

Fatigue et restauration des mélanges bitumineux pendant les charges cycliques et le repos

Le transport joue un rôle significatif dans l'économie et est un facteur dans la plupart des autres activités. Il y a environ 16,3 millions de kilomètres de routes dans le monde, l'Union européenne comptant le plus (environ 5 millions de kilomètres). Le siècle dernier a également connu un intense processus d'urbanisation tant dans les zones rurales que dans les métropoles, contribuant au besoin de routes rapides, meilleures et durables. Le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux en fait des matériaux exceptionnels pour paver les routes et les rues pendant des périodes relativement longues malgré les charges dues au trafic et au climat (Wu 2009; Lesueur 2009). Bien que les matériaux bitumineux soient largement et massivement utilisés, ils sont constamment soumis à une grande variété de contraintes thermomécaniques. Un entretien inapproprié tout au long de leur durée de vie peut entraîner une défaillance prématurée. Cela inclut généralement la formation de microfissures dues à des cycles de chargement répétitifs et conduit progressivement à l'apparition de macrofissures par coalescence (García 2012). En outre, Lesueur (2009) confirme qu'après une période de service de quelques années, la flexibilité et la capacité de relaxation du bitume diminuent, le liant devient cassant, provoquant la ségrégation des granulats et des endommagements importants apparaissent à sa surface. Il a également été rapporté que ces effets indésirables peuvent survenir principalement en raison d'un grand nombre de véhicules imposant des charges d'essieu répétitives sur les routes, des conditions environnementales et des erreurs de construction. Cela entraîne généralement des déformations permanentes, de la fatigue et des fissurations à basse température, réduisant ainsi la durée de vie du revêtement routier (Oke 2010; Moghaddam et al. 2011; Tapsoba et al. 2013; Soto 2015). Les chercheurs ont tenté à plusieurs reprises de découvrir les mécanismes de résistance à la fatigue des mélanges bitumineux, en vue de trouver des solutions potentielles à ces détresses (Tapsoba et al. 2013). Fait intéressant, l'une des conclusions tirées de la recherche est la capacité d'autoréparation des matériaux bitumineux. Si un temps de repos suffisant est maintenu après endommagement, ces matériaux montrent une récupération (restauration), au moins partielles, de leurs propriétés mécaniques. Cela est connu depuis de nombreuses années et a été identifié comme une solution future potentielle aux détresses de fatigue (Qiu et al. 2012). Selon Leegwater et al. (2022), l'autoréparation est considérée comme la composante de la restauration qui peut être attribuée à la fermeture et à la réparation des (micro)fissures. La capacité d'autoréparation à augmenter

la durée de vie du revêtement bitumineux est considérée comme une technique clé dans la création d'une infrastructure durable. Malgré toutes les tentatives effectuées pour trouver des solutions aux détresses de fatigue et comprendre les solutions techniques basées sur l'autoréparation, leur mise en œuvre est encore loin d'être réalisée, principalement en raison de la caractérisation et de la modélisation incorrectes du phénomène. Cela a conduit à plusieurs recherches de pointe concernant le mécanisme, la caractérisation et l'amélioration de l'autoréparation allant du bitume au revêtement bitumineux (Sun et al. 2018).

Ce travail de thèse a été mené dans le cadre des travaux du comité technique TC 278-CHA sur la fissuration et l'autoréparation des matériaux bitumineux de la société savante RILEM (Réunion internationale des laboratoires et experts des matériaux, systèmes de construction et ouvrages). Dans le cadre de cette thèse, des essais de chargement répétitif et de repos sur les liants et les enrobés bitumineux ont été effectués et analysés en utilisant différents protocoles d'essai pour différencier essentiellement la restauration et les phénomènes réversibles.

Deux bitumes ont été testés, un 70/100 non modifié et un bitume modifié aux polymères (PMB). Tous les essais rhéologiques sur bitumes ont été réalisés à l'aide de rhéomètres de type DSR par les laboratoires du Politecnico di Torino (Italie) et de l'Université de Waterloo (Canada). Tous les essais effectués dans cette campagne expérimentale ont été réalisés en contrôle de déformation. Tous les essais commencent par des balayages de fréquence afin de décrire le comportement viscoélastique linéaire (LVE) des liants en petites déformations et en état non endommagé. Pour évaluer les réponses des matériaux sous chargement répété et repos, différents types d'essais ont été effectués, tous à 20°C. L'essai de base choisi pour déterminer l'effet du chargement répété est un essai de balayage linéaire d'amplitude (LAS, « Linear Amplitude Sweep ») continu. La restauration des propriétés du matériau pendant le repos a été évaluée en interrompant les essais LAS avec des périodes de repos de différentes durées (0, 5 et 30 minutes) et en les redémarrant. Ces essais sont par la suite appelés LASH (« Linear Amplitude Sweep Healing »). Les essais LASH ont donc été effectués avec interruption à l'amplitude de déformation correspondante au pic de l'amplitude de contrainte pendant un essai LAS (« peak ») ou à la moitié de cette valeur (« half-peak »). Enfin, certains essais LAS ont également été effectués en ajoutant une période de conditionnement supplémentaire de 30 minutes avant l'essai afin d'évaluer les effets du durcissement stérique sur cette durée égale à la période de repos la plus longue appliquée pour les essais LASH.

Pour les mélanges, un protocole d'essai développé à l'ENTPE a été amélioré et effectué sur trois enrobés bitumineux ayant différents bitumes de base (les deux déjà mentionnés et un 40/60).

La procédure d'essai est composée de deux parties en tension/compression en contrôle de déformation sur des échantillons cylindriques. Dans la première partie, des courts essais de module complexe (200 cycles à 10 Hz) à des températures allant de 8°C à 14°C et des amplitudes de déformation allant de 50 à 110µm/m sont menés pour examiner la dépendance des propriétés mécaniques de l'amplitude de déformation et de la température. Dans la seconde partie, cinq essais de fatigue partielle (à 10°C) sont effectués (chacun consistant en 100000 cycles à une amplitude de déformation de 100µm/m et une fréquence de 10 Hz). Chaque période de fatigue est suivie d'une période de repos de 48 heures, pendant laquelle des courts essais de module complexe (100 cycles à 10 Hz) sont effectués à des intervalles prédéterminés pour suivre la récupération des paramètres mécaniques.

Les conclusions suivantes ont été tirées des résultats expérimentaux obtenus et des analyses effectuées :

Concernant les essais DSR pour les liants

- Une bonne répétabilité de tous les essais a été observée.
- Aucun effet de l'augmentation de la durée (30 minutes de plus) de la période de conditionnement pré-essai a été observé sur les courbes obtenues pendant les essais de type LAS.
- Pour les essais LASH « half-peak », toute la variation des propriétés du matériau observée pendant le premier chargement (avant le repos) est instantanément récupérée lors du repos. Il ne s'agit donc que de non-linéarité.
- Pour les essais LASH « peak », le G^* (norme et angle de phase) observé au début du deuxième chargement (après le repos) est différent du G^* (norme et angle de phase) au début du premier chargement dans le cas d'un repos de 0 minute, mais cette différence est complètement récupérée après 30 minutes de repos (pour le liant 70/100). Les courbes amplitude de contrainte-amplitude de déformation du deuxième chargement sont différentes de celles du premier même après 30 minutes (légère récupération mais pas complète) impliquant un effet de l'historique de chargement. Les courbes du deuxième chargement sont presque superposées à celles du premier chargement pour le liant PMB pour pratiquement toutes les durées de repos (indiquant pratiquement aucun dommage dû au premier chargement).

- L'amplitude de déformation correspondant au pic de dissipation d'énergie est plus élevée que l'amplitude de déformation correspondant au pic d'amplitude de contrainte pour les deux liants.
- Pour le liant PMB, les courbes énergie dissipée-amplitude de déformation du deuxième chargement coïncident avec les courbes du premier. Pour le liant 70/100, une diminution claire du pic de la dissipation d'énergie pendant le deuxième chargement est observée, seulement partiellement récupérée pour des périodes de repos de 30 minutes.
- Le protocole d'essai effectué, avec ou sans périodes de repos, permet de distinguer clairement différents liants (dans notre cas un non modifié et un PMB), mais il n'est pas possible de distinguer les différents phénomènes complexes responsables des variations propriétés des matériaux observées pendant les chargements et les repos (endommagement et restauration).
- Parmi toutes les approches considérées, la récupération des propriétés pendant les périodes de repos a été évaluée par rapport à trois paramètres : le module complexe au début du deuxième chargement, le pic de l'amplitude de contrainte de cisaillement et le pic de l'énergie dissipée. Parmi les trois approches, les valeurs (pourcentage) les plus élevées de récupération ont été obtenues pour le module complexe, tandis que les plus basses pour la dissipation d'énergie.

Concernant le module complexe et les essais de fatigue partielle pour les enrobés :

- Un module complexe équivalent et un rapport de Poisson équivalent ont pu être déterminés pour chaque cycle de chargement à différents niveaux de déformation. Pour simplifier, la mention "équivalente" est omise pour E^* et ν^* dans le reste de l'analyse.
- La dépendance du module complexe et du coefficient de Poisson complexe de la température et de l'amplitude de déformation dans des conditions non endommagées ont été estimée sur des plages proches (8°C - 14°C et 50 - $110 \mu\text{m}/\text{m}$) des valeurs utilisées pour les essais de fatigue (10°C , $100 \mu\text{m}/\text{m}$).
- La restauration et les variations non récupérées des propriétés LVE pendant le repos après les chargements de fatigue ont été isolées. Les effets et l'importance relative des différents phénomènes réversibles (non-linéarité, auto-échauffement, thixotropie) sur la restauration des propriétés matérielles ont été identifiés et quantifiés.
- Pendant les différentes périodes de fatigue, la température interne des échantillons a augmenté de manière significative (environ $0,8$ - $1,2^\circ\text{C}$) en conséquence de la dissipation

d'énergie viscoélastique. Pendant les périodes de repos de 48 heures, la température a rapidement diminué jusqu'à la valeur initiale de la température d'essai.

- La comparaison des données obtenues sur les différents échantillons testés des mêmes enrobés (au moins 3 échantillons testés avec succès pour chaque enrobé) indique que le protocole d'essai semble fournir des résultats répétables.
- Les résultats de l'analyse sur les variations de $|v^*|$ et φ_v sont globalement cohérents avec les observations pour $|E^*|$ et φ_E .
- Après 48h de repos, la plupart des variations observées des propriétés mécaniques 3D (E^* et v^*) pendant le chargement cyclique sont récupérées.
- L'effet de l'auto-échauffement semble influencer significativement moins les variations de $|E^*|$, φ_E , $|v^*|$ et φ_v que la thixotropie et la non-linéarité (moins de 14% pour $|E^*|$, 16% pour φ_E , 15% pour $|v^*|$ et 13% pour φ_v respectivement de la restauration totale pendant le repos).
- Parmi les phénomènes réversibles expliquant la récupération de $|E^*|$, φ_E , $|v^*|$ et φ_v pendant les périodes de repos, la thixotropie semble être la plus importante (toujours supérieure à 55% de la restauration totale pendant le repos).
- Les taux de variation pendant le chargement et la récupération pour les différents périodes de fatigue et de repos (pour $|E^*|$, φ_E , $|v^*|$ et φ_v) montrent des tendances similaires. En général, les taux de chargement et de récupération obtenus pour chaque période de fatigue et de repos sont extrêmement comparables en termes de rythme et d'amplitude.
- L'énergie dissipée et le taux de chargement ne montrent aucune relation, mais la dissipation d'énergie tend à augmenter avec la progression des cycles de fatigue. Parmi tous les mélanges testés, les résultats du mélange 70/100 semblent suivre un chemin distinct pendant le chargement en fatigue, par rapport aux deux autres mélanges, quelle que soit la propriété matérielle utilisée pour l'estimation. Aucune différence claire entre les tendances globales des trois matériaux n'a pu être observée pour les taux de récupération pendant le repos.

Enfin, les conclusions générales suivantes peuvent être tirées des campagnes sur les liants et les mélanges avec les matériaux correspondants :

- Il est important de noter que les deux protocoles de test sont assez différents dans leur conception, avec des différences importantes dans les amplitudes de contrainte entre les deux protocoles. Pour le test DSR, l'amplitude de contrainte est augmentée de 0,1 % à 30 % (largement au-delà de la limite viscoélastique linéaire des liants bitumineux), tandis qu'une amplitude de contrainte cible constante de 100 $\mu\text{m/m}$ (généralement considérée comme équivalente à la limite viscoélastique linéaire des mélanges, approximativement) est appliquée avec le test T/C sur les mélanges. Cette différence importante peut expliquer les divergences observées. Les amplitudes de contrainte élevées appliquées lors des tests LASH sur les liants doivent être prises en compte dans l'évaluation et la pertinence des résultats de ces tests.
- Bien que les observations faites sur les liants 70/100 et PMB à partir des tests DSR et sur les deux mélanges correspondants à partir des tests T/C semblent pointer dans la même direction, les conclusions ne sont pas claires en raison de la nature susmentionnée du protocole LASH et de la différence entre les tests sur les liants et les mélanges. En particulier, le liant 70/100 a montré une restauration incomplète des propriétés du matériau dans les tests LASH, tandis que le liant PMB a récupéré complètement. Le mélange 70/100 a montré les variations non récupérées les plus élevées parmi les mélanges testés et a généralement échoué sans supporter les cinq tests de fatigue partiels, tandis que le mélange PMB a montré les variations non récupérées les plus faibles et a généralement résisté à tous les retards de fatigue.

Cette enquête a donné lieu à plusieurs perspectives :

- La thèse n'a pas traité tous les résultats sur la fatigue finale, jusqu'à la fissuration des tests de mélange. Ces données pourraient fournir des résultats intéressants concernant la résistance à la fatigue des matériaux et l'effet des périodes de repos. De plus, cette analyse pourrait permettre de distinguer davantage le comportement des mélanges contenant différents liants de base.
- L'influence d'autres éléments externes, tels que le mode de chargement, le vieillissement, la température et l'humidité, devrait être prise en compte pour les études futures.
- Donner un sens aux mécanismes d'auto-guérison pourrait être possible grâce à une analyse multi-échelle de l'interaction physico-chimique complexe entre le

bitume pur et les inclusions supplémentaires (telles que les charges, les agrégats, les polymères ou autres modificateurs).

- Une perspective supplémentaire sur l'analyse du comportement en 3D des mélanges, en utilisant les résultats du coefficient de Poisson et également les changements de volume des matériaux pendant le chargement et le repos, devrait également être envisagée pour des études ultérieures.