
Comportement en fatigue des enrobés de chaussées aéronautiques sous actions de grande intensité

M. Merbouh*,* — D. Breyse* — L. Moriceau** — N. Laradi*****

* CDGA/Ghymac, d.breyse@cdga.u-bordeaux1.fr

Université Bordeaux 1

B18 avenue des facultés, 33405 Talence Cedex

** LRPC Bordeaux

*** USTHB Bab Zouar, Alger

RESUME. Les couches de la chaussée sont exposées à des efforts de flexion qui ne provoquent pas immédiatement la rupture, mais dont la répétition peut aboutir à terme à une fissuration par fatigue. A la différence des chaussées routières, les enrobés bitumineux sur les pistes aéronautiques sont soumis à des forts niveaux de sollicitation à chaque passage d'essieu.

Le dimensionnement de la structure d'une chaussée aéronautique doit tenir compte du trafic des avions lourds et de son évolution (avions très gros porteurs de type Airbus A380 et B777 ...), d'où l'importance de bien connaître le comportement des enrobés dans ce contexte particulier.

On a entrepris dans ce but une campagne d'essais de fatigue sous chargement de forte amplitude et dont la forme reproduise la sollicitation induite par des essieux tandem. L'objectif est d'établir des lois de fatigue adaptées, qui serviront de base au dimensionnement de ces chaussées. Les difficultés principales sont détaillées, et de premiers résultats présentés et discutés.

MOTS-CLES : chaussée aéronautique - enrobé bitumineux - essieu tandem – fatigue - grandes déformations.

ABSTRACT. Bending stresses in pavement layers do not induce direct failure but progressive fatigue damage and cracking. In airport pavements, the loading magnitude is much larger than in usual road structures, and one needs to know the material response at such high strain levels. The trafic evolution (with new very heavy planes, like Airbus A380 or B777) also induces specific loadings, whose strain time-history depends on the axle geometry. Thus, it seems important to better know the material response under such loadings.

An experimental program is under development, with the purpose of identifying the fatigue laws in this context, in order to improve the design rules of airport pavements. This paper presents the experimental program and the main difficulties which have been encountered. First results are presented and discussed.

KEYWORDS : airport pavement – bituminous mix - fatigue – large strains – twin axle

1. Introduction

Les enrobés sont soumis, sur la piste aéronautique, à des sollicitations de courte durée à chaque passage d'essieu. Les couches de la chaussée sont soumises à des efforts de flexion qui ne provoquent pas immédiatement la rupture, mais dont la répétition peut aboutir à terme à une fissuration par fatigue. Dans le dimensionnement, la chaussée est considérée comme des couches superposées élastiques, linéaires, homogènes, isotropes, infinies dans le plan [Corté, 2005]. Les effets des chargements à essieux multiples sont actuellement pris en compte sous la forme de coefficients d'agressivité moyens, dépendants de la géométrie des essieux et du type de structure, qui résultent d'hypothèses simplifiées de superposition des champs élastiques [Guide 1994].

Les évolutions prochaines du contexte d'exploitation (apparition des très gros porteurs, de type Airbus A380 et B777) impose une analyse plus fine du comportement des matériaux sous ce type de sollicitation. La spécificité du chargement (très fort niveau de déformation, de l'ordre de 4 à 5 fois celui des chaussées routières, et forme particulière du signal temps-déformation sous les essieux jumelés) doit être au cœur d'une telle analyse. L'objectif est d'adapter l'essai classique de fatigue, sur éprouvette trapézoïdale, pour prendre en compte ce contexte particulier, améliorer la connaissance des enrobés et les règles de dimensionnement.

2. Sollicitation par fatigue d'une chaussée

L'application d'une charge roulante induit une déformation en flexion des couches de la chaussée. Cette flexion entraîne des sollicitations en compression verticale à l'endroit de la charge et des sollicitations en traction horizontale à la base des couches d'enrobé [Corté, 2005]. A la base d'une couche de roulement, l'amplitude et la fréquence de la déformation induite dépendent de la profondeur du point, de la géométrie du dispositif de chargement (roues jumelées ou simples), de la température et de la vitesse de passage de la roue. Le caractère visco-élastique du matériau joue aussi un rôle non négligeable [De la Roche, 1996, Rivière, 1996]. C'est le cumul des sollicitations en traction qui entraîne l'endommagement puis la rupture par fatigue.

Les essais normalisés en France sont conduits sur des éprouvettes trapézoïdales collées sur leur grande base, sur lesquelles on impose soit l'effort, soit le déplacement à l'extrémité libre. Ce dispositif est censé reproduire l'état de sollicitation alterné à la base des couches d'enrobé. L'essai est conduit à une fréquence de l'ordre de 10 Hz, cette fréquence étant liée à la vitesse des véhicules (soit les poids lourds sur une chaussée routière). Du fait du caractère visco-élastique du matériau, le mode d'asservissement, la température et la fréquence de l'essai ont une influence significative. On a montré que ménager des temps de repos peut modifier très sensiblement la durée de vie des éprouvettes [Bruhat, 1999, Domec, 2005].

3. Problématique et objectifs

L'évolution du trafic aéronautique et de l'architecture des appareils ont créé de nouvelles conditions de sollicitation, telles que les chargements multiples à grandes déformations. Une des principales critiques de l'essai de fatigue normalisé est qu'il n'est pas représentatif du comportement dans ces conditions :

- il serait par exemple plus judicieux de définir une déformation ϵ_5 pouvant être supportée pendant 10^5 cycles que la valeur usuelle ϵ_6 ,
- il convient d'adapter les fréquences pour être plus représentatifs des vitesses de passage des avions,
- il faut étudier finement l'influence éventuelle de la forme du signal de sollicitation.

L'une des difficultés majeures est due au caractère fortement hétérogène du matériau à l'échelle de l'éprouvette, qui induit une dispersion expérimentale élevée.

Ce travail s'insère dans le cadre d'une étude générale du LCPC (thème CH17, Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux), et plus particulièrement dans l'opération de recherche 11P063 (outils avancés de calcul et de dimensionnement des structures de chaussées). La campagne expérimentale repose sur la conduite d'essais de fatigue à grandes amplitudes de déformation, selon deux types de signaux, sinus (sollicitation usuelle) et tandem, dont les objectifs sont :

(a) de quantifier l'effet des grandes amplitudes de sollicitations, qui dépassent celles appliquées par un essieu de 130 kN dans les chaussées routières, d'une part et l'effet des signaux multiples d'autre part : quelle équivalence établir entre un nombre d'essieux tandem et un nombre d'essieux uniques ?

(b) de déterminer des lois de fatigue dans lesquelles les déformations imposées sont largement supérieures à celles appliquées en fatigue usuelle.

4. Démarche expérimentale

4.1. Matériau

Le matériau choisi est le matériau de référence de l'étude LCPC. Il s'agit d'un béton bitumineux cloué (BBC 0-6mm) avec une teneur en liant de 6.85 %. Le liant est un bitume pur 50/70 (AZALT 50/70 – Total Donge). La compacité théorique du matériau est proche de 95 % [Bodin, 2006]. Les échantillons ont été fabriqués au LCPC Nantes et sciés dans des plaques de 400x600x120 mm, compactées au compacteur de plaque (NF EN 12697-33). Le module complexe de ce matériau est égal à environ 8000 MPa à 20°C-25 Hz et à 14000 MPa à 10°C-10 Hz.

4.2. Conditions expérimentales

4.2.1. Chargements multiples

L'éprouvette est sollicitée en fatigue cyclique. Un signal est généré numériquement, de manière à reproduire une forme variable (figure 1) en fonction d'un seul paramètre de forme λ qui permet de passer progressivement d'un signal sinusoïdal à 25 Hz à un signal tandem ($0 \leq \lambda \leq 1$). Comme le montre la figure 1, la fréquence du signal tandem est divisée par trois, et est donc égale à 8,33 Hz. Etant donnée l'influence de la fréquence sur la réponse du matériau, il faudra être en mesure de distinguer le rôle de la fréquence de celui de la forme du signal. Compte tenu des capacités du système d'application d'effort de la machine de fatigue du LRPC-Bordeaux ($F_{\max} = 12\text{daN}$), ces essais à fortes amplitudes sont effectués à une température de 20°C, plus élevée que la température habituelle des essais de fatigue.

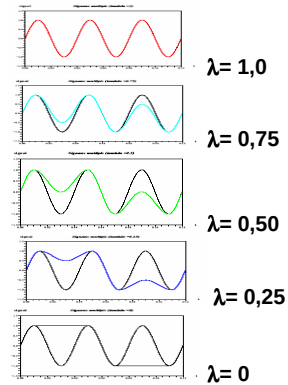


Figure 1. Illustration des différentes formes de signaux

4.2.2. Matériels d'essai

Un schéma de fonctionnement de l'asservissement est présenté à la figure 2. Le banc d'essai comporte quatre pots vibrants permettant de tester plusieurs éprouvettes simultanément dans des conditions identiques. Les quatre éprouvettes peuvent évoluer indépendamment. Lors de l'essai, le système régule le pot vibrant sur la voie de chaque éprouvette.

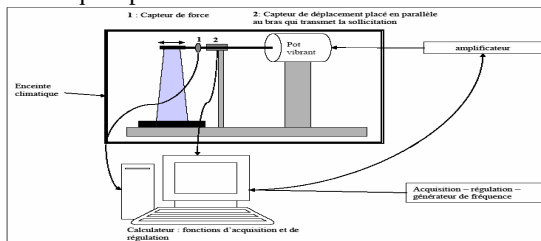
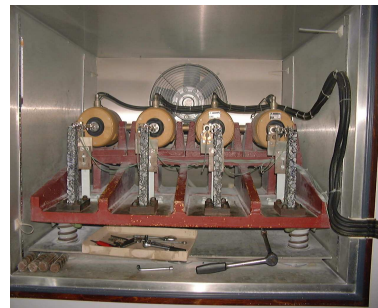


Figure 2. Schéma de fonctionnement de l'asservissement de l'essai et vue d'ensemble de la machine de fatigue



4.3. Essai de fatigue à grande déformation

Le programme d'essai vise à balayer (en prenant trois valeurs différentes de déformation) le spectre des amplitudes de sollicitations aéronautiques, en visant des

durées de vie allant de 10^4 à 10^5 cycles. On impose un déplacement maximal constant en tête, dont on déduit une valeur de déformation ε_f . La température est constante à 20°C. On s'efforce de reproduire en laboratoire les conditions réelles de sollicitation à grande déformation, en utilisant le protocole de chargement « logiciel SignalCalc ». Pour des raisons de capacité de stockage du signal synthétique de pilotage, les essais sont réalisés en faisant se succéder des « trains » constitués d'une série de périodes de fatigue d'une durée T_f ($T_f = 12$ s, soit 300 cycles sinus à 25 Hz et 100 cycles tandem à 8,33 Hz) et d'une phase de repos d'une durée T_r ($T_r = 0.5$ s). Du fait de problèmes relatifs à l'asservissement, la forme du signal de sollicitation n'est pas totalement stabilisée durant les dix premiers cycles de chaque train.

Par ailleurs, du fait de la viscoélasticité, la forme du signal tandem imposé n'est pas exactement celle du signal récupéré : pour chaque demi-cycle tandem, l'amplitude de la déformation sur la deuxième bosse est plus forte que celle de la déformation de la première bosse (le constat inverse peut être fait pour l'effort). Ce constat pose problème quant à la définition d'une déformation de référence pour chaque essai, qui pourra être, dans un deuxième temps, utilisée pour identifier les lois de fatigue.

5. Procédure d'analyse de l'essai de fatigue à grande déformation

5.1. Résultats bruts

Les sorties sont acquises (déplacement en tête et effort) avec un pas de temps de l'ordre de 1.04 s, soit environ une valeur tous les 8 à 9 cycles pour le signal tandem et une valeur tous les 26 cycles pour le signal sinus. Chaque valeur acquise est le maximum sur une fenêtre temporelle. L'objectif du traitement de chaque essai est de déduire un couple de valeurs (ε , N_f) de la manière la plus objective possible. Il convient par exemple d'éliminer des fichiers les valeurs acquises durant les phases de repos, qui fournissent des informations de raideurs non significatives. Les allures des variations de la déformation et de la raideur sont fournies ci-dessous (figures 3 et 4). La valeur de N_f est, par analogie avec l'analyse de l'essai de fatigue continue, le nombre de cycles correspondant à une perte de raideur de 50 %. Pour la valeur de déformation, la figure 4 montre que l'asservissement ne permet pas d'assurer sa constance pendant l'essai.

5.2. Détermination de la durée de vie

La procédure suivie est détaillée sur la figure 5. La courbe (N , raideur) est classiquement divisée en trois phases :

- dans une première phase, on observe une rapide perte de raideur, qui est habituellement reliée à l'échauffement et à la thixotropie du matériau (ici jusqu'à environ 4000 cycles) ;
- dans une deuxième phase, on observe une perte de raideur plus lente, avec une pente approximativement constante. Cette phase est celle de l'endommagement diffus progressif du matériau (ici jusqu'à environ 12000 cycles) ;

- la troisième phase est celle de l'endommagement catastrophique, qui s'accompagne en général du développement d'une macrofissure dans l'éprouvette. Le domaine correspondant à une perte de raideur de 50 % se trouve dans cette phase.

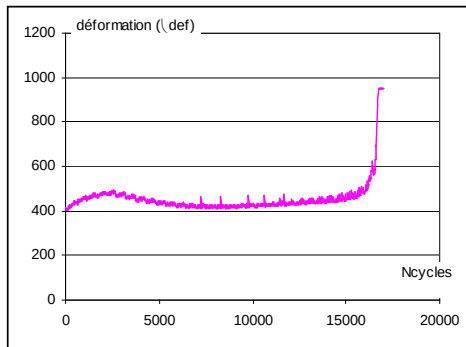


Figure 3. Variation de la déformation en fonction du nombre de cycles.

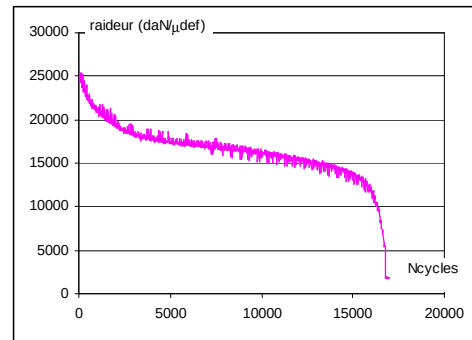


Figure 4. Variation de la raideur en fonction du nombre de cycles.

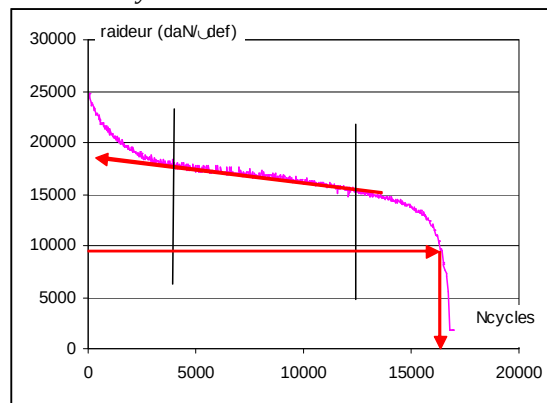


Figure 5. Procédure d'analyse d'une courbe de fatigue

La procédure consiste à rechercher l'intercept entre l'axe des ordonnées et la droite de régression tracée en phase 2. La valeur trouvée pour la raideur est considérée comme étant la raideur initiale K_0 . On trouve sur cette courbe une valeur de 18 940 daN/μdef.

La deuxième étape consiste à rechercher le nombre de cycles pour lequel on a perdu la moitié de la raideur. On trouve ici N_f égal à environ 16 400 cycles. Remarquons que si l'on avait choisi comme raideur initiale celle mesurée en début d'essai (ici 24 900 daN/μdef), le même critère de perte de 50 % aurait conduit à $N_f = 15 800$ cycles, soit un résultat très voisin. Cette faible différence résulte de la détérioration très rapide de la raideur dans la troisième phase de la courbe.

Une autre difficulté consiste à identifier la valeur de la déformation de référence, étant données les variations relevées sur la figure 3. On choisit de retenir la valeur moyenne ϵ_{moy} dans la plage de la phase 2, soit ici 427 μdef .

6. Analyse des lois de fatigue

Les variables du plan d'expériences sont la forme du signal tandem (avec quatre valeurs du coefficient λ) et le niveau de déformation. Pour chaque valeur de λ , nous avons travaillé sur trois lots de 4 éprouvettes, en imposant des niveaux de déformation permettant de viser des durées de vie encadrant la valeur de 10^5 cycles. Les couples de valeurs (ϵ_{moy} , N_f), ainsi déterminés pour chaque forme du signal permettent de tracer la droite de fatigue, selon la norme NF98-261-1. La figure 6 regroupe les résultats pour trois séries d'essais et les droites de régression calculées. On a reporté d'une part les essais de type sinus, qu'ils aient été obtenus via un essai de fatigue continu classique (figurés carrés pleins) ou via l'essai avec des trains, pour la valeur particulière de $\lambda = 1$ (figurés losanges pleins), et d'autre part les essais tandem avec $\lambda = 0$ (figurés triangle). Les droites de régressions ne sont reportées que pour la première et la troisième série.

On remarque :

- que les pentes des droites de fatigue sont très voisines : ici $1/b = 0.232$ pour l'essai de fatigue continue, et $1/b = 0.242$ pour l'essai tandem $\lambda = 0$,
- les valeurs calculées de la déformation ϵ_5 sont, elles aussi, très proches : $\epsilon_5 = 321 \mu\text{def}$ en fatigue continue, $\epsilon_5 = 338 \mu\text{def}$ en fatigue sinusoidale avec $\lambda = 1$ et $\epsilon_5 = 337 \mu\text{def}$ en fatigue sinusoidale avec $\lambda = 0$.

De toute évidence, on ne note pas de différence manifeste entre les résultats obtenus pour les deux valeurs de λ , correspondant aux deux signaux les plus différents de la figure 1, et les résultats obtenus sont compatibles avec ceux obtenus en fatigue continue. Les résultats, non reportés sur la figure, obtenus avec les valeurs intermédiaires de λ , conduisent aux mêmes conclusions.

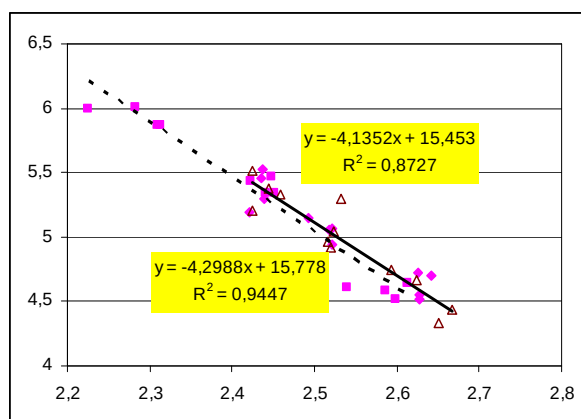


Figure 6. Droites de fatigue pour différents types de chargement

Les effets du chargement tandem combinent en fait deux influences : (a) celle de la forme du signal (pour un signal avec $\lambda = 0$), la valeur absolue de la déformation est plus souvent voisine de son maximum qu'avec un signal sinusoïdal, la sollicitation apparaît donc plus agressive, (b) celle de la fréquence, puisque, pour les signaux choisis, la sollicitation tandem s'applique avec une fréquence trois fois moindre que la sollicitation sinusoïdale. Il semble donc ici, sous réserve de la précision des mesures, que ces deux effets se compensent approximativement et qu'un passage de bogie tandem (un cycle tandem de $3/25 = 0,12$ s) ait le même effet que trois passages de roues simples (3 cycles sinus à 25 Hz). Pour statuer plus définitivement sur ce point, il conviendra cependant d'améliorer la procédure de pilotage de l'essai, de manière à assurer une plus grande stabilité de la valeur de la déformation imposée tout au long de l'essai. En effet, la qualité de l'estimation de ϵ_5 dépend assez largement de la précision de la valeur attribuée à cette déformation.

7. Conclusions et perspectives

Les essais multiples à grande déformation permettent d'apprécier le comportement en fatigue d'un enrobé en simulant des sollicitations plus proches de la réalité. Les informations recueillies nous ont permis de mettre en évidence plusieurs points :

- la variation de raideur se décrit en trois phases comme lors de l'essai de fatigue ordinaire,
- la procédure de traitement des résultats bruts, en dépit de difficultés de pilotage de l'essai, donne des résultats satisfaisants,
- peu de différences sont notables pour la pente de la droite de fatigue aussi bien que pour la durée de vie à 105 cycles. Une conclusion provisoire est qu'un passage de bogie tandem a la même agressivité que 3 passages d'essieux simples.

Ces conclusions devront être confortées et affinées par des essais permettant de mieux distinguer les différents paramètres impliqués. Ainsi, pour éliminer les effets de fréquence, nous allons procéder à des essais complémentaires sinusoïdaux à la fréquence de $25/3$ Hz, égale à celle des essais tandem. Par ailleurs, il conviendra de mieux prendre en compte la vitesse élevée de passage des bogies, probablement en augmentant la fréquence de l'ensemble des essais dans une deuxième campagne. Enfin, l'effet de l'écartement des roues devra aussi être analysé.

Bibliographie:

- Bodin D., Modèle d'endommagement cyclique : Application à la fatigue des enrobés bitumineux, Thèse de doctorat, ECNantes, 2002.
Bodin D., Compte rendu de la réunion « Fatigue multiple » du 13/02/2006.

- Bruhat S., Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux et part de l'autoréparation, pour un dimensionnement durable des chaussées, Thèse de doctorat, université de Bordeaux1, 1999.
- Corté J.F., Di Benedetto H., *Matériaux routiers bitumineux 2, constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*, Paris, Lavoisier, 2005.
- De La Roche C., Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux, Expérimentation et nouvelles perspectives d'analyse, Thèse de doctorat, ECParis, 1996.
- Domec V., Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux en condition de trafic simulé et de température, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux1, 2005.
- Guide Technique, Conception et dimensionnement des structures de chaussée, LCPC-SETRA, 1994.
- Rivière N., Comportement en fatigue des enrobés bitumineux, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux1, 1996.