A.4.3.2 Les déformations doivent être telles qu'au moins un tiers des essais élémentaire donnent des résultats avec $N \leq 10^6$ et qu'au moins un tiers des essais élémentaire donnent des résultats avec $N \geq 10^6$. Lorsque ce n'est pas le cas, il faudra effectuer de nouveaux essais élémentaires.

A.4.4 Nombre d'essais élémentaires

Il faut au moins 18 essais élémentaires pour déterminer le résultat.

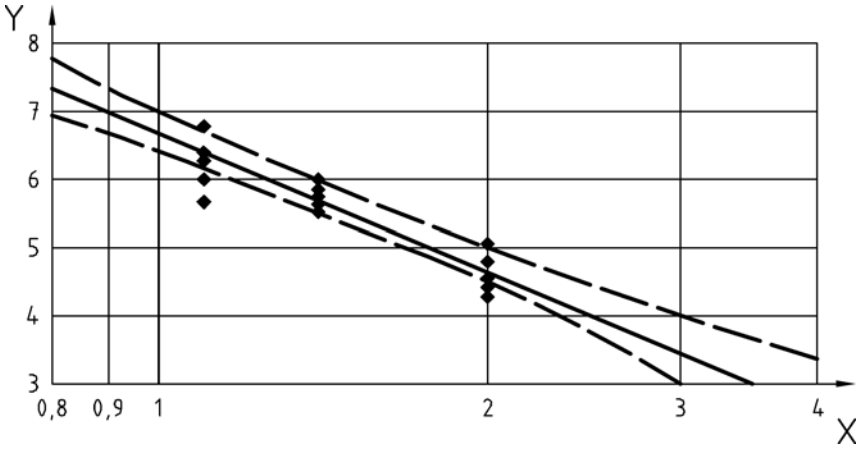
A.5 Calcul et expression des résultats

A.5.1 A partir des résultats représentant la durée de vie N_i pour ε_i défini, la droite de fatigue doit être tracée en faisant une régression linéaire entre les logarithmes décimaux de N_i et les logarithmes décimaux de ε_i ayant la forme suivante :

$$\lg(N) = a + \left(\frac{1}{b}\right) \times \lg(\varepsilon) \qquad \text{(A.2)}$$

avec un coefficient de corrélation r_2.

NOTE Un exemple de droite de fatigue est schématisé dans la Figure A.6, dans laquelle les axes sont à l'inverse de la direction dans laquelle ils sont le plus souvent représentés, pour que la pente corresponde à celle qui a été définie pour l'essai.



Légende

Y lg(*N*)

X lg(ε/10 000)

N Nombre de cycles de chargement

ε Déformation

Figure A.6 — Exemple de droite de fatigue

A.5.1 **A.5.2** Pour *n* résultats, calculer ce qui suit :

— l'estimation de la déformation après 10^6 cycles

$$\varepsilon_6 = 10^{b \times (6-a)} \quad \text{... (A.3)}$$

— l'estimation de l'écart-type résiduel S_N

$$S_N = S_{\lg(N)} \times \sqrt{\frac{\left(1 - r_2^2\right) \times (n-1)}{(n-2)}} \quad \text{(A.4)}$$

— l'indice qualité $\Delta\varepsilon_6$

$$\Delta\varepsilon_6 = 0{,}5\ \varepsilon_6 \times \left(10^{-2b \times S_0} - 10^{2b \times S_0}\right) \quad \text{(A.5)}$$

où

$$S_0 = S_N \sqrt{\left[\frac{1}{n} + \frac{\left(\lg\left(\varepsilon_6\right) - \lg(\varepsilon)\right)^2}{(n-1) \times S_{\lg(\varepsilon)}^2}\right]} \quad \text{(A.6)}$$

A.6 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit inclure les éléments dont la liste est indiquée au paragraphe 7 avec :

a) ε_6 ;

b) $\Delta\varepsilon_6$;

c) la pente *l/b ;*

d) l'estimation de l'écart-type résiduel s_N ;

e) le coefficient de corrélation r_2.

NOTE 1 résultat d'essai s'entend pour des mesures sur au moins 18 éprouvettes individuelles.

A.7 Fidélité

A.7.1 Généralités

La reproductibilité et la répétabilité de la méthode d'essai flexion deux points sur éprouvettes isocèles, ont été déterminées selon la norme ISO 5725-2 dans 11 laboratoires de 3 pays européens utilisant des appareillages différents. L'expérimentation a été faite en 2001 sur du béton bitumineux AC 14 à 10 °C et à 25 Hz.

A.7.2 Résultats concernant ε_6 :

— répétabilité, écart-type, σ_r = 1,43 μdéformation ;

— répétabilité, limite à 95 %, r = 4,2 μdéformation ;

— reproductibilité, écart-type, σ_R = 1,43 μdéformation ;

— reproductibilité, limite à 95 %, R = 8,3 μdéformation ;

A.7.3 Résultats pour *l/b* :

— répétabilité, écart-type, σ_r = 0,021 3 ;

— répétabilité, limite à 95 %, r = 0,060 2 ;

— reproductibilité, écart-type, σ_R = 0,022 7 ;

— reproductibilité, limite à 95 %, R = 0,064 2.

Annexe B
(normative)
Essai de flexion en deux points sur des éprouvettes prismatiques

B.1 Principe

Cette annexe décrit une méthode pour caractériser le comportement des mélanges bitumineux en fatigue, par flexion en deux points en utilisant des éprouvettes prismatiques quadrangulaires. La méthode peut être utilisée pour des mélanges bitumineux d'une dimension granulaire maximale de 20 mm, sur des éprouvettes préparées en laboratoire ou provenant de couches de chaussées d'une épaisseur d'au moins 40 mm.

B.2 Appareillage

B.2.1 Machine d'essai

La machine d'essai doit être constituée d'un système permettant d'appliquer un déplacement sinusoïdal en tête de l'éprouvette à une fréquence fixée. La variation de déplacement pendant l'essai doit être inférieure à 0,1 μm/N. La machine d'essai doit être capable d'appliquer aux éprouvettes un déplacement à une fréquence de (25 ± 1) Hz et si nécessaire pour des besoins particuliers, à d'autres fréquences ± 4 %.

NOTE Si une fréquence autre que 25 Hz est utilisée, elle devra être indiquée dans le rapport d'essai. Les résultats provenant d'essais réalisés à des fréquences différentes ne seront pas directement comparables.

B.2.2 Enceinte thermostatique

L'enceinte thermostatique doit être ventilée et capable de faire en sorte que la température du socle métallique des éprouvettes et la température moyenne du flux d'air à une distance d'une dizaine de millimètres des éprouvettes soient régulées avec une tolérance de ± 1 °C, pendant toute la durée de l'essai. Si la machine d'essai est entièrement contenue dans la chambre thermostatique, la température du socle métallique des éprouvettes doit satisfaire aux mêmes conditions que le flux d'air. Cette température doit être ensuite enregistrée à la place de la température de l'air. L'enceinte doit être étalonnée avec une exactitude de 0,5 °C.

B.2.3 Dispositifs de mesure

B.2.3.1 Force

Le dispositif pour mesurer la force, doit déterminer l'effort en tête des éprouvettes avec une exactitude de ± 1 N, à partir de la consommation de courant électrique du balancier électrodynamique utilisé. Il doit comporter un système pour enregistrer les forces mesurées.

B.2.3.2 Déplacement

Le dispositif permettant de mesurer les déplacements en tête des éprouvettes à l'aide de capteurs doit pouvoir mesurer avec une exactitude d'au moins ± 10^{-3} m. Il doit comporter un système pour enregistrer les déplacements mesurés.

B.2.3.3 Température

Les sondes pour la mesure de température du socle métallique de l'éprouvette doivent avoir une exactitude de 0,1 °C. Le dispositif doit comporter un système pour enregistrer les températures mesurées.

B.3 Préparation de l'éprouvette

B.3.1 Découpe et entreposage

Les éprouvettes doivent être de la forme d'une poutre carrée. Leurs dimensions doivent être celles qui figurent dans le Tableau B.1. Les éprouvettes doivent être obtenues par sciage de plaques fabriquées en laboratoire selon la norme ▌A1⟩ EN 12697-33:2003+A1 ⟨A1▐, de plaques d'une épaisseur minimum de 40 mm provenant ou de carottes d'un diamètre minimum de 200 mm provenant de couches de chaussées. L'axe longitudinal de la plaque doit être parallèle à l'axe de compactage. Les éprouvettes doivent être entreposées sur une surface plane et protégées du soleil à une température de (20 ± 2) °C, dans des conditions qui évitent le gauchissement.

Tableau B.1 — Dimensions de l'éprouvette (B)

Dimensions des éprouvettes mm	**Type de mélange**	
	D **≤ 22 mm**	***D*** **> 22 mm**
b	40 ± 1	80 ± 1
e	40 ± 1	80 ± 1
h	160 ± 1	320 ± 1

B.3.2 Caractéristiques des éprouvettes

Les éprouvettes doivent être mesurées avec une exactitude de 0,1 mm. L'écart-type sur ν_i % doit être ≤ 0,5 %.

Si la variation du coefficient géométrique de l'éprouvette est $K_{\sigma i}$ ≤ ?1 %, le déplacement appliqué en tête par niveau de contrainte doit être le même à tous les niveaux de contrainte.

B.3.3 Stabilisation des éprouvettes

Les éprouvettes doivent être soumises à essai entre 2 semaines et 8 semaines après la date de découpe.

B.3.4 Collage des extrémités

Pendant le montage sur la machine d'essai, chaque éprouvette doit être fixée avec sa face supérieure sur la plaque métallique de la machine d'essai qui doit avoir une épaisseur minimum de 20 mm.

NOTE Un casque collé sur la tête de l'éprouvette permet l'application du déplacement.

B.4 Procédure

B.4.1 Préparation du matériel d'essai

L'enceinte thermostatique et le dispositif appliquant la charge doivent être portés à la température d'essai. L'alimentation électrique du balancier électrodynamique doit être réglée par un calibrage pour le déplacement en tête souhaité. L'effort de fatigue ne doit pas être appliqué à l'éprouvette avant un minimum d'une heure, pour permettre la stabilisation de la température ou après vérification que la température d'essai est bien atteinte dans l'éprouvette (si nécessaire en utilisant une éprouvette factice).

B.4.2 Exécution de l'essai de fatigue

B.4.2.1 La tête de l'éprouvette doit être déplacée de manière sinusoïdale avec l'amplitude de déplacement souhaitée.

NOTE 1 Cette amplitude correspond à la contrainte souhaitée. Elle est obtenue par l'équation suivante :

$$P_{ij} = \frac{\sigma_{j\,max}}{K_{\sigma i}} \qquad \text{(B.1)}$$

où

P_{ij} est l'amplitude de l'effort appliqué en tête, en Newton (N) ;

$\sigma_{j\,max}$ est contrainte relative la plus forte de l'éprouvette, correspondant à l'effort appliqué en tête ;

$K_{\sigma i}$ est la constante permettant de prendre en compte la géométrie de l'éprouvette à effort constant

NOTE 2 La valeur initiale du déplacement se définit comme l'abscisse de la régression linéaire de la partie linéaire de la droite qui est obtenue lorsque le déplacement est mis en correspondance avec les cycles.

B.4.2.2 L'essai doit être arrêté lorsque l'amplitude du déplacement est supérieure à 280 μm.

B.4.3 Choix de la contrainte

L'essai doit être réalisé à 3 niveaux de contrainte au minimum, avec au moins 6 répétitions par niveau. Les niveaux de contrainte doivent être définis pour un matériau, de telle sorte que la durée de vie moyenne en fatigue des séries d'essais se situe entre 10^4 et 10^6 cycles pour un minimum de 2 d'entre eux et entre 10^6 et 10^7 pour au moins un niveau.

B.5 Calcul et expression des résultats

B.5.1 Sur la base des résultats représentant la durée de vie N_{ij} pour le niveau de contrainte $\sigma_{j\,max}$, la droite de fatigue doit être tracée en faisant une régression linéaire entre les logarithmes naturels de $\sigma_{j\,max}$ ayant la forme suivante :

$$\ln\left(N_{ij}\right) = A_0 + A_1 \times \ln\left(\sigma_{j\,max}\right) \qquad \text{(B.2)}$$

où

N_{ij} est la durée de vie de l'éprouvette *i* au niveau de contrainte $\sigma_{j\,max}$;

$A_{\varepsilon 0}$, $A_{\sigma 0}$ sont les parties des axes de la droite de fatigue à effort constant ;

$A_{\varepsilon 1}$, $A_{\sigma 1}$ sont les pentes des droites de fatigue à effort constant.

B.5.2 Les propriétés suivantes doivent être calculées :

— l'estimation de $A_{\sigma 0}$, désignée par $\hat{A}_{\sigma 0}$;

— l'estimation de $A_{\sigma 1}$, désignée par $\hat{A}_{\sigma 1}$;

— le coefficient de corrélation de la régression r_{σ} ;

— la pente $p_{\sigma} = 1/\hat{A}_{\sigma 1}$;

— l'estimation de l'écart-type $\sigma_{\sigma x/y}$, désignée par $s_{\sigma x/y}$

$$s_{\sigma x/y} = s_{N} \times \sqrt{\frac{\left(1 - r_{\sigma}^{2}\right) \times (N-1)}{N-2}} \tag{B.3}$$

où

s_{N} est l'estimation de l'écart-type de N_{ij} ;

r_{ε}, r_{σ} sont les coefficients de régression ;

N est le nombre d'essais élémentaires.

— l'estimation de la contrainte à 10^6 cycles

$$\hat{\sigma}_{6} = e^{\frac{-A_{\sigma 0} + \ln(10^{6})}{A_{\sigma 1}}} \tag{B.4}$$

— l'intervalle de confiance à 95 % de $\hat{\sigma}_{6}$ désigné par $\Delta\hat{\sigma}_{6}$

$$\Delta\hat{\sigma}_{6} = \hat{\sigma}_{6} \times \left(-1 + e^{-2p_{\sigma} \times s_{\sigma 0}}\right) \tag{B.5}$$

avec

$$s_{\sigma 0} = s_{\sigma x/y} \times \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{\left(\ln\left(\hat{\sigma}_{6}\right) - \ln(\sigma)\right)^{2}}{(N-1) \times s_{\sigma}^{2}}} \tag{B.6}$$

où

$\hat{\sigma}_{6}$ est la contrainte à 10^6 cycles ;

σ est la contrainte médiane ;

s_{σ} est l'estimation de l'écart-type $\sigma_{j\,max}$;

N est le nombre d'essais élémentaires.

— l'estimation de l'écart-type de $\sigma_{j\,max}$ est :

$$s_\sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^{l}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\ln\left(\sigma_{j\,max}\right)-\ln(\sigma)}{N-1}\right)^2} \qquad \text{(B.7)}$$

dans laquelle

$\sigma_{j\,max}$ est la plus forte contrainte relative de l'éprouvette, correspondant à l'effort appliqué en tête ;

σ est la contrainte au point central ;

l est le nombre de niveaux de contrainte $\sigma_{j\,max}$;

n est le nombre d'éprouvettes aux niveaux de contrainte $\sigma_{j\,max}$;

N est le nombre d'essais élémentaires.

— la contrainte à un point central est

$$\sigma = e^{\sum_{j=1}^{l}\sum_{i=1}^{n}\frac{\ln\left(\sigma_{j\,max}\right)}{N}} \qquad \text{(B.8)}$$

où

$\sigma_{j\,max}$ est la plus forte contrainte relative de l'éprouvette, correspondant à l'effort appliqué en tête ;

l est le nombre de niveaux de contrainte $\sigma_{j\,max}$;

n est le nombre d'éprouvettes au niveau de contrainte $\sigma_{j\,max}$;

N est le nombre d'essais élémentaires.

— S_N est l'estimation de l'écart-type de $\ln(N_i)$:

$$S_N = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{l}\sum_{i=1}^{n}\left[\ln\left(N_{ij}\right)-\left(\sum_{j=1}^{l}\sum_{i=1}^{n}\frac{\ln\left(N_{ij}\right)}{N}\right)\right]^2}{N-1}}\,. \qquad \text{(B.9)}$$

où

N_{ij} est la durée de vie de l'éprouvette i à la contrainte $\sigma_{j\,max}$;

l est le nombre de niveaux de contrainte $\sigma_{j\,max}$;

n est le nombre d'essais élémentaires au niveau de contrainte $\sigma_{j\,max}$;

N est le nombre d'essais élémentaires.

B.6 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit inclure les éléments dont la liste est indiquée au paragraphe 7 avec :

a) le choix d'effort d'essai contrôlé ;

b) le nombre moyen de cycles et l'écart-type obtenu pour chaque niveau de contrainte ;

c) la contrainte correspondant à 10^6 cycles $\hat{\sigma}_6$;

d) l'intervalle de confiance de $\hat{\sigma}_6$ pour une probabilité de 95 % ;

e) la pente *p* ;

f) l'estimation de l'écart-type résiduel $S_{x/y}$.

NOTE 1 résultat d'essai s'entend pour des mesures sur au moins 18 éprouvettes individuelles.

B.7 Fidélité

La fidélité de cet essai n'a pas encore été établie.

Annexe C
(normative)
Essai de flexion en trois points sur des éprouvettes prismatiques

C.1 Principe

C.1.1 Généralités

Cette méthode caractérise le comportement des mélanges bitumineux en fatigue par flexion trois points avec déplacement imposé, en utilisant des éprouvettes en forme de poutre prismatique. Le comportement est caractérisé par la détermination de la loi de fatigue en termes de déformation (relation entre la déformation et le nombre de cycles de chargement à la rupture) et la loi d'énergie associée. La méthode peut être utilisée pour des éprouvettes de mélanges bitumineux d'une dimension granulaire maximale de 22 mm, ou pour des échantillons provenant de couches de chaussées d'une épaisseur d'au moins 50 mm.

Pour une fréquence donnée de déplacement sinusoïdal, la méthode doit être appliquée à plusieurs éprouvettes soumises à essai à température contrôlée.

C.1.2 Essai élémentaire

Un essai élémentaire consiste à appliquer un déplacement sinusoïdal d'amplitude constante au point central de la portée d'une éprouvette en forme de poutre, suspendue à ses deux extrémités. Le résultat doit être obtenu par corrélation de la déformation initiale maximale d'une section au centre de la portée de l'éprouvette et le nombre de cycles nécessaires, pour réduire de moitié la rigidité initiale de l'éprouvette. Durant tout l'essai élémentaire, la déformation de la section au centre de la portée de l'éprouvette doit être régulièrement enregistrée en fonction du nombre de cycles.

C.1.3 Droite de fatigue

Les essais élémentaires doivent être effectués à des amplitudes de déplacement différentes sur des éprouvettes provenant d'un groupe homogène. Une droite de fatigue du mélange soumis à essai doit être tracée par approximation des résultats des essais élémentaires.

C.2 Appareillage

C.2.1 Machine d'essai

Toute presse à commande servo-hydraulique capable d'engendrer une charge cyclique sinusoïdale à la fréquence et avec l'amplitude requises.

C.2.2 Cellule dynamométrique

Cellule dynamométrique, utilisée pour mesurer la charge dynamique, avec une exactitude de lecture de ± 0,002 kN sur une étendue de ± 2,5 kN.

C.2.3 Extensomètre et capteur de déplacement

L'extensomètre utilisé pour mesurer la déformation dans la section centrale de la portée de l'éprouvette doit avoir une base de mesure de (50 ± 0,5) mm, une plage de mesure se situant entre ± 0,2 mm et ± 0,5 mm et une exactitude de lecture supérieure à ± 0,025 μm. Le capteur de déplacement de la tige du piston qui applique la charge, doit avoir une plage de déplacement supérieure ou égale à ± 2,0 mm et une exactitude de lecture supérieure à ± 5,0 μm.

C.2.4 Dispositif de serrage

Un dispositif capable de maintenir une éprouvette (poutre) dans le cadre de flexion, tout en assurant la liberté de translation horizontale et de rotation à tous les points de fixation. Le module de rigidité rétro-calculé pour une poutre de référence ayant un module de rigidité connu, doit être à moins de 2 % du module réel et à moins de 0,5° pour le retard de phase (voir C.2.8).

C.2.5 Système d'acquisition de données

Un système automatique d'acquisition de données composé d'un ordinateur et d'une carte de conversion analogique/ numérique. La carte doit pouvoir fournir un enregistrement des fonctions à la fois de la charge et du signal de l'extensomètre et doit avoir une résolution telle que l'erreur due au processus de conversion du signal soit égale ou inférieure à l'exactitude de lecture de la cellule dynamométrique et de l'extensomètre.

C.2.6 Enceinte thermostatique

Une enceinte contenant l'éprouvette et les systèmes de serrage qui soit capable de maintenir une température constante de (20 ± 1) °C.

C.2.7 Autres matériels divers

Plateaux, balance et thermomètres.

C.2.8 Vérification du fonctionnement du dispositif complet et du montage de l'éprouvette

Le dispositif complet doit être essayé au moins une fois par an avec au moins une poutre de référence ayant un module de rigidité connu (module et retard de phase). Le moment de flexion (E. I) de la(des) poutre(s) doit être choisi égal au moment de flexion d'une éprouvette d'essai en enrobé normal (en adoptant un module de rigidité pour l'enrobé situé dans la fourchette de 3 GPa à 14 GPa). La poutre doit être soumise à essai au minimum à 2 fréquences, 2 températures et 2 valeurs de flèche. Les modules de rigidité rétro-calculés doivent être à moins de 2 % du module connu et à moins de 0,5° du retard de phase connu. Si en raison des composants électroniques ou des équipements mécaniques, des écarts systématiques (ou des écarts plus importants) sont observés, une procédure de correction par le logiciel de rétro-calcul est permise.

NOTE La géométrie de la poutre de référence doit être choisie pour que son poids soit comparable au poids d'une poutre d'enrobé. Le procédé de serrage de la poutre de référence doit être identique à celui utilisé pour une poutre d'enrobé. Si possible, un matériau de référence avec un retard de phase non nul est préférable, mais un matériau comme l'aluminium (E autour de 72 GPa, retard de phase égal à zéro) est également acceptable.

C.3 Préparation de l'éprouvette

C.3.1 Fabrication et découpe

Les poutres d'essai doivent provenir d'échantillons fabriqués selon la norme [A1⟩ EN 12697-33:2003+A1 ⟨A1].

Les dimensions des poutres d'essai doivent être (300 ± 10) mm × (50 ± 3) mm × (50 ± 3) mm. Au moins 10 poutres d'essai du même mélange doivent être fabriquées pour obtenir la loi de fatigue du matériau.

C.3.2 Masse volumétrique apparente

La masse volumétrique apparente des éprouvettes doit être déterminée selon la norme ▌A1⟩ EN 12697-6:2003+A1 ⟨A1▌.

C.3.3 Entreposage

Les éprouvettes devront être entreposées sur une surface plane à une température de (20 ± 1) °C. Elles devront être soumises à essai entre 2 semaines et 8 semaines après la date de découpe.

C.3.4 Préparation des systèmes de serrage

Les poutres d'essai doivent avoir deux côtés découpés opposés de (300 ± 10) mm × (50 ± 3) mm. Pour fixer les poutres d'essai sur le mécanisme support (C.2.4), il faut utiliser trois morceaux de tube carré. Le premier morceau de tube doit être collé sur l'une des faces découpées de l'éprouvette, de manière à être situé à mi-distance des deux extrémités. Deux autres morceaux de tube doivent être collés sur la face découpée opposée. Leur position doit correspondre à la position des supports simples décrits en A.4.1. Le centre de chaque morceau de tube doit être à la même distance du centre du morceau de tube collé sur la face opposée de la poutre.

C.4 Procédure

C.4.1 Préparation du matériel d'essai

C.4.1.1 L'éprouvette doit être fixée au mécanisme support par les deux tubes métalliques collés sur l'une des ses faces et à la tige du piston par le tube collé sur la face opposée. Les tubes doivent être rendus solidaires des supports et de la tige du piston au moyen de vérins ou autres moyens adaptés. Le mécanisme de support doit pouvoir bouger et incliner ses axes.

NOTE La capacité de bouger et de s'incliner est nécessaire pour éviter que l'éprouvette soit le siège de contraintes en raison d'efforts de flexion ou de couple pendant le procédé, contraintes qui peuvent modifier le comportement de l'éprouvette pendant l'essai.

C.4.1.2 L'extensomètre doit être fixé sur la face de la poutre à l'endroit où les deux tubes métalliques sont collés et positionnés au centre géométrique de cette face. L'enceinte thermostatique et le dispositif appliquant la charge doivent être portés à la température d'essai.

C.4.2 Exécution de l'essai de fatigue

Une fois que l'éprouvette et l'extensomètre ont été assemblés et portés à la température d'essai, un déplacement cyclique de la tige du piston doit être appliqué selon la fonction sinusoïdale suivante :

$$D_c = D_0 \times \sin(2\pi \times f \times t) \qquad \text{(C.1)}$$

où

D_c est le déplacement à l'instant t en microns (μm) ;

$2D_0$ est l'amplitude totale de la fonction de déplacement, en microns (μm) ;

f est la fréquence du signal, en Hertz (Hz) ;

t est le temps en secondes (s).

La fréquence du signal doit être de 10 Hz, et l'amplitude totale $2D_0$ doit varier d'un essai à l'autre. La charge doit continuer jusqu'à ce que les critères de rupture conventionnels (3.1.1) soient atteints.

NOTE Les valeurs de l'amplitude totale vont habituellement de 80 µm à 350 µm, selon le mélange.

C.4.3 Enregistrement de la fonction de chargement, de la fonction signal de l'extensomètre et de la fonction de déplacement.

C.4.3.1 Les fonctions doivent être enregistrées tous les 500 cycles, en commençant au cycle 200.

NOTE Si vous ne comprenez pas, les lectures sont ainsi déclenchées aux cycles 200, 700, 1 200, 1 700… et enregistrées pendant un cycle complet.

C.4.3.2 Les fonctions de chargement, le signal de l'extensomètre et le déplacement doivent être définies à chaque cycle par au moins 50 points à même intervalles de temps. La fréquence de lecture pour chaque fonction doit être supérieure à 50*F* où *F* est la fréquence du signal de déplacement appliqué.

C.4.4 Fin de l'essai

L'amplitude de la charge dynamique doit être calculée après le cycle précédent et avant le cycle suivant comme la différence entre les valeurs minimum et maximum de la charge enregistrée pendant le cycle considéré. L'essai est terminé lorsque l'amplitude de la charge cyclique calculée au cycle *N* est la moitié de l'amplitude de la charge cyclique calculée au cycle 200, ce qui constitue le critère de rupture.

C.5 Calcul et expression des résultats

C.5.1 Calcul de la fonction de contrainte et de la fonction de déformation pour un cycle

C.5.1.1 La contrainte du mélange doit être établie à partir de la contrainte au point de mi-portée de la face de l'éprouvette d'essai à l'endroit où les deux supports sont placés. La contrainte doit être déterminée pour chaque cycle par l'équation suivante :

$$\sigma = P \times \frac{3(L-20)}{2\left(b \times e^2\right)} \qquad \text{(C.2)}$$

où

σ est la contrainte instantanée, en mégapascals (MPa) ;

P est la charge instantanée, en mégapascals (MPa) ;

L est la distance entre les supports, en millimètres (mm) ;

b est la largeur de l'éprouvette, en millimètres (mm) ;

e est l'épaisseur de l'éprouvette, en millimètres (mm).

NOTE La contrainte est normale à un plan perpendiculaire au plan de la face support.

C.5.1.2 La déformation de l'éprouvette doit être établie à partir de la déformation de traction au même point que celui où la contrainte est calculée. La déformation sera déterminée pour chaque cycle par l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{2EXT \times (L - 20)}{2B \times L - B^2 - 400} \qquad \text{(C.3)}$$

où

ε est la déformation instantanée ;

EXT est le signal d'extensomètre instantané, en millimètres (mm) ;

B est la base de mesure de l'extensomètre, en millimètres (mm) ;

L est la distance entre les supports, en millimètres (mm).

NOTE 1 La déformation est normale à un plan perpendiculaire au plan de la face support.

NOTE 2 Comme les fonctions de chargement et de signal de jauge de déformation sont définies par plus de 50 points par cycle, les fonctions de contrainte et de déformation sont définies par plus de 50 points par cycle (CQFD).

C.5.2 Calcul du module dynamique, angle de différence de phase et densité d'énergie dissipée sur un cycle

C.5.2.1 Le module dynamique doit être déterminé à chaque cycle par l'équation suivante :

$$MD = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} \qquad \text{(C.4)}$$

où

MD est le module dynamique, en mégapascals (MPa) ;

σ_c est l'amplitude cyclique de la contrainte, en mégapascals (MPa) ;

ε_c est l'amplitude cyclique de la déformation.

NOTE Le module dynamique d'un cycle est défini comme le quotient de l'amplitude cyclique de la contrainte sur l'amplitude cyclique de la déformation. L'amplitude cyclique d'une fonction d'un cycle est la valeur absolue de la différence entre sa valeur maximum et sa valeur minimum pendant ce cycle.

C.5.2.2 La différence de phase entre la fonction de contrainte et la fonction de déformation doit être déterminée par une estimation des moindres carrés de la contrainte et de la déformation (définies par plus de 50 points également espacés dans le temps) selon l'équation suivante :

$$\sigma_a = A_t \times \sin\left(2\pi \times F \times t + B_t\right) + K_t \qquad \text{(C.5)}$$

$$\varepsilon_a = A_\varepsilon \times \sin\left(2\pi \times F \times t + B_\varepsilon\right) + K_\varepsilon \qquad \text{(C.6)}$$

où

σ_a est la valeur approchée de la fonction de contrainte, en mégapascals (MPa) ;

ε_a est la valeur approchée de la fonction de déformation ;

$2A_t$ est l'amplitude de la fonction de contrainte approchée, en mégapascals (MPa) ;

$2A_t$ est l'amplitude de la fonction de déformation approchée ;

F est la fréquence du signal de chargement, en dizaines de Hertz (10 Hz) ;

B_t est l'angle de phase de la fonction de contrainte approchée, en radians (rad) ;

B_ε est l'angle de phase de la fonction de déformation approchée, en radians (rad) ;

K_t, K_ε sont des constantes.

C.5.2.3 L'angle de déphasage doit être déterminé par l'équation suivante :

$$\Phi = \left(B_\varepsilon - B_t\right) \times \frac{180}{\pi} \tag{C.7}$$

où

Φ est l'angle de différence de phase en degrés.

NOTE L'angle de phase se définit comme la différence de phase existant entre la contrainte et la déformation.

C.5.2.4 La densité d'énergie dissipée doit être déterminée par l'équation suivante, en utilisant les amplitudes cycliques calculées de la contrainte et de la déformation et l'angle de déphasage :

$$DDE = T_C \times \varepsilon_C \times \sin(\phi) \times 0{,}25\pi \tag{C.8}$$

où

DDE est la densité d'énergie dissipée, en mégapascals (MPa) ou mégajoules par mètre cube (MJ/m^3).

NOTE La densité d'énergie dissipée dépend du mélange d'enrobés au point où la contrainte et la déformation sont calculées.

C.5.2.5 L'amplitude cyclique du déplacement doit être déterminée de la même manière que les amplitudes des cycles de contrainte et de déformation et doit rester constante au cours de l'essai.

C.5.2.6 La densité totale d'énergie dissipée durant tout l'essai doit être calculée à partir de la densité d'énergie dissipée à chacun des cycles enregistrés par l'équation approchée suivante :

$$DDE(total) = 200\ DDE(200) + 500 \sum_{i=1}^{m} [DDE(200 + 500i)] \tag{C.9}$$

où

DE(*total*) est la densité totale d'énergie dissipée durant tout l'essai, en mégajoules par mètre cube (MJ/m^3) ;

DDE(*x*) est la densité d'énergie dissipée au cycle *x*, en mégajoules par mètre cube (MJ/m^3) ;

N est le nombre de cycles à la fin de l'essai ;

m est (*N* – 200)/500.

C.5.3 Détermination de la loi de fatigue et de la loi d'énergie

La loi de fatigue à déplacement imposé et la loi d'énergie doivent être déterminées à partir des résultats d'au moins 10 essais élémentaires. La loi de fatigue et la loi d'énergie doivent être obtenues par une estimation des moindres carrés de l'ensemble des valeurs couplées, selon les équations suivantes :

$$\varepsilon = k_1 \times N^{k_2} \tag{C.10}$$

$$W = k_3 \times N^{k_4} \tag{C.11}$$

$$\varepsilon_6 = k_1 \times 10^{6k_2} \tag{C.12}$$

où

ε_6 est la contrainte à 10^6 cycles ;

ε est l'amplitude demi-cyclique de la fonction de déformation au cycle 200 ;

W est la densité totale d'énergie dissipée durant tout l'essai, en mégajoules par mètre cube (MJ/m^3) ;

N est le nombre total de cycles ;

k_1, k_2 sont les paramètres de la loi de fatigue en déformation ;

k_3, k_4 sont des coefficients de la loi de fatigue d'énergie (k_3 en mégajoules par mètre cube (MJ/m^3) k_4 est sans dimensions).

NOTE La loi de fatigue est définie en utilisant les valeurs couplées de la demi-amplitude cyclique de la déformation au cycle 200 [(1/2 ε_c (200)] et le nombre total de cycles. La loi d'énergie est définie en utilisant les valeurs couplées de la densité totale d'énergie dissipée pendant l'essai [*DDE*(*total*)] et le nombre total de cycles.

C.6 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit inclure les éléments dont la liste est indiquée au paragraphe 7 avec :

a) les constantes de la loi de fatigue *a*, *b* ;

b) les constantes de la loi d'énergie *c, d* ;

c) la déformation pour 10^6 cycles ;

d) les détails de chaque essai élémentaire :

- dimensions de l'éprouvette en forme de poutre (largeur et épaisseur à mi-longueur, longueur) ;
- densités relatives ;
- base de mesure de l'extensomètre ;
- pour chaque cycle :
  - amplitude cyclique du déplacement central, µm ;
  - amplitude cyclique du déplacement central, N ;
  - amplitude cyclique de la fonction de contrainte, MPa ;
  - amplitude cyclique de la fonction de déformation ;
  - module dynamique ;
  - angle de différence de phase ;
  - densité d'énergie dissipée, J/m^3 ;
- énergie totale d'énergie dissipée pendant l'essai ;
- nombre total de cycles pour que les conditions de fonctionnement conduisent au point de rupture.

NOTE 1 résultat d'essai s'entend pour des mesures effectuées sur au moins 18 éprouvettes individuelles.

C.7 Fidélité

La fidélité de cet essai n'a pas encore été établie.

Annexe D
(normative)
Essai de flexion en quatre points sur éprouvettes prismatiques

D.1 Principe

D.1.1 Généralités

Cette annexe décrit une méthode pour caractériser le comportement des mélanges bitumineux en fatigue, avec un matériel d'essai de flexion quatre points, dans lequel les brides intérieures et extérieures sont disposées symétriquement et en utilisant des éprouvettes rectangulaires minces (poutres prismatiques). La poutre prismatique est soumise à une flexion périodique en quatre points avec rotation et translation libres aux points de charge et de réaction. La flexion doit être réalisée en chargeant les deux points d'application intérieurs (brides intérieures) dans la direction verticale, perpendiculairement à l'axe longitudinal de la poutre. La position verticale des appuis d'extrémité (brides extérieures) doit être fixe. Cette configuration de charge doit créer un moment constant et en conséquence une déformation constante entre les deux brides intérieures.

La charge appliquée doit varier de manière sinusoïdale. Pendant l'essai, la charge nécessaire pour faire fléchir l'éprouvette ainsi que la flèche et le retard de phase entre ces deux signaux, doivent être mesurés en fonction du temps. Les caractéristiques de fatigue du matériau sous essai doivent être déterminées à partir de ces mesures.

NOTE 1 La largeur *B* et la hauteur *H* de l'éprouvette doivent être au moins trois fois plus grandes que la dimension *D* du plus gros granulat⟨A1⟩, néanmoins, ce rapport peut être ramené à deux fois et demi *D* pour les valeurs élevées de *D* pour des raisons de faisabilité des essais réalisés sur des éprouvettes de très grande taille ⟨A1⟩. Pour assurer l'élancement de la poutre, la longueur réelle *L* entre les brides de maintien externes doit être d'au moins six fois la valeur maximale de *B* et/ou de *H*.

NOTE 2 Les limites techniques de l'appareil ainsi que la granularité maximale dans le mélange d'enrobé peuvent rendre difficile la conformité aux critères des rapports *B/D* et/ou *H/D*. Si l'un de ces critères n'est pas rempli, l'essai ne correspondra pas complètement à cette annexe et cette non-conformité devra être explicitement mentionnée dans le rapport.

Certains essais élémentaires doivent être faits dans une atmosphère ventilée, à une température contrôlée à une fréquence donnée f_0 d'application de charge sinusoïdale.

NOTE 3 L'énergie dissipée par cycle peut être décomposée en trois parties :

1) Dissipation d'énergie visqueuse dans la poutre en raison de la flexion.

2) Dommages créés par la fatigue (création de micro-défauts, etc.)

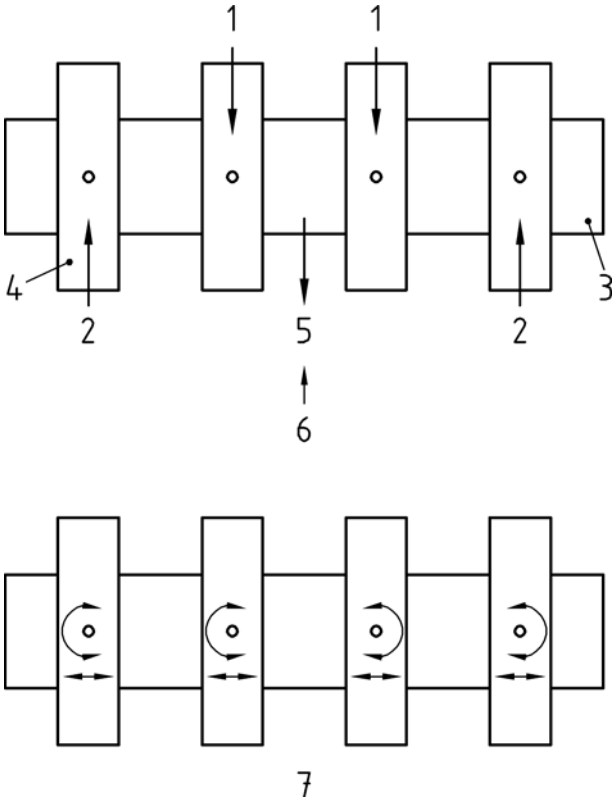
3) Pertes dans le système (amortissement).

2) est beaucoup plus petit que 1) et peut être ignoré dans l'interprétation. Toutefois, 3) peut jouer un rôle dans l'interprétation des données, en particulier si la fréquence angulaire d'essai ω_0 est proche de la première fréquence de résonance du matériel d'essai. L'influence de 3) ne peut être déterminée que par des calibrages avec un matériau élastique dont le module de Young est connu. Dans les équations d'interprétation, le coefficient pour les pertes du système est noté *T*. La valeur exacte de *T* doit être déduite des calibrages de rigidité. En général, l'influence peut être ignorée, parce que la fréquence d'essai est très inférieure à la première fréquence de résonance du système et une valeur zéro pour *T* peut donc être adoptée.

D.1.2 Essai élémentaire

Pour chaque essai élémentaire, deux brides de maintien intérieures et deux brides de maintien extérieures doivent être placées de manière symétrique par rapport au centre de l'éprouvette prismatique $L_{tot}/2$. Des charges égales et constantes doivent être appliquées aux deux brides de maintien intérieures. La force appliquée, la flèche mesurée et le retard de phase (système) entre la force et la flèche doivent être enregistrés. La durée de vie de l'éprouvette d'essai doit être déterminée en fonction des conditions de rupture choisies.

NOTE Les principaux concepts d'un essai élémentaire sont indiqués Figure D.1.



Légende

1 Charge appliquée

2 Réaction

3 Éprouvette

4 Bride de maintien de l'éprouvette

5 Flèche

6 Retour à la position d'origine

7 Translation et rotations libres

Figure D.1 — Principes de base de la flexion 4 points

D.1.3 Droite de fatigue

Les éprouvettes doivent provenir d'un groupe homogène pour des essais élémentaires répétés dans les mêmes conditions d'essai.

Les essais doivent être répétés à des valeurs différentes des conditions de chargement choisies (c'est-à-dire les différentes valeurs de flèche dans le cas d'un mode à flèche constante ou des valeurs de force différentes dans le cas du mode à force constante.) La droite de fatigue du mélange doit être tracée selon les conditions d'essai choisies (jeu de fréquences, température et mode de charge) et les valeurs suivantes doivent être calculées comme suit :

— le niveau Q des conditions d'essai du mode de chargement correspondant à une durée de vie en fatigue de 10^6 cycles selon les critères de rupture choisis, k ;

— la pente de la droite de fatigue tracée dans l'espace log-log p ;

— l'estimation de l'écart-type de la dispersion résiduelle des logarithmes naturels des résistances à la fatigue $S_{x/y}$.

L'intervalle de confiance de Q : ΔQ.

D.2 Appareillage

D.2.1 Machine d'essai

Le matériel doit être capable d'appliquer une charge sinusoïdale à une éprouvette, par un mécanisme adapté via deux brides de maintien intérieures montées sur l'éprouvette (Figure D.1). La fréquence de la chargement f_0 doit se situer entre 0 et 60 Hz, avec une exactitude de 0,1 Hz. Le matériel doit être construit en métal résistant à la corrosion. Le système d'essai doit être fourni avec un système pour commander le mode de charge de l'éprouvette, pour pouvoir répondre aux critères d'exécution d'essai. La cellule dynamométrique doit avoir une étendue de mesure d'au moins ± 2 000 N et doit correspondre aux caractéristiques techniques des transducteurs de classe de précision 0,2. La mesure de la force doit être réalisée à mi-chemin entre les deux brides de maintien intérieures. La mesure du déplacement doit être faite sur la surface supérieure ou la surface inférieure de l'éprouvette, entre les deux brides de maintien intérieures ou sur l'une des deux brides.

NOTE 1 La fréquence de résonance de la cellule dynamométrique et de la masse en mouvement doit être au moins 10 fois supérieure à la fréquence d'essai.

NOTE 2 Le transducteur de déplacement doit avoir une plage de mesure de ± 1,0 mm et doit répondre aux caractéristiques techniques des transducteurs de classe de précision 0,2.

NOTE 3 La fréquence de résonance du transducteur et de la masse en mouvement doit être au moins 10 fois supérieure à la fréquence d'essai.

NOTE 4 La flèche doit être mesurée au centre diagonal de la surface inférieure ou supérieure, $x = L/2$. Pour vérifier la flexion pure requise de l'éprouvette, les flèches des deux brides de maintien intérieures devront aussi être mesurées.

D.2.2 Système de serrage

Un dispositif capable de maintenir une éprouvette (poutre) dans le cadre de flexion, tout en assurant la liberté de translation horizontale et de rotation à tous les points de fixation. Le module de rigidité rétro-calculé pour une poutre de référence ayant un module de rigidité connu, doit être à moins de 2 % de celui-ci et à moins de 0,5° pour le déphasage(voir D.2.5).

Les brides de maintien intérieures et extérieures sont conçues pour que l'éprouvette puisse librement tourner et se mouvoir horizontalement dans les brides de maintien. La flexion pure supposée entre les deux brides de maintien intérieures doit être vérifiée en mesurant les flèches au niveau de la bride intérieure, $x = A$ et au milieu de l'éprouvette, $x = L/2$.

NOTE Le rapport entre les amplitudes de la flèche au centre et de la flèche aux brides intérieures doit être une constante définie comme suit :

$$\frac{Z(L/2)}{Z(A)} = \frac{R(A)}{R(L/2)} = \frac{3L^2 - 4A^2}{4A \times (3L - 4A)} \qquad \text{(D.1)}$$

La valeur *A* devrait être choisie dans l'intervalle 0,25 < *A/L* < 0,4 mais elle doit de préférence être proche d'un tiers de la longueur réelle *L* (configuration ASTM). En ce cas, le rapport sera de 1,15. Si *A/L* est choisi en dehors de cet intervalle, les équations données dans cette annexe ne sont plus applicables sans l'introduction d'importantes erreurs.

D.2.3 Enceinte thermostatique

L'enceinte thermostatique doit être ventilée et la température moyenne du flux d'air à une distance d'au moins 10 mm des éprouvettes doit pouvoir être fixée avec une exactitude de ± 1 °C (pendant toute la durée de l'essai). La régulation doit avoir une exactitude de 0,5 °C.

D.2.4 Matériel d'enregistrement électronique des données

D.2.4.1 Matériel électronique d'enregistrement des données dans lequel les signaux du transducteur seront amplifiés par des amplificateurs à faible bruit, de préférence pour qu'une valeur de 10 V ou de ± 10 V corresponde à la flèche totale de la plage de mesure du transducteur utilisé.

NOTE Il faut prévoir des prises pour brancher les instruments d'enregistrement et/ou de traitement des données (bonne idée).

D.2.4.2 Que l'on utilise des instruments de mesure numériques ou analogiques, la sortie des amplificateurs doit être affichée et enregistrée avec une exactitude de 1 N pour l'effort et de 1 μm pour le déplacement.

NOTE Il est recommandé d'utiliser un procédé d'échantillonnage des données numériques combiné à une transformation de Fourier (rapide). La sortie de la transformée de Fourier est un spectre de fréquence discret.

D.2.4.3 Pour le calcul de la déformation, de la contrainte, du module de rigidité dynamique et du retard de phase (du matériau), il faut connaître les valeurs des composantes de la fréquence à la fréquence d'essai f_0.

NOTE Cette procédure permet un contrôle des signaux sinusoïdaux simples requis à la fréquence choisie et une mesure directe du retard de phase système entre effort et flèche.

D.2.5 Vérification du fonctionnement du matériel complet et du montage de l'éprouvette

Le matériel complet doit être manoeuvré au moins une fois par an, avec au moins une poutre de référence ayant un module de rigidité connu (module et retard de phase). Le moment de flexion (E. I) de la (des) poutre(s) doit être choisi égal au moment de flexion d'une éprouvette d'essai en enrobé normal (en adoptant un module de rigidité pour l'enrobé situé dans une fourchette de 3 GPa à 14 GPa). La poutre de référence doit être soumise à essai au minimum à 2 fréquences, 2 températures et 2 valeurs de flèche. Les modules de rigidité rétro-calculés doivent être à moins de 2 % du module connu et à moins de 0,5° du retard de phase connu. Si en raison des composants électroniques ou des équipements mécaniques, des écarts systématiques (ou des écarts plus importants) sont observés, une procédure de correction par le logiciel de rétro-calcul est permise.

NOTE La géométrie de la poutre de référence doit être choisie pour que son poids soit comparable au poids d'une poutre d'enrobé. Le procédé de maintien de la poutre de référence doit être identique à celui qui est utilisé pour une poutre d'enrobé. Un matériau de référence avec un retard de phase non nul est préférable, mais un matériau comme l'aluminium (E autour de 72 GPa, retard de phase égal zéro) sera également acceptable.

D.3 Préparation de l'éprouvette

D.3.1 Dimensions

D.3.1.1 L'éprouvette doit avoir la forme d'une poutre prismatique avec les proportions et les tolérances nominales suivantes :

— la longueur totale L_{tot} ne doit pas dépasser la longueur réelle L de plus de 10 % ;

— la différence entre les valeurs mesurées maximum et minimum de la largeur et de la hauteur ne doit pas être supérieure à 1,0 mm ; la différence entre les valeurs mesurées maximum et minimum de la longueur ne doit pas être supérieure à 2,0 mm ;

— l'angle entre les surfaces longitudinales adjacentes ne doit pas dévier par rapport à angle droit de plus de 1°.

NOTE Il est également recommandé que :

— la longueur réelle L ne soit pas inférieure à 6 fois la valeur la plus élevée de la largeur B ou de la hauteur H ;

— la largeur B et la hauteur H soient égales à au moins 3 fois D, la granularité maximale du matériau soumis à essai⟨A1⟩ , néanmoins, ce rapport peut être ramené à deux fois et demi D pour les valeurs élevées de D pour des raisons de faisabilité des essais réalisés sur des éprouvettes de très grande taille ⟨A1⟩.

D.3.1.2 La longueur totale doit être mesurée quatre fois avec une règle d'une exactitude de 1,0 mm sur la ligne médiane des surfaces supérieure et inférieure. La hauteur et la largeur doivent être mesurées avec des pieds à coulisse avec une exactitude de 0,1 mm, aux endroits où les brides de maintien doivent être placées ($x = 0$, $x = A$, $x = L – A$, $x = L$).

La longueur de l'éprouvette d'essai doit être calculée comme la moyenne arithmétique des mesures de longueur. La largeur et la hauteur de l'éprouvette doivent être calculées de manière similaire à partir des mesures respectives de la largeur et de la hauteur. Les éprouvettes non conformes aux critères exigés ne doivent pas être soumises à essai.

NOTE Les limites techniques de l'appareil ainsi que la granularité maximale du mélange d'enrobé peuvent rendre difficile la conformité aux critères de la largeur B, $B/D > 3$ et $H/D > 3$. Si l'un de ces critères n'est pas rempli, l'essai ne correspondra pas complètement à cette annexe et cette non-conformité devra être explicitement mentionnée dans le rapport.

D.3.2 Découpe

Les éprouvettes soumises à l'essai doivent être obtenues en sciant des plaques fabriquées en laboratoire ou extraites de couches de chaussées. Les plaques fabriquées en laboratoire doivent avoir une épaisseur supérieure à la hauteur requise H plus 20 mm. Les poutres doivent être découpées dans le milieu. La distance de poutre par rapport au bord de la plaque doit être d'au moins 20 mm. En principe, la même procédure vaut pour les poutres découpées dans des plaques extraites de chaussée. Si l'épaisseur de la couche de chaussée est trop faible pour satisfaire aux caractéristiques requises pour le rapport entre la hauteur H et la granularité maximale D, les poutres devront être tournées d'un angle de 90°. En ce cas, la largeur B de la poutre ne pourra pas satisfaire aux caractéristiques requises et il faudra le signaler. L'axe longitudinal de la poutre doit être parallèle à l'axe de compactage.

D.3.3 Séchage

Après découpe, l'éprouvette d'essai doit être séchée à l'air jusqu'à atteindre une masse constante, avec une humidité relative de l'air de moins de 80 % et à une température comprise entre 15 °C et 25 °C. Une éprouvette est considérée comme sèche lorsque deux pesées effectuées à 24 heures d'intervalle diffèrent de moins de 0,25 %. La masse sèche doit être mesurée avec une exactitude de 0,1 g.

D.3.4 Entreposage

L'éprouvette doit être entreposée sans porte à faux. Le support sur lequel l'éprouvette est posée doit être plan et propre. Les éprouvettes ne doivent pas être empilées l'une sur l'autre. Les éprouvettes qui ne doivent pas être immédiatement essayées doivent être entreposées dans une pièce sèche à une température comprise entre 0 °C et 20 °C. Si les éprouvettes doivent être stockées pour une durée supérieure à un mois, la température à l'intérieur du local d'entreposage devra être comprise entre 0 °C et 5 °C. Les éprouvettes doivent être soumises à essai entre 2 semaines et 8 semaines après la date de découpe.

NOTE L'humidité relative à l'intérieur du local d'entreposage ne doit pas dépasser 80 %.

D.3.5 Vérification

L'éprouvette doit être contrôlée visuellement et des signes extérieurs notables concernant l'homogénéité, le compactage, les vides ou la présence de grosses particules granulaires doivent être signalés.

D.3.6 Montage

Pour le montage des brides intérieures et des brides extérieures sur la poutre, il faut utiliser un système qui puisse permettre la meilleure liberté de rotation et de translation possible. La flexion requise de la poutre doit être contrôlée en mesurant la flèche à deux endroits différents entre les deux brides de maintien intérieures (voir D.2.2). La poutre doit être pesée ainsi que toutes les parties mobiles entre la cellule dynamométrique et la poutre (par exemple le cadre mobile, les brides et le capteur de mesure de flèche) et les points sur la poutre où ces masses exercent leur influence devront être déterminés pour calculer correctement le facteur de masse.

NOTE Normalement, les emplacements où les masses agissent sont la (les) bride(s) intérieure(s).

D.4 Procédure

D.4.1 Préparation du matériel d'essai

D.4.1.1 L'enceinte thermostatique et le matériel de chargement doivent être amenés à la température d'essai pendant un temps qui ne soit pas inférieur au temps indiqué dans le Tableau D.1. Pour éviter le vieillissement et la déformation de l'éprouvette, l'acclimatation ne doit pas dépasser 6 heures.

Tableau D.1 — Temps minimum requis pour amener les éprouvettes à la température d'essai

Température d'essai °C	Temps h
0 20	2 1

D.4.1.2 Les différentes masses des pièces mobiles doivent être calculées comme suit :

— M_{beam} est la masse totale de la poutre sans les masses des brides montées ;

— M_{clamps} est la masse des deux brides intérieures, y compris la masse de l'adhésif (en cas d'utilisation) et la masse du cadre de chargement entre la cellule dynamométrique et le mécanisme de charge ;

— M_{sensor} est la masse des pièces mobiles du capteur.

Si, pour vérifier le mode de flexion pure, un deuxième capteur est placé sur l'une des deux brides de maintien intérieures, cette masse doit être ajoutée à la masse des brides de maintien.

D.4.1.3 La masse équivalente M_{eq} devra être calculée pour être utilisée dans le calcul du module de rigidité.

NOTE La valeur de la masse équivalente dépend de la distance x_s à laquelle le capteur est placé.

D.4.2 Exécution de l'essai de fatigue

D.4.2.1 La poutre avec les deux brides intérieures et les deux brides extérieures doit être montée dans le cadre de chargement. La poutre doit ensuite être fléchie de manière sinusoïdale à la fréquence choisie f_0 et à l'amplitude de déplacement initiale imposée. L'effort nécessaire doit être appliqué au moyen du cadre de chargement relié aux deux brides de maintien intérieures. Le mode de chargement choisi (flèche constante ou force constante) doit être imposé par une rétroaction de la force ou du déplacement mesuré. L'effort, le déplacement et le retard de phase entre l'effort et le déplacement doivent être enregistrés après 100 cycles et régulièrement ensuite.

NOTE L'objectif est de faire au moins 100 mesures à des intervalles réguliers pendant la durée de l'essai (n = 100 à $n = N_{f,\,50}$).

D.4.2.2 La valeur initiale du module calculé S_{mix} doit être calculée à partir des valeurs mesurées de l'effort, du déplacement et du retard de phase après le centième cycle (n = 100). L'essai de fatigue doit être poursuivi jusqu'à ce que le module calculé S_{mix} soit tombé à la moitié de sa valeur initiale ou jusqu'à ce que l'éprouvette se brise.

D.4.2.3 Si nécessaire, un spectre de fréquence du module complexe (rigidité) initial à la température d'essai choisie doit être obtenu avant l'essai de fatigue. Ce pré-essai consistera à faire des mesures de réponses à une gamme de fréquences nominales (par exemple 1 Hz, 3 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz et 60 Hz et ensuite de nouveau 1 Hz). Le mode de chargement dans ce pré-essai doit être représentatif de la flèche constante pour une amplitude de déformation de flexion maximum inférieure à 50 μm/m. À chaque fréquence, 200 répétitions au moins doivent être appliquées. Pour éviter les dommages de fatigue prématurés, le nombre total d'applications pour toutes les fréquences prises ensemble ne doit pas dépasser 3 000. Aux basses températures ($\Theta \leq$ 10 °C), il doit y avoir une courte période de repos d'environ 10 min avant de démarrer l'essai de fatigue.

D.4.3 Choix des conditions d'essai

Pour une température et une fréquence données, l'essai doit être réalisé à trois niveaux au moins dans le mode de charge choisi (par exemple trois niveaux de déformation dans le mode à flèche constante) avec au minimum six répétitions par niveau. Les niveaux du mode de chargement choisis doivent être sélectionnés pour que les résistances à la fatigue se situent dans la plage de 10^4 à 2×10^6 cycles.

D.4.4 Traitement des données

D.4.4.1 En utilisant les données obtenues sur l'effort, la flèche et le retard de phase entre ces deux signaux qui ont été mesurés aux cycles de charge $n_{(i)}$, les résultats pertinents doivent être calculés en utilisant les équations données en 3.5. Les résultats d'essai pertinents doivent être mis en tableaux et représentés graphiquement en fonction du nombre de cycles de charge $n_{(i)}$ auxquels ils ont été mesurés. Ces résultats d'essai sont :

— l'amplitude de déformation ;

— l'amplitude de contrainte ;

— le module du module complexe (module de rigidité dynamique).

NOTE Les résultats d'essai facultatifs suivants peuvent aussi être calculés :

— retard de phase (du matériau) ;

— énergie dissipée par cycle ;

— énergie dissipée cumulée par cycle $n_{(i)}$.

D.4.4.2 Pour déterminer les valeurs initiales, le premier nombre de cycles de charge $n_{(i)}$ doit être le centième cycle de charge.

D.4.4.3 Si une transformation de Fourier est utilisée, l'énergie dissipée doit être calculée en utilisant toutes les composantes de la fréquence du spectre de fréquence discret obtenu (loi de Parsival). La fréquence d'essai choisie f_0 doit être égale à une des composantes de fréquence dans le spectre de fréquence discret. Si les données numériques sont échantillonnées sur un nombre entier de cycles, les valeurs moyennes calculées sur ce nombre de cycles doivent être définies pour correspondre au premier cycle de cet échantillon.

D.5 Calcul et expression des resultants

D.5.1 Sur la base des résultats représentant la durée de vie $N_{i,j,k}$ pour les critères de rupture choisis *j* et l'ensemble des conditions d'essai *k*, la droite de fatigue sera tracée en faisant une régression linéaire entre les logarithmes naturels de $N_{i,j,k}$ et les logarithmes naturels de l'amplitude de déformation initiale (amplitude de déformation au centième cycle) ayant la forme suivante :

$$\ln\left(N_{i,j,k}\right) = A_0 + A_1 \times \ln\left(\varepsilon_i\right) \qquad \text{(D.2)}$$

où

i est le numéro de l'éprouvette ;

j représente les critères de rupture choisis ;

k représente l'ensemble des conditions d'essai ;

ε_i est l'amplitude de déformation initiale mesurée au 100e cycle de charge.

D.5.2 Les durées de vie en fatigue doivent être mesurées à trois niveaux au moins pour chaque mode de chargement avec au moins 6 répétitions par niveau. Les valeurs suivantes doivent être calculées :

— l'estimation de A_1 noté comme la pente *p* ;

— l'estimation de A_0 noté comme *q* ;

— le coefficient de régression *r* ;

— l'estimation de l'écart-type résiduel, $\sigma_{x/y}$, noté $s_{x/y}$;

— l'estimation de la déformation initiale pour les critères de rupture choisis à laquelle une résistance à la fatigue de 10^6 peut être attendue pour les conditions d'essai données.

D.6 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit inclure les éléments dont la liste est indiquée au paragraphe 7 avec :

a) la description de la vérification du bon fonctionnement du matériel complet et du montage de l'éprouvette, y compris les résultats du dernier essai ;

b) le nombre moyen de cycles et l'écart-type obtenu pour chaque niveau du mode de charge choisi⟨A1⟩, si nécessaire ⟨A1⟩ ;

c) la déformation initiale correspondant à une résistance à la fatigue de 10^6 cycles pour les critères de rupture et l'ensemble des conditions d'essai choisis ;

d) la pente p de la droite de fatigue ;

e) les points de données individuels mesurés.

NOTE 1 résultat d’essai s’entend pour des mesures sur au moins 18 éprouvettes individuelles.

D.7 Fidélité

La fidélité de cet essai n’a pas encore été établie.

Annexe E
(normative)
Essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques

E.1 Principe

Cette annexe caractérise le comportement en fatigue des mélanges bitumineux sous charges répétées avec un mode de chargement constant, par traction indirecte (ITT). Une éprouvette cylindrique fabriquée en laboratoire ou carottée dans une couche de chaussée peut être utilisée pour cet essai. Une éprouvette cylindrique sera soumise à des charges de compression répétées avec un signal de charge en sinus carré dans le plan diamétral vertical. Cette charge développe une contrainte de traction relativement uniforme, perpendiculairement à la direction de la charge appliquée et le long du plan diamétral vertical, ce qui provoque la rupture de l'éprouvette qui se fend sur la partie centrale du diamètre vertical. La déformation horizontale de l'éprouvette, qui en résulte doit être mesurée et un coefficient de Poisson supposé doit être utilisé pour calculer la déformation en traction au centre de l'éprouvette. La durée de vie avant cassure doit être définie comme étant le nombre total d'applications de charge avant cassure de l'éprouvette.

E.2 Matériel

E.2.1 Machine d'essai

La machine d'essai doit pouvoir appliquer des impulsions répétées de charge en sinus carré avec des périodes de repos à plusieurs niveaux de chargement.

E.2.2 Charge

Le système de chargement doit au minimum pouvoir appliquer des charges sur une étendue comprise entre 0,5 et 10 kN avec une exactitude de 0,25 %.

NOTE La capacité de charge maximale requise dépend de la taille de l'éprouvette, de la température d'essai et des caractéristiques du matériau.

E.2.3 Déplacement

Le capteur permettant de mesurer les déplacements le long du plan diamétral horizontal doit avoir une exactitude d'au moins 1 μm sur une étendue de mesures de 3,75 mm.

NOTE Une configuration de deux extensomètres reliés en séries, de type 632.11C de MTS Corporation peut convenir.

E.2.4 Enceinte thermostatique

L'enceinte thermostatique doit pouvoir être régulée en température sur une plage allant de 2 °C à 20 °C avec une exactitude d'au moins ± 1 °C.

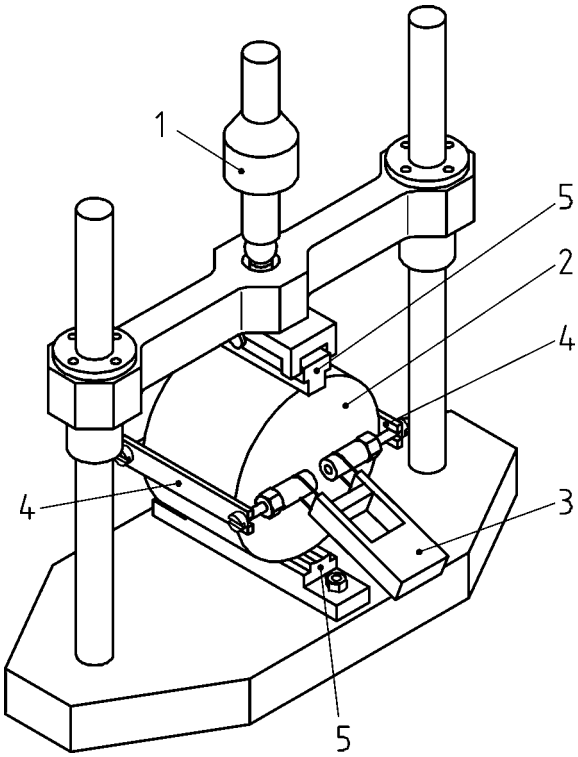
E.2.5 Système d'enregistrement et de mesure

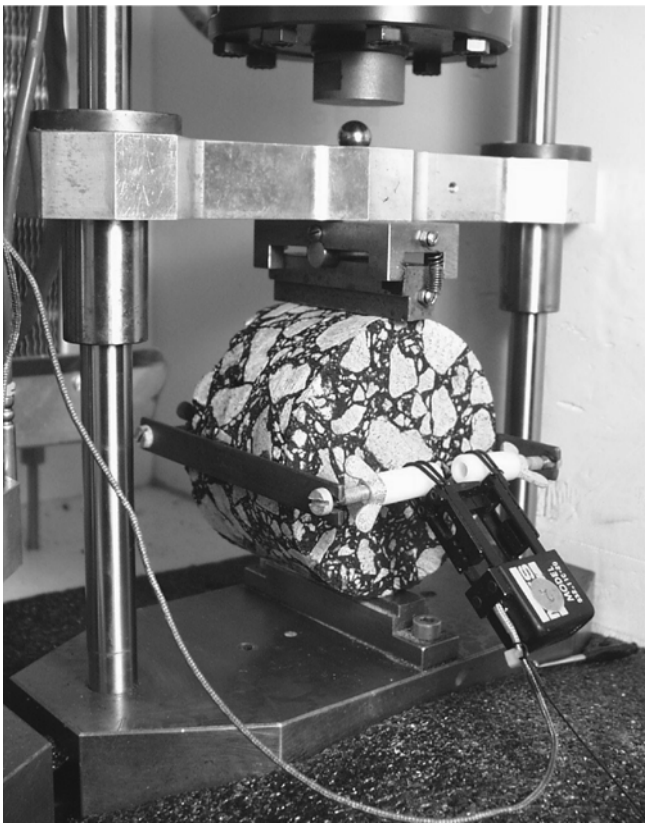
Les dispositifs d'enregistrement et de mesure pour déterminer la charge en compression et les déformations horizontales doivent pouvoir mesurer à une fréquence minimale de 10 Hz.

E.2.6 Cadre de chargement

Le cadre de chargement (voir Figure E.1) doit être composé de deux bandes de chargement. La bande supérieure doit être fixée à un profilé monté par l'intermédiaire d'une rotule sur des colonnes guides.

NOTE Les colonnes guidées par rotule centrent l'éprouvette, maintiennent les bandes de chargement dans le plan vertical et éliminent les mouvements indésirables de l'éprouvette pendant l'essai. La platine supérieure (qui pèse 1 000 g) applique une charge statique supplémentaire sur l'éprouvette





Légende

1 Cellule dynamométrique

2 Éprouvette d'enrobé

3 Extensomètre

4 Barres de déformation

5 Bandes de chargement

Figure E.1 — Dispositif de chargement avec barres de déformation, bandes de chargement et éprouvette en place

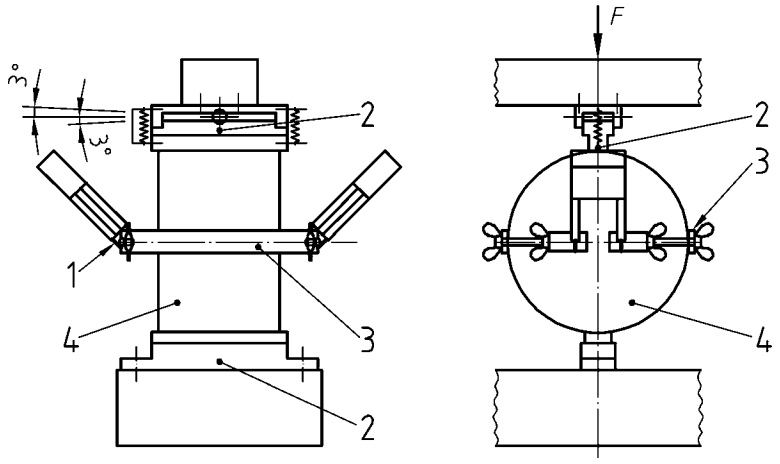
E.2.6.1 Bandes de chargement

Les bandes de chargement (voir Figure E.2) doivent avoir une surface concave avec un rayon de courbure égal au rayon de l'éprouvette d'essai et des bords arrondis. Les bandes de chargement pour éprouvettes de diamètre 100 mm et 150 mm doivent avoir des largeurs respectives de (12,7 ± 0,2) mm et de (19,1 ± 0,2) mm.

E.2.6.2 Barres de déformation

Deux bandes d'acier courbes d'un rayon de courbure égal au rayon de l'éprouvette d'essai auxquelles des transducteurs de déformation doivent être fixés. Les bandes d'acier doivent avoir une épaisseur de 2 mm, une largeur de 10 mm et (normalement) une longueur de 80 mm. Les bandes doivent être fixées de chaque côté du plan diamétral horizontal soit par de la colle ou par des ressorts (voir Figures E.1 et E.2). Les transducteurs doivent être disposés de telle manière que la variation du diamètre horizontal soit mesurée par la variation de la distance entre les deux barres, en prenant la valeur moyenne donnée par les deux transducteurs.

NOTE La longueur des barres dépend de l'épaisseur de l'éprouvette. Il est conseillé d'avoir un jeu de barres de différentes longueurs. À chaque extrémité des barres, il y a une vis avec un écrou en plastique pour le réglage du zéro des capteurs de déformation.



Vue de face **Vue de côté**

Légende

1 Barre de déformation

2 Bandes de chargement

3 Extensomètre

4 Éprouvette d'enrobé

Figure E.2 — Illustration des bandes de chargement et des barres de déformation

E.2.7 Dispositif de d'alignement

Un dispositif dont un exemple est donné dans la Figure E.3.

NOTE Le dispositif d'alignement permet de positionner et d'encoller les barres de déformation et de centrer les bandes de chargement. Le dispositif illustré dans la Figure E.3 convient tant pour les éprouvettes de diamètre 100 mm que pour celles d'un diamètre de 150 mm ainsi que pour les différentes longueurs de barres de déformation.

E.2.8 Colle

NOTE Une colle à séchage rapide de type cyanoacrylate convient.

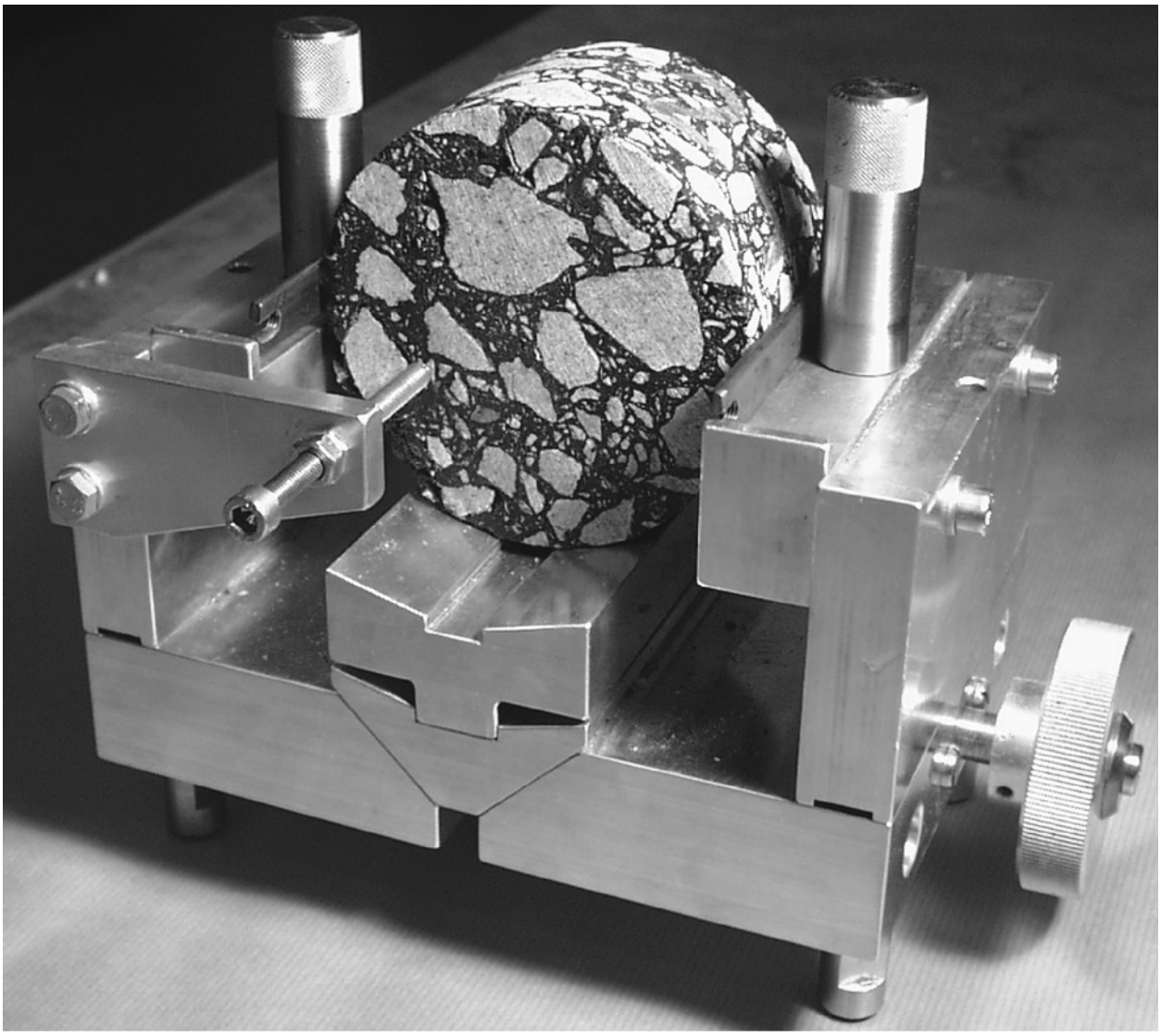


Figure E.3 — Exemple de dispositif d'alignement pour les éprouvettes d'un diamètre de 100 m et de 150 mm

E.3 Préparation de l'éprouvette

E.3.1 Eprouvette d'essai

10 à 18 éprouvettes doivent être préparées (voir E.4.2 et note). L'âge des mélanges compactés doit être d'au moins une semaine. Les éprouvettes cylindriques soumises à l'essai doivent être obtenues conformément à :

— éprouvette d'essai préparée en laboratoire par compacteur giratoire, EN 12697-31 ;

— éprouvette d'essai prélevée dans une plaque d'enrobé préparée en laboratoire, EN 12697-33:2003+A1 ;

— éprouvette d'essai préparée à partir d'une carotte prélevée dans la chaussée, EN 12697-27.

E.3.2 Dimensions de l'éprouvette

L'éprouvette doit avoir :

— une épaisseur d'au moins 40 mm et un diamètre de (100 ± 3) mm, pour une dimension maximale de granulat de 25 mm ; ou bien

— une épaisseur d'au moins 60 mm et un diamètre de (150 ± 3) mm, pour dimension maximale de granulat de 38 mm.

Les dimensions des éprouvettes doivent être mesurées en conformité avec EN 12697-29.

E.3.3 Position des bandes de chargement et des barres de déformation

Les barres de déformation doivent être positionnées et collées (si des ressorts ne sont pas utilisés) de chaque côté du plan diamétral horizontal à l'aide du dispositif d'alignement. Les bandes de chargement doivent être positionnées sur le plan diamétral vertical.

E.3.4 Conditionnement

Les éprouvettes doivent être placées dans l'enceinte thermostatique et maintenues à la température d'essai spécifiée, pendant une durée d'au moins 4 heures avant l'essai.

E.4 Mode opératoire

E.4.1 L'essai doit au moins s'étendre sur une plage de niveau de déformation d'environ 100 $\mu\varepsilon$ à 400 $\mu\varepsilon$ et la durée de vie fatigue du matériau essayé doit se situer dans une fourchette de 10^3 à 10^6 applications de charge.

E.4.2 Les éprouvettes doivent être soumises à essai à trois niveaux de contrainte avec au moins trois éprouvettes à chaque niveau, pour celles qui sont fabriquées en laboratoire et avec au moins cinq éprouvettes pour les carottes extraites de couches de chaussée.

NOTE Les carottes extraites de la route doivent être choisies au hasard afin d'être représentatives d'une section (voir aussi la note de E.5.6).

E.4.3 L'éprouvette doit être positionnée dans le dispositif de chargement de telle sorte que l'axe des barres de déformation soit perpendiculaire à l'axe des bandes de chargement.

E.4.4 Les capteurs de déformation doivent être montés et réglés au moyen de vis, pour permettre l'utilisation de l'étendue de mesure.

E.4.5 L'essai doit commencer à une valeur de chargement de 250 kPa. Une charge répétée en sinus carré doit être appliquée avec un temps de charge de 0,1 s et un temps de repos de 0,4 s. Si la déformation

affichée sur le moniteur pendant les dix premières applications est en dehors de la plage de déformation (100 à 400) $\mu\varepsilon$, l'essai doit être arrêté immédiatement et le niveau de chargement doit être réglé.

NOTE Dans presque tous les cas, 250 kPa est un niveau de contrainte qui convient en pratique. Les opérateurs expérimentés peuvent choisir un niveau de contrainte adapté selon la rigidité du matériau essayé.

E.4.6 Pendant l'essai, la charge et la déformation horizontale doivent être mesurées en continu et enregistrées à des intervalles pré-établis.

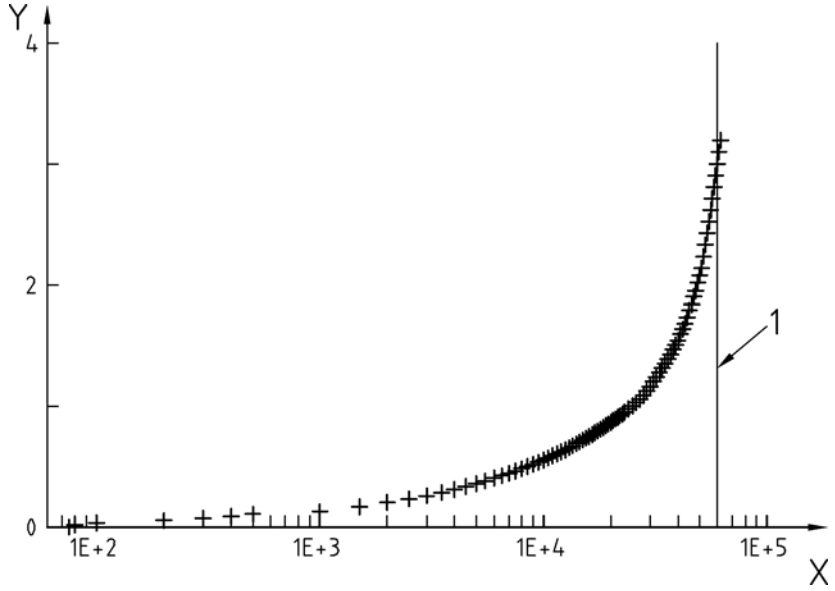
E.4.7 Lorsqu'une fissure visible apparaît sur l'axe vertical, l'essai doit être arrêté.

E.5 Calcul et expression des résultats

E.5.1 La procédure dans E.5.2 à E.5.6 doit être suivie pour chaque éprouvette soumise à essai.

E.5.2 La durée de vie avant rupture doit être définie comme étant le nombre total d'applications de charge occasionnant une cassure franche de l'éprouvette. La durée de vie avant rupture apparaît évidente si l'on considère la relation qui existe entre le logarithme du nombre d'applications de charge et la déformation horizontale totale (voir Figure E.5).

NOTE La durée de vie avant rupture peut aussi être définie lorsque la déformation (voir E.5.5) double par rapport à sa valeur initiale. Cette définition est en accord total avec la définition basée sur la rupture complète de l'éprouvette.



Légende

Y Déformation horizontale en millimètres (mm)

X Nombre d'applications de charge

1 Durée de vie avant rupture

Figure E.4 — Détermination de la durée de vie avant rupture d'une éprouvette

E.5.3 La déformation et la contrainte (facultative) maximum de traction au centre de l'éprouvette doivent être calculées en utilisant les équations suivantes :

$$\sigma_0 = \frac{2P}{\pi \times t \times \Omega} \qquad \text{(E.1)}$$

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{2\,\Delta H}{\Omega}\right) \times \left[\frac{1+3\,\nu}{4+\pi\times\nu-\pi}\right] \qquad \text{(E.2)}$$

E.5.4 Si $\nu = 0{,}35$, alors :

$$\varepsilon_0 = 2{,}1\frac{\Delta H}{\Omega} \qquad \text{(E.3)}$$

où

σ_0 est la contrainte de traction au centre de l'éprouvette, en mégapascals (MPa) ;

P est la charge maximale, en Newtons (N) ;

T est l'épaisseur de l'éprouvette en millimètres (mm) ;

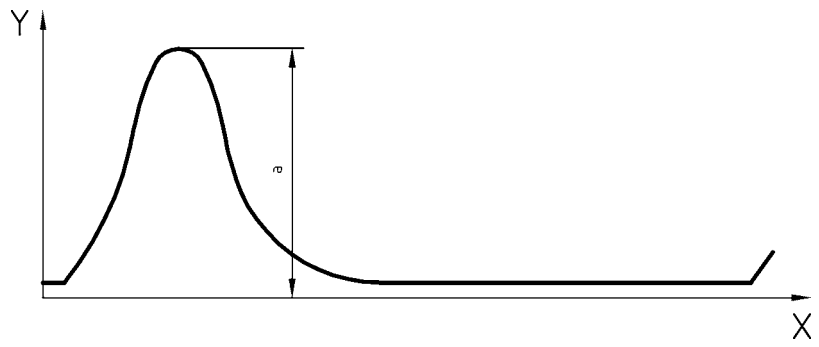
Ω est le diamètre de l'éprouvette en millimètres (mm) ;

ε_0 est la déformation de traction en $\mu\varepsilon$ au centre de l'éprouvette ;

ΔH est la déformation horizontale, en millimètres (mm).

E.5.5 La déformation initiale doit être calculée selon l'équation E.3 à partir de la déformation horizontale totale à la centième application de charge, selon illustration de la Figure E.6.

NOTE La déformation initiale doit être calculée après que l'enveloppe de la déformation se soit stabilisée et que la déformation répétitive soit devenue stable, ce qui survient normalement avant 60 applications de charge. La valeur de déformation initiale est calculée à partir de la différence entre la moyenne des déformations horizontales totales de 5 applications de charge de 98 à 102 et la moyenne des déformations horizontales d'au minimum 5 applications de charge de 60 à 64. Avec cette procédure, il est facile de calculer la déformation initiale par ordinateur à partir de la fiche technique de l'éprouvette.



Légende

Y Déformation horizontale

X Temps

a Déformation horizontale totale

Figure E.5 — Définition de la déformation horizontale totale

E.5.6 Le critère de fatigue d'un matériau bitumineux particulier doit être déterminé à partir des éprouvettes soumises à essai. La relation de régression par la méthode des moindres carrés doit être appliquée aux

données du logarithme de la déformation initiale comme variable indépendante et aux données du logarithme de la durée de vie avant rupture comme variable dépendante, selon les équations E.4 et E.5.

$$\lg\left(N_f\right) = k + n \times \lg\left(\varepsilon_0\right) \tag{E.4}$$

$$N_f = k \times \left(\frac{1}{\varepsilon_0}\right)^n \tag{E.5}$$

où

N_f est le nombre d'applications de charge ;

k, n sont des constantes du matériau ;

ε_0 est la déformation de traction en $\mu\varepsilon$ au centre de l'éprouvette.

NOTE Habituellement, si R^2 est inférieur à 0,9, il faut augmenter le nombre d'éprouvettes d'essai.

E.6 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit inclure les éléments dont la liste est indiquée au paragraphe 7 avec :

a) une présentation graphique et mathématique des critères de fatigue ;

b) le coefficient de corrélation R^2.

NOTE 1 résultat d'essai s'entend pour des mesures effectuées sur au moins 18 éprouvettes individuelles.

E.7 Fidélité

Sur la base d'essais de carottes, la moyenne de l'intervalle de confiance à 95 % de la déformation correspondant à $0{,}5 \times 10^6$ cycles de charge, est de 13 $\mu\varepsilon$.

Bibliographie

[1] [1] ISO 5725-2, *Précision (fidélité et précision) des méthodes et des résultats de mesures — Partie 2 : Méthode de base pour la détermination de la fidélité et de la reproductibilité d'une méthode de mesure standard.*

[2] [2] NF P 98-261-1, *Essai sur enrobés — Détermination de la résistance à la fatigue des mélanges bitumineux — Partie 1 : essais de fatigue de flexion en 2 points avec déplacement constant sur des éprouvettes isocèles trapézoïdales.*

[3] [3] DE LA ROCHE, C. *Essais de fatigue sur des mélanges bitumineux — Résultats de l'expérience d'exactitude. Revue Générale des Routes* n° 713 2001/03.

[4] [4] DELORME, J-L, J-F CORTE et J-L GOURDON. *Expériences d'exactitude dans les essais sur les revêtements routiers*. Revue Générale des Routes No. 713 2001/03.

[5] [5] FRANCKEN, L, et A VERSTRAETEN. *Programme d'essai inter-laboratoires sur module complexe et fatigue* RILEM RAPPORT 17, 1998.

[6] [6] SAID, S F, et J WAHLSTRضM. *Validation de la méthode de traction indirecte pour les caractéristiques de fatigue des mélanges bitumineux. 2e Congrès Euroasphalt & Eurobitume, Barcelone 2000.*

[7] [7] Théorie de l'essai de flexion, première partie : Théorie générale. Rapport Dienst Weg-en Waterbouwkunde P-DWW-96-008, Delft, Pays-Bas, 1996.

[8] [8] Théorie de l'essai de flexion, deuxième partie : Influence de 1) extrémités de profilé débordantes et 2) masses supplémentaires en mouvement. Rapport Dienst Weg-en Waterbouwkunde DWW-2002-083, Delft, Pays-Bas, 2002.

[9] [9] Théorie de l'essai de flexion, troisième partie : Pertes dans le système. Rapport Dienst Weg-en Waterbouwkunde DWW-2002-084, Delft, Pays-Bas, 2002.