

Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

**Collage des couches d'enrobés
Elaboration d'un seuil de rupture pour essai in
situ en cisaillement**

Auteur(s) / Organisme(s) :

Mustapha MASDAN – EUROVIA

Bertrand POUTEAU - EUROVIA

Thème de rattachement :

Thème 1- Mécanismes de dégradation des chaussées

DVDC/R/034

LC/19/DVDC/76

20 janvier 2022

Sommaire

Sommaire	2
1 Résumé	3
2 Introduction	4
3 Objectif	4
4 Démarche adoptée	4
5 Mise en équation	5
5.1 Dépendance du trafic	5
5.1.1 Loi de fatigue des interfaces.....	5
5.1.2 Effet du trafic sur la tenue mécanique du collage	7
5.2 Comportement viscoélastique	8
5.2.1 Effet de la température	8
5.2.2 Effet de la fréquence	10
5.3 Calage du modèle	12
6 Exemple d'application	12
7 Conclusions et perspectives	14
8 Références bibliographiques	15

1 Résumé

Résumé en français

Dans le cadre du thème 1.3 du projet DVDC, le dispositif mis au point par le groupe de travail permet de réaliser un essai de torsion de l'interface entre deux couches de chaussée. Parmi les résultats de l'essai, une valeur de contrainte est produite. Toutefois, cette évaluation mécanique n'est assortie, à ce jour, d'aucun seuil permettant de statuer sur l'état de l'interface (collée ou décollée).

Ce travail a permis d'élaborer une première approche permettant de déterminer un seuil de contrainte à confronter à des essais in situ intégrant divers paramètres environnementaux. Il est souligné que la validité des hypothèses formulées lors de l'élaboration de « projet de critère de performance » est sujette à validation expérimentale qui, au sens des auteurs de ce rapport doit prendre la forme d'un calage avec le terrain.

Abstract

Within the framework of theme 1.3 of the DVDC project, the device developed by the working group allows to carry out a torsion test of the interface between two pavement layers. Among the test results, a stress value is produced. However, this mechanical evaluation does not include, to date, any threshold allowing a decision to be made on the state of the interface (bonded or unbonded).

This work has made it possible to develop a first approach to determine a stress threshold to be compared with in situ tests integrating various environmental parameters. It is stressed that the validity of the hypotheses formulated during the elaboration of "draft performance criteria" is subject to experimental validation which, in the sense of the authors of this report, must take the form of calibration with the field.

2 Introduction

Dans le cadre du thème 1.3 du projet DVDC portant sur le comportement des interfaces entre couches d'enrobés, un dispositif mécanique permettant de qualifier le collage des couches d'enrobés a été mis au point par un groupe de travail regroupant plusieurs partenaires (ESTP, ENSAM, université de Limoges, PERENNE CHAUSSEES, Routes de France).

Le dispositif permet de réaliser un essai de torsion de l'interface entre deux couches de chaussée. Au cours de l'essai, la géométrie de l'échantillon, le couple appliqué à l'échantillon, la température, et le déplacement angulaire de l'échantillon font partie des paramètres mesurés. La tenue mécanique de l'interface est évaluée à la fin de l'essai en retenant la valeur du couple appliqué à la rupture, la raideur de l'interface et la contrainte de torsion.

Le groupe de travail a fait le choix de qualifier le collage des couches d'enrobé par la contrainte de torsion mesurée à la rupture de l'interface. Toutefois, cette évaluation mécanique n'est assortie, à ce jour, d'aucun seuil permettant de statuer sur l'état de l'interface (collée ou décollée).

3 Objectif

Cette étude a pour objectif de présenter une approche théorique permettant d'élaborer un seuil de de rupture pour les interfaces pour infrastructures routières.

On recherche en particulier τ_s défini tel que (1) :

$$\begin{cases} \tau_m < \tau_s : \text{interface non collée} \\ \tau_m \geq \tau_s : \text{interface collée} \end{cases} \quad (1)$$

Avec τ_m la valeur de contrainte de cisaillement mesurée lors de l'essai et τ_s le seuil de rupture

4 Démarche adoptée

L'approche de définition de seuil de rupture de collage des couches d'enrobé proposée dans ce travail s'appuie sur une analogie avec la démarche de construction des critères d'endommagement des matériaux bitumineux par fatigue sous chargement répété, présentée dans le guide SETRA 1994 de dimensionnement de chaussée et la norme NF P98-086.

Cette analogie permet, en particulier, d'identifier un certain nombre de paramètres ayant potentiellement une influence majeure sur la valeur de seuil de rupture de collage des couches d'enrobé. Ces paramètres sont rappelés ci-dessous :

- 1- Trafic NE : représenté en France par un nombre cumulé de passage d'essieux équivalents de référence de 13 t. En d'autres termes, **NE** correspond au nombre de cycles de chargement auquel l'interface sera soumise durant la durée de service de la chaussée étudiée.

- 2- Sollicitation mécanique τ_{max_interf} : correspond à la contrainte de cisaillement maximale induite dans l'interface au passage d'un essieu de référence. Cette contrainte dépend de la charge appliquée et de la structure de chaussée considérée.
- 3- Température θ : la résistance des matériaux bitumineux dépend de la température de réalisation de l'essai (comportement viscoélastique).
- 4- Fréquence f : la fréquence de sollicitation a une influence sur la résistance des matériaux bitumineux à cause de leur comportement viscoélastique.

Dans la suite de ce document, il est fait l'hypothèse que le seuil de rupture de collage est fonction des quatre paramètres susmentionnés :

$$\tau_s = \text{fonction}(NE, \tau_{max_struct}, \theta, f) \quad (2)$$

5 Mise en équation

Cette section propose une mise en équation de la contribution de chaque paramètre au seuil de rupture des interfaces.

5.1 Dépendance du trafic

5.1.1 Loi de fatigue des interfaces

Ce paragraphe reprend largement les résultats de la thèse de Malick Diakhaté portant sur la durabilité et la fatigue des interfaces dans les structures de chaussée. En effet, M. Diakhaté s'est intéressé, au travers d'un travail expérimental, à établir des lois de fatigue opérationnelles permettant de simuler l'endommagement de collage des couches d'enrobé.

Son travail expérimental consiste, entre autres choses, à réaliser des essais de fatigue en cisaillement (voir dispositif et principe de l'essai dans la figure 1 ci-dessous) sur plusieurs types d'interfaces : absence de couche d'accrochage et couches d'accrochage réalisées avec des émulsions bitumineuses différentes. Ces essais ont été effectués à deux températures différentes : 10°C et 20°C (voir figure 2).

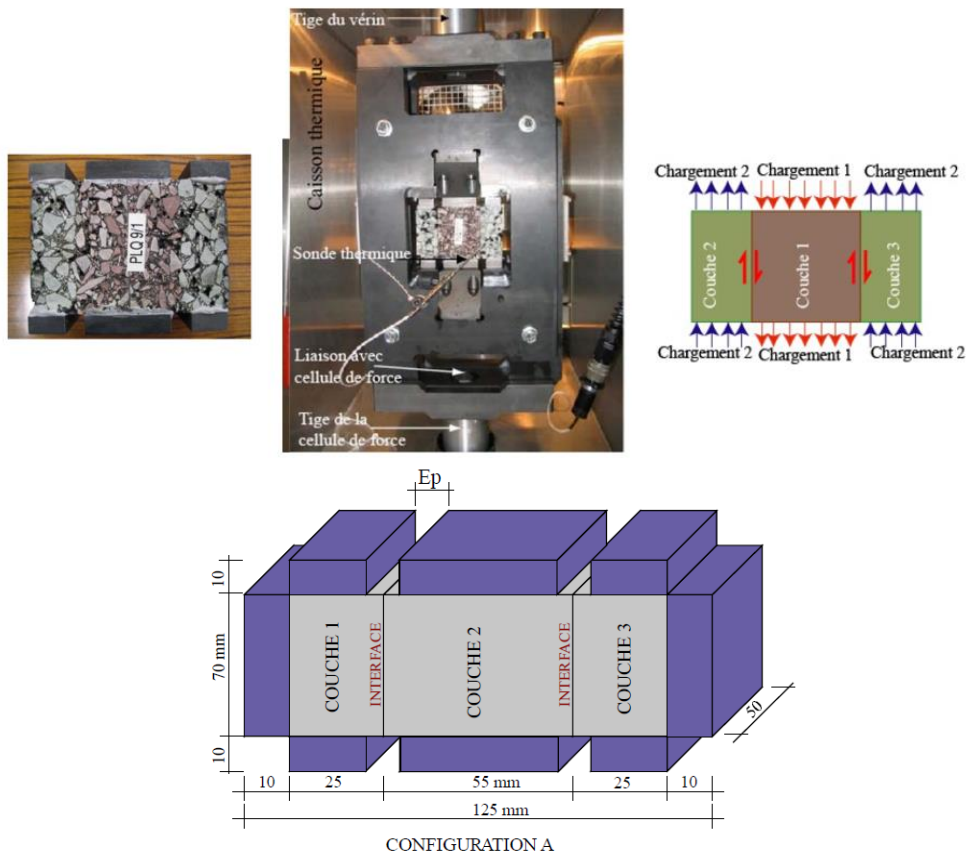


Figure 1. Dispositif d'essai de double Cisaillement (Diakhaté 2007). En haut vue du dispositif, en bas, dimension d'une éprouvette. Les précisions relatives au matériel d'essai sont données dans la thèse originale (Diakhaté 2007).

Une synthèse de ces lois de fatigue est présentée dans la figure ci-dessous :

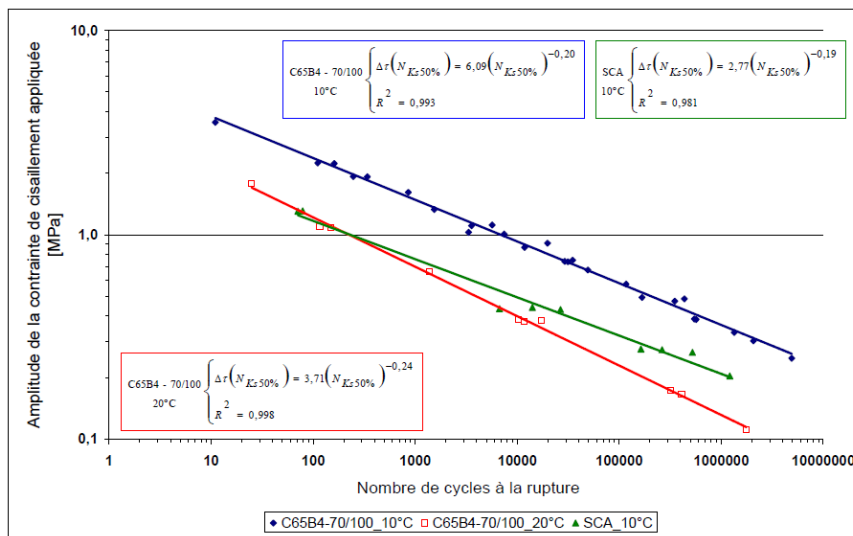


Figure 2. Courbes de Wöhler pour une couche d'accrochage au 70/100 suivant les modalités d'essai en double cisaillement à 10°C et 20°C (Diakhaté 2007). Dans la légende de la figure, le terme C65B4 désigne la classe de l'émulsion selon la norme EN 13808:2004 et le terme SCA signifie Sans Couche d'Accrochage.

Ces lois de fatigue permettent, comme le montre la figure ci-dessus, d'estimer la valeur de l'amplitude de la contrainte de cisaillement admissible en fonction du nombre de cycles de chargement appliqués à l'interface. Trois courbes de fatigue sont présentés dans cette figure :

- Courbe bleue : correspond à la loi de fatigue d'une interface comportant une émulsion, essai réalisé à 10°C
- Courbe en rouge : correspond à la loi de fatigue d'une interface comportant une émulsion, essai réalisé à 20°C
- Courbe en vert : correspond à la loi de fatigue d'une interface sans couche d'accrochage, essai réalisé à 10°C

Conclusions :

- Sur un repère bilogarithmique, une loi de fatigue de type similaire à la partie centrale de la courbe de Wöhler décrit de manière très satisfaisante la fatigue des interfaces ; elle peut être exprimée par l'équation suivante :

$$\tau_s(N) = \tau_0 \times N^b \quad (3)$$

- Le paramètre τ_0 dépend fortement du type de l'interface et de la température de l'essai ;
- La pente b semble peu sensible du type de l'interface et de la température de l'essai. En outre, les valeurs obtenues de b sont très proches de la pente de fatigue des enrobés (essai de fatigue par flexion) : $b \approx -\frac{1}{5}$.

5.1.2 Effet du trafic sur la tenue mécanique du collage

Pour une structure de chaussée bitumineuse, dimensionnée pour un trafic de **NE** d'essieux standards de référence, l'interface subira **NE** cycles de chargement à un niveau de contrainte de cisaillement τ_{\max_interf} , induit par le passage de l'essieu de 13t.

Connaissant les caractéristiques de la structure de la chaussée bitumineuse étudiée, à savoir les épaisseurs des matériaux et leurs caractéristiques mécaniques, l'amplitude de la contrainte de cisaillement τ_{\max_interf} , générée par le passage de l'essieu standard de référence peut être évaluée moyennant une modélisation numérique fondée sur le modèle de calcul de chaussée multicouches de Burmister. Plus concrètement, le logiciel Alize-Lcpc est utilisé pour déterminer la contrainte de cisaillement maximale aux interfaces étudiées.

Les lois de fatigue établies dans le cadre de la thèse de M. Diakhaté montrent qu'à un niveau de contrainte de cisaillement donné est associé un nombre de cycles de chargement de rupture, et vice versa. Pour une interface devant supporter NE cycles de chargement à un niveau de contrainte de cisaillement τ_{\max_struct} , la condition suivante doit être remplie :

$$\tau_{adm}(NE) = \tau_0 \cdot NE^{-\frac{1}{5}} \geq \tau_{\max_struct}$$

Soit à minima :

$$\tau_{adm}(NE) = \tau_0 \cdot NE^{-\frac{1}{5}} = \tau_{\max_struct}$$

Le paramètre τ_0 peut-être exprimé par l'équation ci-après : $\tau_0 = \tau_{\max_struct} \cdot NE^{\frac{1}{5}}$

Et la loi de fatigue pour la structure considérée devient : $\tau_s(N) = \tau_{\max_struct} \times \left(\frac{N}{NE}\right)^{-\frac{1}{5}}$

Ainsi le seuil de rupture peut être obtenu par :

$$\tau_s = \tau_{adm}(1) = \tau_{\max_interf} \cdot NE^{\frac{1}{5}} \quad (4)$$

Remarques :

- Les essais de fatigue présentés dans la thèse de M. Diakhaté ont été tous réalisés à une fréquence fixe (10 Hz). Il serait donc prudent d'introduire un coefficient d'ajustement permettant de prendre en compte l'effet de ce paramètre.
- La loi de fatigue dépend de la température à travers le paramètre τ_0 et donc de τ_{\max_struct} .
- Faute d'essais de fatigue oligocyclique, il est fait l'hypothèse que la loi de fatigue de type $\tau_s(N) = \tau_0 \times N^b$ reste valable pour les faibles nombres de cycles de chargement afin d'estimer le seuil de rupture du collage qui correspond à la rupture au premier chargement (cf., équation (3)) ;
- Les lois de fatigue établies dans la thèse de M. Diakhaté sont basées sur des cycles de chargement en cisaillement. Un calage est donc nécessaire pour avoir les lois de fatigue correspondant aux chargements en torsion.

5.2 Comportement viscoélastique

5.2.1 Effet de la température

Deux approches sont identifiées ici. Une approche dite « structure », où la température d'essai est répercutée dans la simulation mécanique de la chaussée et les modules d'élasticité des matériaux et une approche « essai » où la température de l'essai est corrigée d'un effet matériaux.

5.2.1.1 Approche structure

La réponse mécanique des structures de chaussée bitumineuse est sensible à la température en raison du comportement viscoélastique des matériaux bitumineux. En effet, la rigidité des enrobés est une fonction décroissante de la température, comme le montre les courbes de sensibilité à la température des matériaux bitumineux issues des bases de données de l'Université Gustave Eiffel (figure 3) :

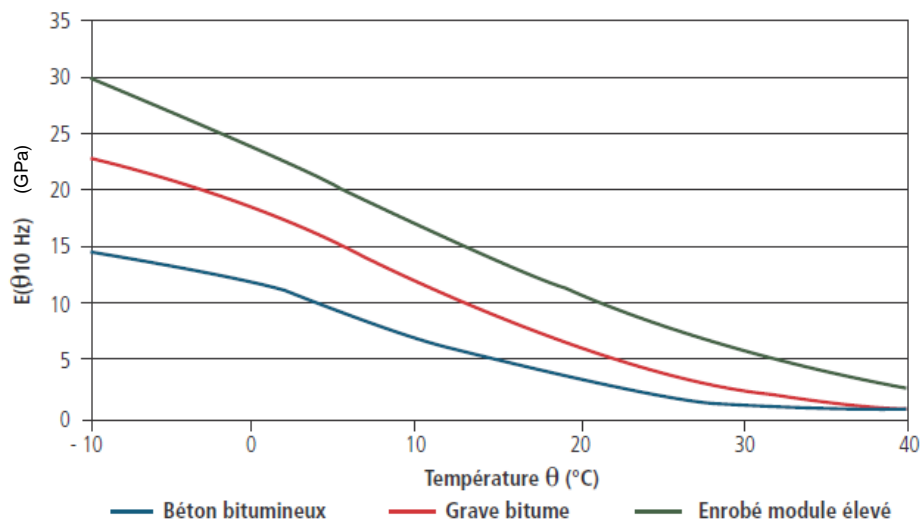


Figure 3. Sensibilité à la température des matériaux bitumineux (base de données IFSTTAR)

Pour tenir compte de la dépendance de la réponse mécanique de la structure à la température, il est proposé d'évaluer la contrainte de cisaillement τ_{\max_interf} , généré par le passage de l'essieu de 13t à la température à laquelle l'essai de torsion est réalisé θ_{essai} .

L'expression permettant d'estimer le seuil de rupture du collage (équation (4)) devient ainsi :

$$\tau_s = \tau_{\max_interf}(\theta_{essai}) \cdot NE^{\frac{1}{5}} \quad (5)$$

5.2.1.2 Approche essai

Le principe de cette approche est de considérer un coefficient de correction k_{temp} qui permet de passer de l'essai réalisé à la température réelle (T_{essai}) à la valeur qui aurait été obtenue si l'essai avait été réalisé à la température de référence ici choisi à 15°C (T_{ref}).

Pour l'homme de l'art, il est immédiat que :

- Lorsque $T_{essai} > T_{ref}$: la contrainte mesurée est inférieure à la contrainte qui aurait été mesurée à la température de référence

Lorsque $T_{essai} = T_{ref}$: les contraintes sont égales ($k_{temp} = 1$)

- Lorsque $T_{essai} < T_{ref}$: la contrainte mesurée est supérieure à la contrainte qui aurait été mesurée à la température de référence

Il est attendu que ce coefficient soit non linéaire. La littérature identifiée ne fournit pas suffisamment de données expérimentales pour proposer une expression du coefficient k_{temp}

Il apparaît nécessaire de poursuivre en tranche 4 du projet les campagnes d'essai en laboratoire afin de renseigner les valeurs expérimentales manquantes sur des gammes de températures utiles aux interprétations (par exemple sur une gamme jusqu'à [0°C – 40°C]).

5.2.2 Effet de la fréquence

Les essais de fatigue présentés plus haut ont été tous réalisés à une unique fréquence de $f = 10 \text{ Hz}$. Il est donc délicat d'identifier l'effet de la fréquence dans l'équation (3), contrairement à la température dont l'effet sur la loi de fatigue des interfaces est identifié à travers le paramètre τ_0 . De ce point de vue l'expression (5) n'est valable que pour une fréquence de sollicitation de 10 Hz :

$$\tau_s(\theta_{\text{essai}}, 10 \text{ Hz}) = \tau_{\text{max_interf}}(\theta_{\text{essai}}, 10 \text{ Hz}) \cdot NE^{\frac{1}{5}} \quad (6)$$

Le seuil de rupture du collage τ_s étant obtenu par une rupture au premier chargement, la correction en fréquence peut être évaluée à l'aide d'essais monotones. En effet, l'essai monotone peut être assimilé à un essai de fatigue avec une rupture au premier chargement comme illustré dans la partie en bleu de la figure 4 ci-après :

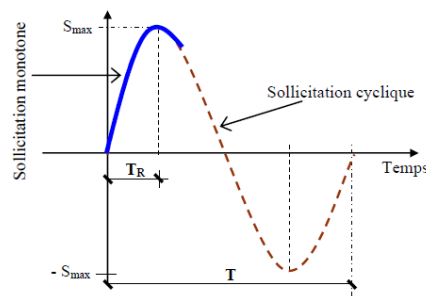


Figure 4. Schématisation de la relation monotone cyclique d'après Diakhaté (2007)

De ce point de vue, un essai monotone provoquant la rupture du collage en un temps T_r est équivalent à un essai de fatigue dont la fréquence s'exprime par :

$$f_{eq} = \frac{1}{4 \cdot T_r} \quad (7)$$

L'évaluation de l'effet de la fréquence passe ensuite par une analyse de la variation de la contrainte de cisaillement de rupture obtenue par des essais monotones à fréquences équivalentes différentes. Ce travail expérimental a été réalisé par M. Diakhaté, la corrélation expérimentale qui en est ressortie est présentée dans la figure 5 :

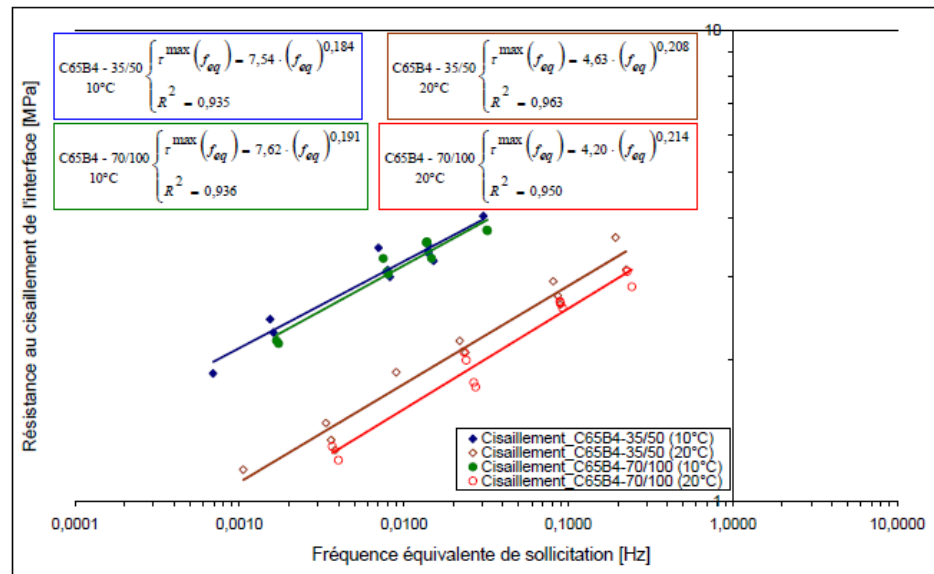


Figure 5. Relation entre fréquence équivalente et la résistance en cisaillement d'après Diakhaté (2007). Dans la légende de la figure, le terme C65B4 désigne la classe de l'émulsion selon la norme EN 13808:2004.

De manière générale, l'effet de la fréquence de la sollicitation se traduit par l'équation suivante :

$$\tau_r(f) \approx A \cdot f^{0,2} \approx A \cdot f^{\frac{1}{5}}$$

En particulier pour la fréquence à laquelle les essais de fatigue sont réalisés :

$$\tau_r(f_{réf} = 10 \text{ Hz}) = A \cdot f_{réf}^{\frac{1}{5}}$$

Le coefficient de correction en fréquence s'exprime ainsi par :

$$k_t(f_{eq}) = \frac{\tau_r(f_{eq})}{\tau_r(f_{réf} = 10 \text{ Hz})} = \left(\frac{f_{eq}}{f_{réf}}\right)^{\frac{1}{5}}$$

Ou plus simplement en fonction de temps de rupture T_r

$$k_t(T_r) = (4 \cdot f_{réf} \cdot T_r)^{-\frac{1}{5}}$$

Avec $f_{réf} = 10 \text{ Hz}$

En tenant compte de l'effet de la fréquence, l'expression du seuil de rupture devient :

$$\tau_s(\theta_{essai}, T_r) = \tau_{\max_interf}(\theta_{essai}, 10 \text{ Hz}) \cdot \left(\frac{NE}{40 \cdot T_r}\right)^{\frac{1}{5}} \quad (8)$$

5.3 Calage du modèle

L'équation (8) permet de donner une valeur approximative du seuil de rupture du collage d'une structure donnée. Elle s'appuie sur les résultats d'essais laboratoire (essais de fatigue en double cisaillement) et une modélisation mécanique de la chaussée (τ_{\max_interf}).

Un calage global est nécessaire pour rendre compte de l'écart entre le modèle établi et la réalité de terrain. Il est proposé, dans ce sens, d'introduire un coefficient d'ajustement k_c dans l'équation (8). Ce coefficient doit être défini à partir de valeurs de contraintes de rupture mesurées sur terrain pour des interfaces réputées collées et décollées.

Le coefficient d'ajustement k_c doit permettre de tenir compte des limites du modèle proposé dans l'équation (8) que sont, entre autres choses :

- Effets d'échelle : limitations liées à la transposition des résultats mesurés au laboratoire à l'échelle d'une structure de chaussée réelle ;
- Type d'essai : le modèle décrit par l'équation (8) s'appuie sur des d'essais en cisaillement alors que le dispositif de mesure retenu dans le cadre du projet DVDC est un essai en torsion ;
- Modélisation numérique : la détermination de τ_{\max_interf} passe par un modèle (modèle de Burmister) s'appuyant sur plusieurs hypothèses simplificatrices (exemple : les couches sont considérées infinies dans le plan) ;
- Interpolation de la loi de fatigue : le seuil de rupture a été obtenu par interpolation d'une loi de fatigue classique qui n'est généralement valable qu'à partir de quelques dizaines de milliers de cycles. Le comportement en fatigue des matériaux à faible nombre de cycles est mieux décrit par un essai spécifique appelé essai de fatigue oligocyclique.
- Balayage : tous les points de l'interface ne sont pas chargés à la contrainte de cisaillement maximale τ_{\max_interf} à chaque passage des charges roulantes.

$$\tau_s(\theta_{\text{essai}}, T_r) = \tau_{\max_interf}(\theta_{\text{essai}}, 10 \text{ Hz}) \cdot \left(\frac{NE}{40 \cdot T_r}\right)^{\frac{1}{5}} \cdot k_c \quad (9)$$

6 Exemple d'application

Structure :

Nous nous proposons d'appliquer la méthode à une structure tirée du catalogue 1998. Cette structure est constituée de :

- 6 cm de BBSG 3 en couche de roulement,
- 8 cm de GB 3 en couche de base,
- Un sol support de portance PF3 ($EV_2 \geq 120 \text{ MPa}$).

Cette structure est dimensionnée pour $NE = 2 \times 10^5$ passages d'essieux de 13 t

La structure est modélisée sous le logiciel Alize (figure 6) par les paramètres mécaniques (module de Young et coefficient de Poisson) et l'épaisseur de chaque couche :

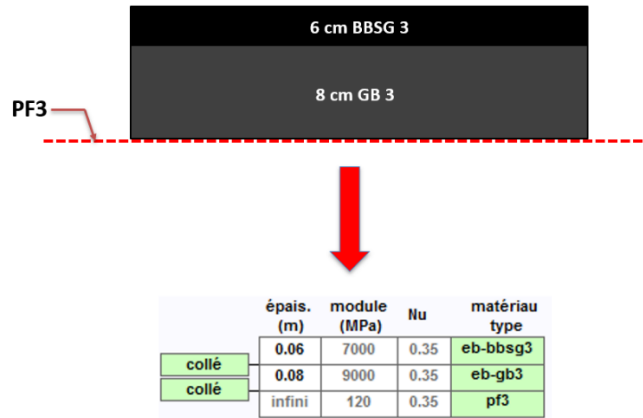


Figure 6. Structure prise en compte pour l'application numérique de la méthode

Calcul de la contrainte de cisaillement :

Les profils des contraintes de cisaillement (σ_{XZ} et σ_{YZ}) dans l'interface BBSG 3 /GB 3, induites par le passage d'un essieu de 13t sont donnés dans la figure 7 ci-après :

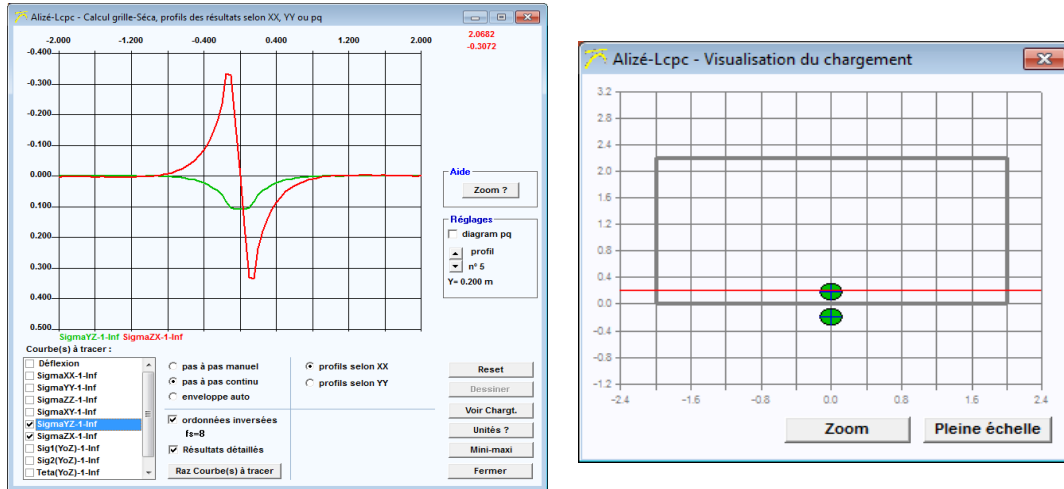


Figure 7. Illustration des valeurs de contraintes extraites sous Alizé.

La contrainte de cisaillement maximale est : $\tau_{max} = 0,34 \text{ MPa}$.

Hypothèses de conditions d'essai :

- Température d'essai : $\theta_{essai} = 15^\circ\text{C}$;
- Temps de rupture : $T_r = 25 \text{ s}$

Seuil de rupture du collage :

En prenant $k_c = 1$

$$\tau_s(\theta_{essai}, T_r) = \tau_{max_interf} (15^\circ\text{C}, 10 \text{ Hz}) \cdot \left(\frac{NE}{40 \cdot T_r}\right)^{\frac{1}{5}} \cdot k_c = 0,98 \text{ MPa}$$

7 Conclusions et perspectives

Ce travail a permis d'élaborer une première approche permettant de déterminer un seuil de contrainte à confronter à des essais in situ intégrant :

- Trafic NE : nombre d'essieux de référence 13 t;
- Sollicitation mécanique $\tau_{(max_interf)}$: contrainte de cisaillement induite par les charges roulantes;
- Température de l'interface θ ;
- Fréquence de la sollicitation f ;

Il est souligné que la validité des hypothèses formulées lors de l'élaboration de « projet de critère de performance » est sujette à validation expérimentale :

- Le fait de réaliser l'essai in situ implique, que contrairement aux essais de laboratoire, il est inapplicable de préconiser une température d'essai. Cette température d'essai doit être mesurée in situ et la valeur de contrainte obtenue doit être confrontée à un seuil prenant en compte cette mesure.
- Le passage monotone-fatigue est pris en compte en l'état actuel de connaissance.
- sur l'impact de la température, il est souligné que deux corrections sont proposées. Une approche structure et une approche essai. L'approche essai apparaît plus pertinente et devra faire l'objet de campagne d'essai complémentaires, par exemple lors de la tranche 4 afin de proposer des valeurs numériques pour ce coefficient.
- Il est envisagé de prendre en compte différente modalité d'essai de cisaillement (torsion, cisaillement direct, ...) par l'intégration d'un coefficient « Essai »
- La contrainte normale n'est pas prise en compte pour établir ce seuil. Ceci se traduit par une probable surestimation du seuil sans qu'il soit possible d'évaluer cette surestimation. Le coefficient de calage qui sera établi sur la base d'un retour d'expérience terrain pourra prendre en compte ce biais
- Les essais d'échelle, et particulièrement la taille de l'éprouvette, le diamètre, l'épaisseur des couches, ne sont pas pris en compte ici. Là encore, le retour d'expérience terrain permettra d'avoir un œil critique sur ces effets.

Toutes ces perspectives confirment l'absolue nécessité de réaliser un calage avec le terrain.

8 Références bibliographiques

Guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussées », Guide technique SETRA - LCPC, décembre 1994.

NF P98-086 : Mai 2019 Dimensionnement structurel des chaussées routières - Application aux chaussées neuves

Diakhate M. (2007). Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée. Thèse Univ. de Limoges