



Adaptation d'un système de mesure in-situ du collage des interfaces de chaussées aéronautiques

Maïssa Gharbi, Michaël Broutin, Jean-Marie Roussel, Armelle Chabot

► To cite this version:

Maïssa Gharbi, Michaël Broutin, Jean-Marie Roussel, Armelle Chabot. Adaptation d'un système de mesure in-situ du collage des interfaces de chaussées aéronautiques. 25ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-03713548

HAL Id: hal-03713548

<https://hal.science/hal-03713548>

Submitted on 4 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Adaptation d'un système de mesure in-situ du collage des interfaces de chaussées aéronautiques

M. GHARBI^a, M. BROUTIN^a, J. M. ROUSSEL^a, A. CHABOT^b

a. Service Technique de l'Aviation Civile (STAC), michael.broutin@aviation-civile.gouv.fr

b. Univ Eiffel, MAST-LAMES, armelle.chabot@univ-eiffel.fr

Résumé :

L'auscultation régulière de l'état des chaussées est la clé de leur bonne gestion puisqu'elle permet d'anticiper et d'optimiser les travaux d'entretien ou de réhabilitation. En particulier, l'état du collage des interfaces entre couches de matériaux est à évaluer pour comprendre le comportement mécanique de ces structures en flexion et leur durée de vie résiduelle. Différents essais non-destructifs (NDT) sont utilisés pour évaluer et fournir les informations nécessaires à ces travaux d'entretien, mais ils ne permettent pas une évaluation fiable de l'état de l'interface. A cette fin, l'essai d'ovalisation, développé dans les années 70 par les Laboratoires des Ponts et Chaussées, est une méthode intéressante. Il consiste à mesurer la variation du diamètre d'un trou de carotte à différents niveaux de profondeur et simultanément dans les trois directions horizontales (longitudinale (L), transversale (T) et à 45° par rapport à la direction de chargement) sous le passage d'une roue lestée. L'équipement existant a dû être adapté aux chaussées aéronautiques sous chargement roulants et dynamiques de type Heavy Weight Deflectometer (HWD). Le prototype d'ovalisation final mis au point, les premières comparaisons par éléments finis de ses résultats à ceux d'essais in situ réalisés au STAC sont présentés dans ce papier.

Abstract :

Regular pavement condition assessment is the key to good in-service pavement management, as it allows to anticipate and optimize maintenance or rehabilitation works. In particular, the bonding conditions of the interfaces between pavement layers are of major concern since their huge impact on the bending mechanical behavior of the pavement and on its residual life. Various non-destructive techniques (NDT) are used to evaluate pavement damage and provide information for maintenance work, but they do not allow a reliable assessment of the interface bond state. The ovalization test, developed in the 1970's by les Laboratoires des Ponts et Chaussées, is an interesting method for that aim. It consists in measuring the variation of the diameter of a core hole at different depths and simultaneously in the three horizontal directions (longitudinal (L), transverse (T) and at 45° to the loading direction) under the passage of a rolling wheel. The existing ovalization equipment has been adapted for the flexible airfield pavements under rolling and dynamic HWD loads. The development of the final ovalization prototype, 3D finite element modeling developed for the data analysis and first comparison with results of an in-situ study, performed on the STAC test facility, are presented in this paper.

Mots clefs : Interface, Mesures, Ovalisation, Chaussées aéronautiques, FWD

1 Introduction

Les chaussées sont constituées d'un empilement de couches de différents matériaux protégeant le sol des effets de chargements roulant lourds tels que rencontrés sur les chaussées aéronautiques. Afin d'anticiper et d'optimiser les phases de travaux d'entretien potentiels de ces assemblages de couches de matériau au cours de leurs chargements et du climat, la surveillance de leur état dans le temps est primordiale. Différentes techniques non destructives sont couramment utilisées pour fournir ainsi les informations nécessaires aux tâches de maintenance. Si l'utilisation de ces techniques est incontournable, elle doit être croisée et validée par des essais destructifs afin d'obtenir une évaluation fiable des conditions du collage des interfaces entre couches [1]. Parmi les tests in-situ existant pour évaluer ces états de liaison entre couches, l'essai d'ovalisation développé dans les années 1970 par les Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) est une méthode intéressante [2]. Il consiste, à mesurer la déformation radiale d'un trou de carotte (cavité cylindrique dans la chaussée) dans trois directions horizontales (Longitudinale (L), Transversale (T) et Diagonale à 45° par rapport à la direction du chargement) à l'aide de capteurs placés à différentes profondeurs. Les contraintes et déformations peuvent ainsi y être estimées. En raison de sa mise en œuvre délicate, cet essai a été peu utilisé depuis son développement.

Pour caractériser spécifiquement les interfaces de chaussées aéronautiques soumises à des chargements roulants et évaluations dynamiques de type Heavy Weight Deflectometer (HWD) [3], le système de mesure d'ovalisation a été adapté. Parmi les deux développements effectués en 2019 [4], le prototype finalement retenu [5] est présenté dans ce papier. Dans un premier temps nous résumons son développement. La deuxième partie est consacrée à la modélisation par éléments finis en 3D développée pour l'analyse des données. Les résultats d'une étude in-situ, réalisée sur la planche d'essai du STAC, sont enfin présentés et comparés aux simulations numériques.

2 Matériaux et méthodes

2.1 Développement du prototype d'ovalisation du STAC

La version routière et d'origine de l'essai d'ovalisation [2], pour vérifier l'état du collage des interfaces entre couches de chaussées, a été testée sur la planche d'essai de chaussée aéroportuaire en vraie grandeur du Service Technique de l'Aviation Civile (STAC), construite sur le site du Centre d'Expérimentation Routières (CER) à Rouen [6]. Les essais effectués sous chargement impulsionnel grâce à un appareil Heavy Weight Deflectometer (HWD) [3] ont montré certaines limites telles que :

- des oscillations des signaux observées due aux vibrations mécaniques du système ;
- une fréquence d'acquisition des données d'environ 130Hz insuffisante pour obtenir des mesures exploitables dans le cas de chargement dynamique de type charge tombante (HWD) ;
- l'impossibilité d'effectuer des mesures de la variation de diamètre à la surface de la chaussée, ni d'effectuer des mesures avec la position de la plaque de charge HWD centrée au-dessus du trou de carotte (configuration axisymétrique).

Afin de pallier ces limites, l'essai d'ovalisation a dû être adapté afin de pouvoir répondre au cahier des charges de l'auscultation des chaussées aéronautiques comme suit :

- système mécanique suffisamment stable afin d'éviter les vibrations parasites ;
- visualisation correcte de la courbe du signal de chargement et de déflexion pour une fréquence d'acquisition de minimum 300Hz (le temps d'impulsion du signal de charge HWD est d'environ 30ms).

- système d'acquisition sans fil.

Ce système doit également pouvoir offrir la possibilité d'effectuer des mesures simultanées à différentes profondeurs dans le trou d'une carotte. Enfin une attention particulière est accordée sur la proposition d'une mise en place facile du système de mesure.

Dans un premier temps, il est décidé de commencer par le développement d'un prototype à un seul niveau de mesure qui pourrait être dupliqué et intégré facilement dans un système de mesures à multi niveaux. A cette fin, deux versions d'ovalisation ont été développées [4]. Un même concept d'un plateau horizontal autoportant équipé de six capteurs positionnés par paires dans les trois directions (L, T, 45°C) (figure 1 a) a été adopté pour les deux prototypes. Les capteurs sélectionnés sont des capteurs de déformation DD1 de l'entreprise HBM et sont caractérisés par une plage de mesure de ± 2.5 mm et une incertitude inférieure à 0.5 %. Une unité d'acquisition de données QuantumX de HBM a été utilisée. La conception de ces deux prototypes a été effectuée à l'aide du logiciel CAO SolidWorks et ils ont été fabriqués en plastique par impression 3D. Le diamètre initial des deux systèmes convient à une cavité de 162 mm mais leur conception peut facilement être adaptée pour d'autres diamètres.

Premier prototype

Le premier prototype est composé de deux plateaux superposés. Le premier plateau assure la fixation du prototype au niveau souhaité dans le trou de carotte à l'aide de huit pointes métalliques contenant chacun un ressort de compression. La partie supérieure du prototype est positionnée sur le premier plateau et contient les six capteurs DD1 (figure 1 b).

Deuxième Prototype

Le deuxième prototype est une version plus simple composée d'un seul plateau autoportant (figure 1 c). Les huit pointes métalliques et les différents ressorts sont remplacés par un système de fixation dans la direction diagonale libre. Ce dernier est un système télescopique équipé de caoutchoucs auxquels une précontrainte est appliquée et maintenue grâce à une vis verticale.



FIG. 1 - Prototypes d'ovalisation conçus au STAC: a) les trois directions de mesure, b) premier prototype, c) deuxième prototype

La validation in situ des prototypes développés est effectuée sur une planche d'essai en vraie grandeur du STAC (Bonneuil sur Marne, France) [5-6]. La structure multicouche est une chaussée souple conventionnelle d'aérodrome de la norme Française (NF EN 123108-1). Dans le cadre de ce projet, cette section d'essai est équipée de trois trous de carotte de diamètre 162mm et de trois trous de 300 mm.

2.2 Modélisation éléments finis 3D de la chaussée auscultée

Une étude par éléments finis en trois dimensions a été faite en élasticité à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics pour l'analyse des données. Les éléments choisis sont des éléments cubiques de degré 2. Le maillage comprend la plaque de charge HWD et la structure multicouche de chaussée percée de son

trou de carotte (figure 2). Le plan de symétrie, selon l'axe des y, passe par les centres de la cavité et de la plaque HWD. Aux limites, une condition de Dirichlet impose un déplacement normal nul sur toutes les faces externes du maillage. Un script est développé afin d'automatiser la création du maillage. Ce dernier permet la modification de la position de la plaque de chargement.

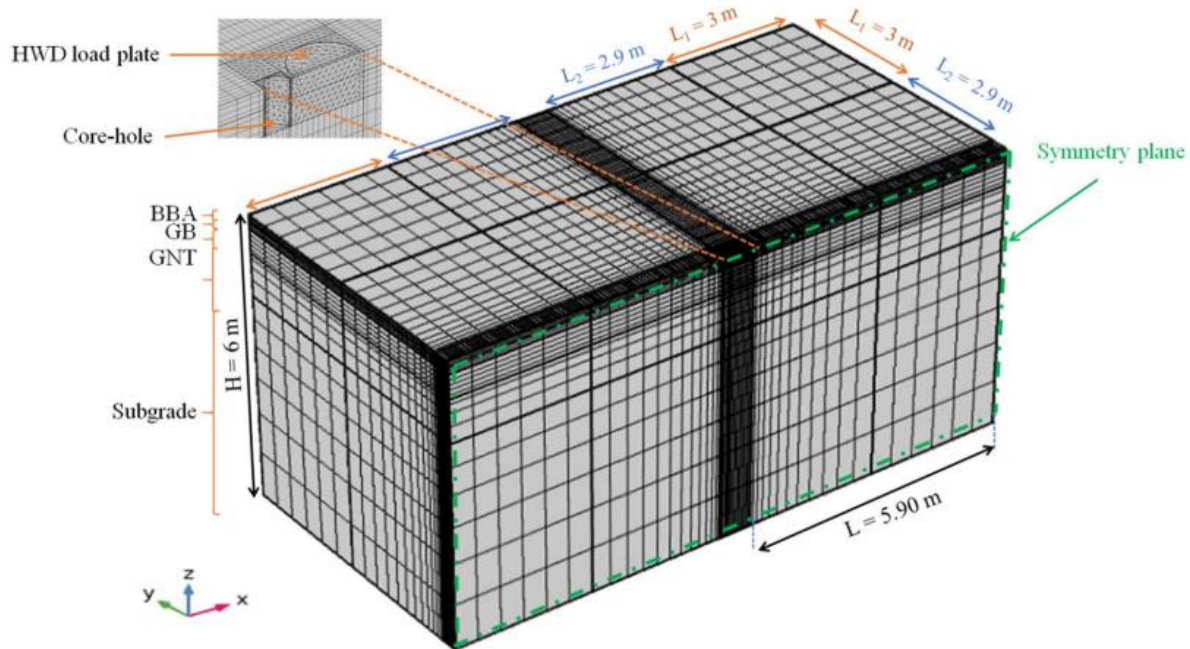


FIG. 2 - Maillage éléments finis 3D de la chaussée étudiée avec cavité (d'après [5])

Deux comportements d'interface entre couches sont considérés : des interfaces parfaitement collées ou parfaitement glissantes. Le glissement de l'interface est introduit en utilisant une couche mince anisotrope (sans épaisseur) présentant un module élevé dans la direction verticale et un module très faible dans les directions horizontales. Bien que viscoélastique, le comportement des couches de matériaux bitumineux est supposé ici élastique linéaire équivalent aux chargements effectués durant les essais. Pour tenir compte des effets thermo-susceptibles de ces matériaux, les températures moyennes dans les couches, nommées BBA (13 cm d'épaisseur) et GB (17 cm d'épaisseur), sont prises, pendant la séquence d'essai réalisé in situ, respectivement à 40,5°C et 33,1°C. Les modules correspondants à ces températures respectives et pour une fréquence de 30Hz (correspondant à la pseudo-fréquence du temps d'impulsion du signal de charge HWD), sont évalués (à partir des essais de modules complexes de 2019) respectivement à 800 et 5 700 MPa. Leur coefficient de Poisson est estimé à 0.35. La couche de matériau granulaire, nommée GNT (de 50cm d'épaisseur), est considéré élastique avec un module de 250 MPa. Le sol, nommé subgrade est considéré avec un module de 184MPa.

Une optimisation du maillage est effectuée jusqu'à atteindre une stabilisation des résultats sous chargement dynamique. La précision numérique visée est de 1 μm pour la valeur maximale de la variation du diamètre, de 1 $\mu\text{m/m}$ pour les déformations maximales et de 0,1 MPa pour les contraintes maximales.

3 Résultats et Discussion

3.1 Validation in-situ des prototypes

Pour la phase de validation des prototypes, il est décidé d'utiliser des essais HWD impliquant des niveaux de charge élevés avec en premier temps une position adjacente de la plaque de chargement par

rapport au trou de carottage (figure 3). Les essais sont réalisés en 2019 sous charge impulsionnelle HWD avec trois niveaux de charge F1 ~ 260 kN, F2 ~ 170 kN et F3 ~ 130 kN [4].

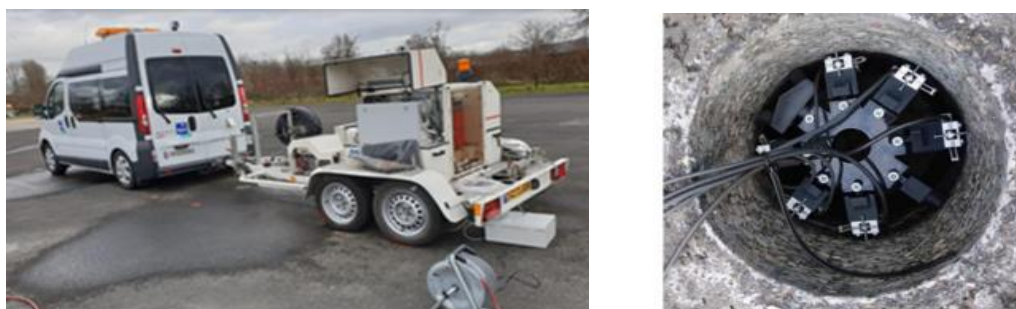


FIG. 3 - a) le Heavy Weight Deflectometer (HWD), b) exemple du deuxième prototype installé dans un trou de carotte de chaussée

Pour l'étude de répétabilité, 5 chutes sont effectuées par niveau avec une fréquence d'acquisition de 4800 Hz. Le prototype est positionné successivement à chacun des quatre niveaux de mesure (à la surface de la structure au-dessus de l'interface BBA/GB, au-dessous de l'interface BBA/GB et au fond de la couche GB) dans l'un des trous de carottage de 162 mm. La mise en place des deux prototypes dans le trou de carottage s'est avérée simple et rapide à réaliser. En effet le changement du niveau de prototype nécessite seulement 7 minutes et cela implique aussi le déplacement et repositionnement du HWD. Cependant, une forme d'oscillation est observée pour toutes les mesures fournies par le premier prototype (figure 4 a). Ceci est dû probablement à des vibrations mécaniques parasites lié au système de ressorts utilisée dans ce prototype. Le deuxième prototype présente des formes régulières de signal pour tous les niveaux et toutes les directions (figure 4 b). Ce prototype est sélectionnée pour le reste des essais in-situ.

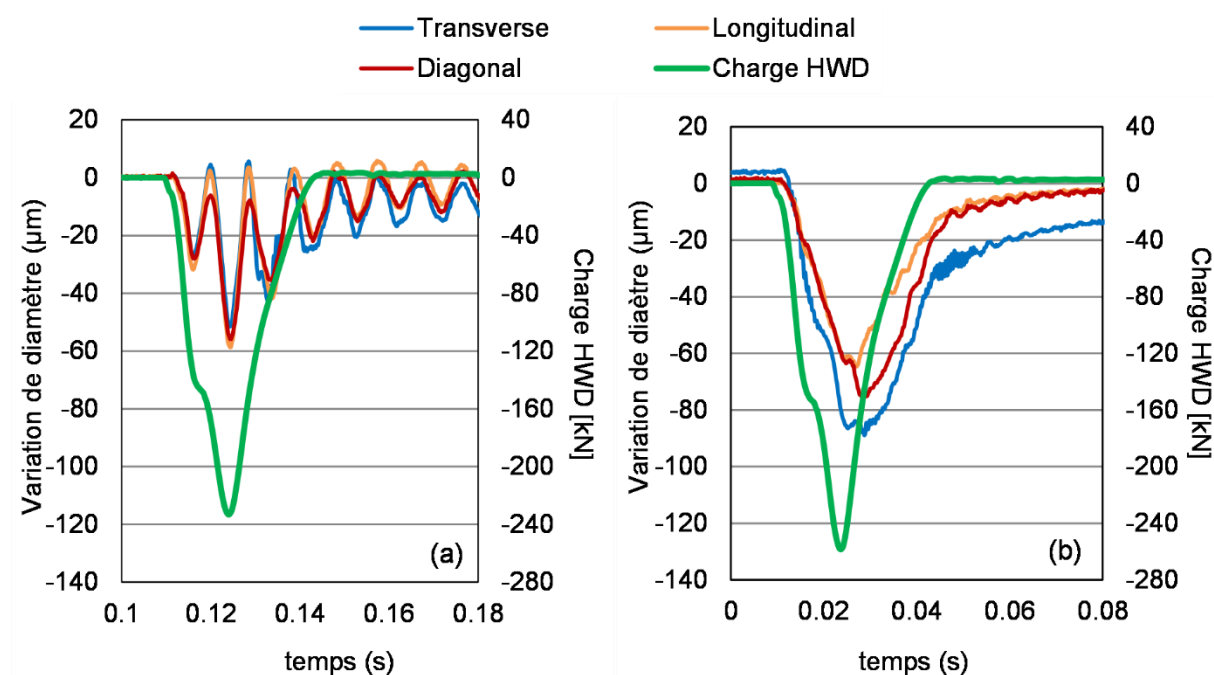


FIG. 4 - Variation du diamètre du trou de carottage mesuré au-dessus de l'interface BBA/GB (Plaque de charge HWD adjacente au carottage, $F_{max} \sim 260$ kN, température moyenne dans la couche bitumineuse 35°C) : a) Premier prototype, b) deuxième prototype

3.2 Comparaisons des résultats numériques et laboratoire

Il est décidé de se concentrer dans cette section sur la position centrée, pour le niveau de charge le plus élevé (~190 kN). Les valeurs maximales extraites des résultats expérimentaux et des simulations dynamiques, respectivement pour les interfaces BBA/GB totalement collée et totalement glissante, sont résumées dans le Tableau 1 suivant.

Tableau 1 Comparaison de la variation de diamètres mesurée et simulée (d'après [5])

	Résultats expérimentaux, μm		Simulation EF, μm	
	Valeurs moyennes	Écarts-types	Interface entièrement collée	Interface entièrement glissante
<i>Surface de la chaussée</i>	-175.3	15.9	-203.7	-108.4
<i>Au-dessus de l'interface BBA/GB</i>	-73.8	0.9	-55.5	93.0
<i>Au-dessous de l'interface BBA/GB</i>	-74.4	37.2	-49.6	-86.6
<i>Fond de la couche GB</i>	75.4	12.1	41.8	50.6

La convention de signe suivante est adoptée : une variation positive du diamètre du trou de carotte ("ouverture") est présentée comme positive, tandis qu'une variation négative du diamètre du trou de carotte ("contraction") est présentée comme négative. Des déformations similaires du trou de carotte sont observées dans les trois directions. Ce résultat est attendu en raison de l'axisymétrie liée à la position centrée de la plaque.

La comparaison des courbes expérimentales et numériques de la variation du diamètre au-dessus et au-dessous de l'interface sont présentées dans la figure 5.

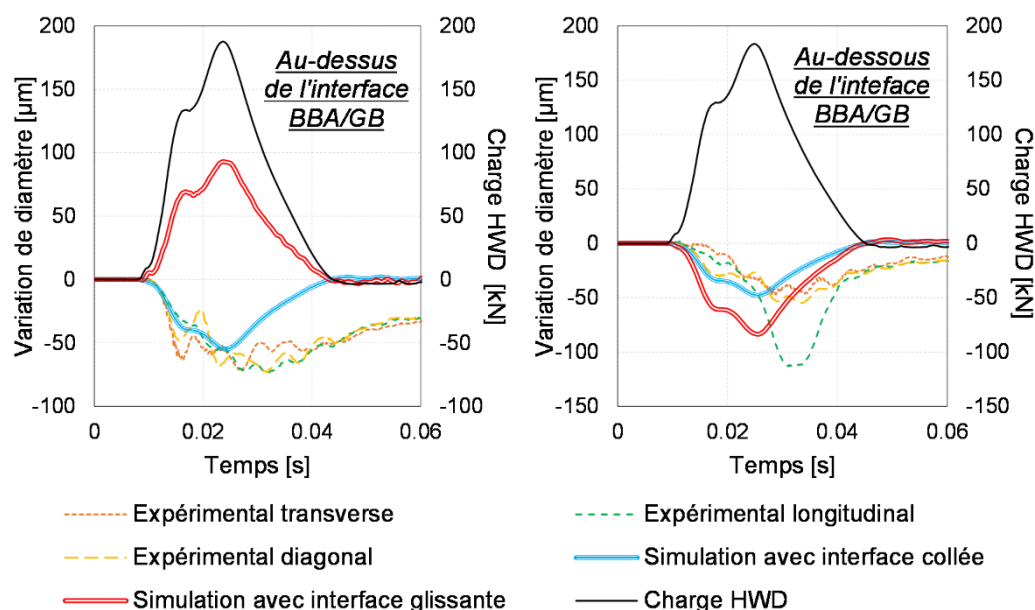


FIG. 5 - La variation du diamètre de trou de carotte mesurée et simulée par le modèle EF (plaque de charge HWD centrée au-dessus du trou central) (d'après [5])

Tout d'abord, les résultats tendent à confirmer que le système de mesures est bien adapté au problème initial. Les résultats permettent de fournir des informations discriminantes sur l'état de l'interface.

L'analyse des résultats obtenus aux différents niveaux montre que :

- les mesures de la variation du diamètre au niveau de la surface de trou sont très proches des résultats de la simulation numérique pour une interface entièrement collée ;
- les mesures au-dessus et au-dessous de l'interface sont très proches. En effet les écarts entre les valeurs moyennes sont très faibles par rapport aux incertitudes. Les résultats mesurés sont très proches des résultats issus de la simulation numérique pour une interface entièrement collée ;
- ces résultats sont plus proches d'une interface BBA/GBA collée que décollée

Un décalage temporel est par ailleurs observé pour les pics expérimentaux par rapport aux résultats numériques et que les parties descendantes des signaux expérimentaux, après le pic, présentent un retour à zéro plus lent que les courbes numériques. Ces observations peuvent être expliquées par les effets de viscoélasticité des matériaux bitumineux non pris en compte dans le modèle élastique considéré.

4 Conclusion

Pour fournir une évaluation fiable de l'état du collage des interfaces entre couches de matériaux de chaussées [1] en corrélation avec les essais NDT, l'essai d'ovalisation est une méthode complémentaire intéressante [2]. Cet essai a été adapté dans ce projet pour la caractérisation des interfaces des chaussées aéroportuaires. Deux prototypes ont été développés par le STAC [4]. Celui retenu in fine permet de mesurer la variation du diamètre d'un trou de carotte à n'importe quelle profondeur dans la structure multicouche ainsi assemblée, y compris à sa surface et à la base des couches bitumineuses sous l'influence d'un chargement dynamique. Ce prototype a été évalué en termes de rapidité et de facilité de mise en place opérationnelle et de stabilité mécanique. Sa conception a été assurée de manière qu'il puisse être facilement transformé en un système de mesure du collage à plusieurs niveaux dans l'empilement [5]. Une modélisation 3D dynamique par éléments finis a été développée, permettant de calculer, à n'importe quelle profondeur, les historiques des variations du diamètre du trou de carotte induites par les charges dynamiques impulsives du HWD. Des comportements d'interface entre couches entièrement collée ou entièrement glissante ont été implémentés jusqu'à présent. La comparaison, pour la position centrée de la plaque de charge, entre les historiques de variation du diamètre du trou de carotte expérimentales et numériques pour les quatre niveaux étudiés (surface, au-dessus et au-dessous de l'interface, fond de la couche bitumineuse) a démontré que les résultats in-situ étaient très proches des résultats numériques pour la condition d'interface entièrement collée. Enfin, les effets de la viscosité des couches bitumineuses ont été mis en évidence.

Dans la suite, ces premiers résultats encourageants seront poursuivis afin : d'améliorer la conception de ce prototype à une échelle plus large ; prendre en compte la viscoélasticité des matériaux dans la modélisation et étudier les éventuelles conditions de décollement des interfaces entre couches de différentes structures de chaussées aéronautiques.

Références

- [1] C. Petit, A. Chabot, A. Destrée, C. Raab, Interface Debonding Behavior, in: W. G. Buttlar, A. Chabot, E. V. Dave, C. Petit and G. Tebaldi (eds.), RILEM State-of-the-Art Reports 28, Springer, Cham, Switzerland, 2018, pp. 103–153. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76849-6_3
- [2] R. Kobisch, C. Peyronne, L'ovalisation : une nouvelle méthode de mesure des déformations élastiques des chaussées, Bull. de Liaison des Lab des Ponts et Chaussées 102 (Juillet 1979) 59-71.

- [3] A. Sadoun, M. Broutin, J.-M. Simonin, Assessment of HWD Ability to Detect Debonding of Pavement Layer Interfaces, in: A. Chabot, W. G. Buttlar, E. V. Dave, C. Petit, and G. Tebaldi (eds.), Proceedings of the 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements, RILEM Bookseries 13, Springer, Dordrecht, the Netherlands, 2016, pp. 763–769. https://doi.org/10.1007/978-94-024-0867-6_106
- [4] M. Gharbi, M. Broutin, T. Schneider, S. Maindroult, A. Chabot, Towards an Adapted Ovalization System for Flexible Airfield Pavement Interface Characterization Using Rolling-Wheel or HWD Loads, in: A. Chabot, P. Horny, J. Harvey, and L. G. Loria-Salazar (eds.), Proceedings of the 6th APT conference, Lecture Notes in Civil Engineering 96, Springer, Cham, Switzerland, 2020, pp. 516–525. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55236-7_53
- [5] M. Gharbi, M. Broutin, J.-M. Roussel, A. Chabot, Development of an in Situ Measurement Device for Airfield Pavement Interface Characterization, Journal of Testing and Evaluation 50(2) (2022) 818–835. <http://doi.org/10.1520/JTE20210211>
- [6] M. Broutin, S. Fauchet, D. Mounier, A Full-Scale Instrumented Test Facility for Airport Pavement Modeling Improvements, in: L. Al-Qadi and S. Murrell (eds.), Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, July. 2013, pp. 1396–1408. <https://doi.org/10.1061/9780784413005.118>