



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

Amélioration de l'interprétation des méthodes d'auscultation dans le cadre de l'établissement d'un diagnostic précis de la chaussée à partir de méthodes d'impact

Auteurs / Organisme :

Benoit PICOUX, Rémi TAUTOU

Laboratoire GC2D, Université de Limoges

Thème de rattachement :

Thème 2 - Caractérisation de l'état d'un réseau

DVDC/R/011

LC/17/DVDC/24

Juin 2018

Site internet : www.dvdc.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Eric LAYERLE et Christine LEROY

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

Sommaire

Table des matières

Sommaire	3
1 Résumé	6
2 Introduction	7
3 Présentation des principales méthodes d'impact	8
3.1 Méthodes de diagnostic de défauts	8
3.2 Méthode de la mesure de déflexion à faible rendement	9
3.2.1. Poutre de Benkelman	9
3.2.2. Dynaplaque	10
3.2.2. Falling Weight Deflectometer	10
3.3 Méthodes de la mesure de déflexion à grand rendement	11
3.3.1. Déflectographe Lacroix	11
3.3.2. Curviamètre	12
3.3.3. Rolling Wheel Deflectometer	13
3.3.4. Traffic Speed Deflectometer	13
4 Historique et présentation du FWD	14
4.1 Versions existantes	15
4.2 Description générale de l'appareil et de l'essai FWD	17
5 Les indicateurs structurels utilisés aujourd'hui	19
5.1 Indicateurs structurels basiques	19
5.2 Indicateurs basés sur des lois empiriques	23
6 Les différentes modélisations numériques de l'essai FWD	26
6.1 Approche statique	26
6.2 Analyse dynamique basée sur la propagation d'ondes	28
7 Les programmes d'analyse inverse appliqués au FWD	31
8 Etude de sensibilité des paramètres physiques et mécaniques	41
8.1 Effet de la température	41
8.2 Effet de la teneur en eau	45
8.3 Autres paramètres influents	45
9 Etude thermo-visco-dynamique	49
9.1 Modélisation numérique	49
9.1.1 Problème dynamique	49

9.1.2	Sensibilité paramétrique du modèle dynamique	50
9.1.3	Dépendance de la fréquence et de la température dans les matériaux bitumineux	51
9.1.3	Modélisation thermique	51
9.2	Résultats d'essai sur chaussée instrumentée.....	53
9.2.1.	Mesures météorologiques	53
9.2.2.	Validation du modèle thermique.....	53
9.2.3.	Répétabilité & reproductibilité des mesures FWD.....	56
9.2.4.	Comparaisons à différentes températures	57
9.3	Validation du modèle dynamique	60
9.3.1.	Résultats numériques antérieurs.....	60
9.3.2.	Comparaison entre résultats du modèle et mesures.....	61
10	Conclusion.....	63
11	Références	64

1 Résumé

Résumé

Ce rapport bibliographique, préalable à l'élaboration d'un programme d'analyse inverse dynamique des données FWD, dresse un bilan sur l'ensemble des modèles statiques et dynamiques existants. L'accent est mis sur l'importance de l'effet des paramètres physiques sur l'essai relatifs notamment aux composantes dynamique, fréquentielle, hydrique et thermique. Le rapport présente également une étude de faisabilité d'un modèle visco/thermo/dynamique réalisé sur la première tranche du programme. Compte tenu de la forte dépendance du matériau bitumineux à la température et la fréquence, l'objet de cette étude a reposé sur l'intégration d'un gradient de température dans la chaussée et son influence sur le signal dynamique de la structure et ainsi sur le résultat du diagnostic. A l'aide d'un modèle thermique complet, le gradient de température dans la chaussée peut être reconstruit grâce à la mesure, sur quelques jours précédents l'essai FWD, de la température ambiante, de la vitesse de l'air et de l'ensoleillement. L'historique météorologique a été utilisé et a montré que quatre jours d'antécédent sont nécessaires pour reproduire numériquement le gradient thermique réel. Les résultats ont été validés pour l'instant pour quelques types de gradient (matin et après-midi) en période estivale sur la plateforme instrumentée du laboratoire.

Abstract

This bibliographic report, prior to the development of a dynamic backcalculation model of the FWD data, draw up all existing static and dynamic models. The emphasis is on the importance of the effect of the physical parameters on the test relating in particular to the dynamic, frequency, water and thermal component. The report also presents a feasibility study of thermo - visco - dynamic model carried out on the first phase of the program. Given the high dependence of the bituminous material on temperature and frequency, the object of this study was based on the integration of a temperature gradient in the pavement and its influence on the dynamic signal of the structure and thus on the result of the diagnosis. Using a complete thermal model, the temperature gradient in the pavement can be reconstructed by measuring, over a few days before the FWD test, ambient temperature, air velocity and temperature radiance. The meteorological history was used and showed that four days of antecedent are necessary to reproduce numerically the actual thermal gradient. The results have been validated at the moment for some types of gradient (morning and afternoon) during the summer period on the instrumented platform of the laboratory.

2 Introduction

Le réseau routier français est constitué d'environ 38 000 km de route et d'autoroute. La valeur à neuf du patrimoine que représente ce réseau à la charge de l'Etat, est évaluée à plus de 140 milliards d'€HT. Ce patrimoine doit être entretenu, réparé et aménagé, pour combattre son usure et son obsolescence technique et réglementaire [CAZ16].

L'entretien préventif et les réparations sur les chaussées portés à 90,6 millions d'euros en crédits de paiement ont été prévus à ce titre dans le projet de loi de finances pour 2017. Un rapport du sénat [MAU17] démontre que si la proportion des autoroutes en très bon état de surface est restée relativement stable, autour de 65 %, celle des autoroutes en bon état de surface a diminué depuis 2011, passant de 31 % en 2011 à 18 % en 2013. En conséquence, la proportion du réseau autoroutier dont l'état est plus ou moins dégradé a augmenté, de 5 % à 16 %. Aussi, l'objectif d'optimisation de la maintenance et la réduction des coûts afférents à cette détérioration du réseau entraîne le besoin d'un diagnostic fiable des infrastructures routières.

Ce rapport, résultat de la première tranche de travail, s'inscrit dans le thème 2 « Caractérisation de l'état d'un réseau - Méthodes de mesure et d'auscultation in situ » proposé au programme national DVDC sur l'amélioration du diagnostic qu'une chaussée par des méthodes d'impact mécanique. Il est le préalable à la construction d'un modèle permettant d'améliorer l'analyse de données mesurées à l'aide de ces techniques et notamment celle du Falling Weight Deflectometer.

Comme tout rapport bibliographique, il dresse tout d'abord un état des connaissances sur les techniques de diagnostic ainsi que les modèles et méthodes de calcul qui ont été utilisées par le passé et sont encore utilisées aujourd'hui, leurs qualités et leurs faiblesses. L'étude bibliographique a également permis d'identifier les paramètres physiques importants à intégrer dans l'analyse.

Enfin, la dernière partie est consacrée à une étude de faisabilité d'un modèle thermo - visco - dynamique permettant d'intégrer des données terrains de type météorologique dans la reconstruction numérique du gradient thermique dans la structure de chaussée et ainsi d'affiner et de fiabiliser le diagnostic.

3 Présentation des principales méthodes d'impact

3.1 Méthodes de diagnostic de défauts

Parmi les méthodes de diagnostic par impact couramment utilisées, l'essai Impact Echo et l'essai Colibri sont deux essais utilisés pour le diagnostic de défauts. L'impact Echo (Fig. 1) est une méthode existante depuis 1983 et définie plus précisément par Sansalone en 1989 [SAN89]. Basée sur un principe de contrôle non destructif et utilisée à l'origine sur des structures en béton armé et maçonneries, elle est depuis quelques années testée pour les structures bitumineuses et plus particulièrement adaptée à des méthodes de propagation d'ondes de surface [HEV98], [ALZ09], [RYD04], [RYD09]. Elle consiste à générer des ondes en appliquant un impact sur l'ouvrage (au moyen de billes de différents diamètres ou d'un marteau instrumenté) et à analyser le spectre des réponses obtenues par un capteur à proximité du point d'impact. Selon les résultats obtenus, plusieurs applications ont été développées tels que : la détection de cavités ou de nids de gravier ; la détection de vides, de fissures, de délaminations de couches ou de plans de décollement ; la mesure de la profondeur d'une interface de structure multicouche. L'étude sur matériau bitumineux est réalisée dans le domaine fréquentiel uniquement, où le calcul des vitesses d'ondes est prépondérant ainsi que l'étude des allers et retours des ondes de compression. Quelques difficultés existent néanmoins car la texture du matériau en surface est moins homogène que le béton, ce qui rend la mesure difficile ou les résultats souvent peu exploitables. De plus, à haute température, l'amortissement viscoélastique du matériau bitumineux rend difficile la réalisation des essais et il est souvent nécessaire d'ajuster les résultats en fonction de la dépendance fréquentielle et thermique du matériau.

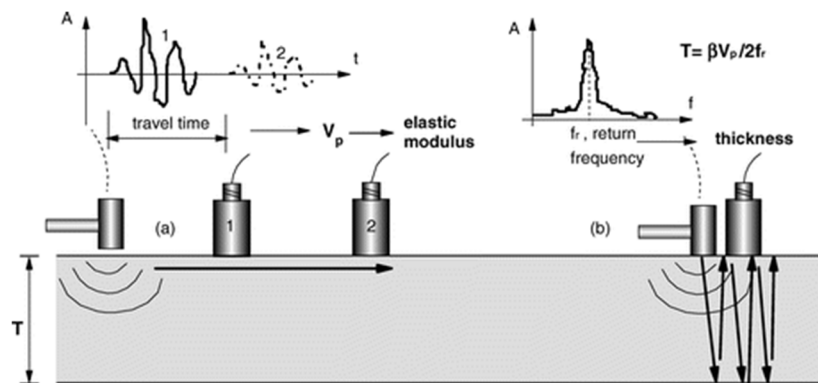


Figure 1 : Schéma d'un essai d'impact Echo (d'après [GUC12])

Le Colibri (Fig. 2) est un appareil défini par Bats-Villard en 1991 [BAT91]. Il permet l'auscultation des interfaces de chaussée grâce à l'analyse spectrale de signaux recueillis par un accéléromètre (réponse verticale principalement) d'une série de trois chocs produits par un marteau instrumenté. Ce dispositif de mesure est compris dans un bâti et maintenu à la surface de chaussée (système masse-ressort). L'essai est reproduit tout le long de la zone d'étude à intervalles réguliers (compromis entre la longueur de la zone et la durée raisonnable de l'intervention). Les transformées de Fourier des signaux de force et d'accélération recueillis sont calculées dans un premier temps et la fonction de réponse en fréquence appelée « inertance » (rapport fréquentiel du signal émis sur le signal reçu) est déterminée. Les valeurs à 300 Hz et 1500 Hz de cette fonction sont extraites pour chaque point d'impact, ce qui donne une représentation sous forme de deux "schémas itinéraires" (valeur de l'inertance à 300 ou 1500 Hz en fonction de la distance parcourue). L'analyse de ces données permet de déterminer l'état des couches supérieures ainsi que les défauts locaux de type décollement. L'interprétation de ces essais, sur uniquement deux fréquences ne permet pas de préciser la nature du défaut. Simonin [SIM05] a étudié la problématique de la sensibilité de la méthode à

la nature ou à la taille du défaut, et conclut que l'information est plus cohérente si l'on considère plutôt une bande de fréquence limitée à 5000 Hz et une température d'essai inférieure à 25°C. L'étude de cette fonction d'inertance doit tenir compte des modes propres "parasites" de la structure pour une bonne estimation via cette méthode.

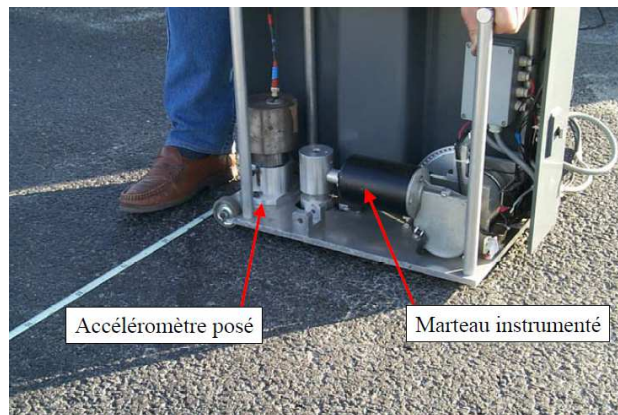


Figure 2 : Essai Colibri (photo [SIM15])

3.2 Méthode de la mesure de déflexion à faible rendement

La mesure de déflexion est très largement utilisée dans le domaine routier pour diagnostiquer l'état structural d'une chaussée. Du plus ancien déflectomètre à boulet au plus récent Traffic Speed Deflectometer, de nombreuses méthodes permettant la mesure de la déflexion en surface de chaussée ont été développées.

3.2.1. Poutre de Benkelman

La poutre de Benkelman (Fig. 3) est un système à balancier avec base de référence qui, depuis sa création en 1953 [WAS54], est devenue un outil standard utilisé par les autorités des réseaux routiers pour les essais non destructifs des chaussées.

Elle peut être utilisée dans deux types d'essais différents :

- soit dans un essai à la plaque pour modéliser la réaction d'un sol (terrain naturel, remblais compacté, couche de chaussée...) en fonction de la charge de la future construction ;
- soit directement placée en contact avec la chaussée entre les roues jumelées d'un camion pour obtenir la ligne d'influence.

La technique de l'essai à la plaque permet de contrôler la déformabilité d'une plate-forme de terrassement en calculant le module de réaction du sol à partir du chargement statique à la plaque. Elle nécessite un appareillage spécifique constitué [LCP73] :

- d'un massif de réaction : camion de chantier lesté de façon à disposer d'une réaction d'au moins 8 tonnes à une distance supérieure à 2m des essieux arrière,
- d'un dispositif de mise en charge hydraulique (groupe motopompe actionnant un vérin),
- d'une plaque de 600 mm de diamètre, rigide et indéformable,
- d'un dispositif de mesure des déflexions : poutre de Benkelman équipée d'un capteur de déplacement.

L'essai consiste à mesurer la déflexion du point de la surface du sol situé à l'aplomb du centre de gravité de la plaque au cours de deux cycles de chargements. Pendant le premier cycle, la plaque est chargée à une vitesse de 80 daN/s pour atteindre une pression moyenne sous la plaque de 2.5 bars (0,25 MPa) et attendre la stabilisation de la déflexion pour effectuer le déchargement (lorsque les variations de la déflexion sont inférieures à 0,02 mm/min). Le

deuxième cycle de chargement est le même que le premier avec une charge sous la plaque de 2 bars (0.2 MPa) seulement. Les modules de déformation relatifs à chacun des deux cycles de chargement sont calculés d'après la formule générale donnant la déflexion totale à la surface d'un massif indéfini, homogène et élastique soumis à une charge sur une plaque circulaire rigide (théorie de Boussinesq, cf ...). En plus de la détermination des modules de déformation, l'essai à la plaque permet l'évaluation de l'efficacité du compactage.



Figure 3 : Essai à Poutre de Benkelman (photo : GC2D)

3.2.2. Dynaplaque

La Dynaplaque (Fig. 4) est un outil de contrôle non-destructif qui permet de mesurer la déformabilité des plates-formes de terrassement et des couches de forme. Le principe de l'essai consiste à appliquer sur le sol à ausculter une sollicitation dynamique analogue en intensité et en durée à celle provoquée par le passage d'un essieu chargé à 13 tonnes roulant à 60 km/h, et évaluer la réponse en mesurant la déflexion du point situé sur l'axe de la charge à l'aide d'un capteur intégré à la plaque. La sollicitation dynamique est générée au moyen d'une masse tombante d'une hauteur donnée sur un ressort amortisseur placé sur une plaque métallique de 60 cm de diamètre reposant sur le sol. Le temps d'application de la charge est de l'ordre de 15 à 20 ms.



Figure 4 : Dynaplaque (photo : Vectra)

3.2.2. Falling Weight Deflectometer

Le FWD (Fig. 5) est un appareil d'essai non destructif conçu pour reproduire, à l'aide d'un impact sur un disque en contact avec la surface de la chaussée, la charge correspondant

à un demi-essieu d'un camion se déplaçant entre 50 et 70 km/h et à mesurer, au même moment, les déflexions générées à la surface de la chaussée. La hauteur de chute de la masse étant variable, plusieurs charges peuvent être obtenues, elles sont comprises entre 20 et 75 kN. Cet appareil permet d'effectuer la comparaison relative des chaussées sur la base d'indices de déflexion, de déterminer la capacité structurale des chaussées, de déterminer les modules d'élasticité des couches de matériaux par rétrocalcul, de calculer les déformations et les contraintes dans la chaussée, d'évaluer l'intégrité structurale des chaussées rigides (transfert de charge aux fissures et joints, détection des vides sous les dalles, etc...), de déterminer la capacité structurale des chaussées non revêtues ou d'effectuer le contrôle de qualité durant la construction.



Figure 5 : FWD (photo : Laboratoire GC2D)

Des versions lourdes nommées Heavy Weight Deflectometer (HWD) sont utilisées pour effectuer les mêmes essais de déflexion sur les pistes aéroportuaires où les charges peuvent atteindre 250 kN [BOU10]. Des versions légères nommées Light Weight Deflectometer (LWD) ou Portable Falling Weight Deflectometer (PFWD) sont également utilisées de la même manière. Il s'agit de la version portable des précédents où la masse ne dépassant pas 20 kg est directement manipulée par l'opérateur.

Les derniers appareils disposent de systèmes d'amortisseurs spécialement conçus pour produire un chargement d'une forme similaire à une demie sinusoïde dont la durée est de 25 à 30 ms et l'intensité peut être ajustée entre 10 et 150 kN. La charge est mesurée par une cellule de charge installée au-dessus d'une rotule sphérique centrée sur une plaque circulaire de 300 mm de diamètre (ou 450 mm selon les modèles). Selon la configuration du modèle, plusieurs géophones (jusqu'à 15 pour certains) permettent d'obtenir les déflexions excentrées de la charge selon le calepinage choisi, jusqu'à 2,40 m du centre de la charge.

3.3 Méthodes de la mesure de déflexion à grand rendement

3.3.1. Déflexographe Lacroix

Le Déflexographe (Fig. 6) est un outil d'auscultation qui permet de déterminer la portance de la structure de chaussée par la mesure de la déflexion lors de passages à vitesse réduite (de 2 à 8 km/h). Il se présente sous la forme d'un camion porteur d'un dispositif de mesure (poutre de référence équipée de deux bras palpeurs) placé sous le châssis. Le Déflexographe a été mis au point pour la première fois en 1956 par Lacroix [LAC63].

Depuis, il a subi plusieurs modifications plus au moins importantes dont la dernière en 1997 avec une re-conception d'ensemble de la poutre de mesure (modèle Lacroix 05 ou Flash) [HUB65], [LEG69], [AUT72], [VIA97]. Le principe de l'essai consiste à mesurer la déflexion de la chaussée entre chaque jumelage de l'essieu arrière du véhicule par les bras palpeurs munis de capteurs rotatifs et articulés sur une poutre de référence. Cette poutre de référence,

désolidarisée du véhicule, repose sur la chaussée par trois points situés hors de la zone d'influence de la charge. Le véhicule avançant, la déflexion est enregistrée jusqu'à ce que les jumelages viennent au niveau des palpeurs. La poutre de référence est alors prise en charge par le véhicule, ramenée vers l'avant, et reposée sur la chaussée dans sa position initiale, pour une nouvelle mesure, sans que le véhicule interrompe son mouvement. Les mesures sont effectuées à une vitesse de circulation de 2 à 4 km/h pour un Défectographe Lacroix classique et de 8 km/h pour Lacroix Flash, avec une charge normalisée de 5 ou de 6.5 tonnes (charge d'essieu de 10 ou 13 tonnes). L'intervalle des mesures de la déflexion, sous chaque trajet des roues jumelées, est de 4 à 6 m selon le type de Défectographe (version châssis long ou châssis court).



Figure 6 : Défectographe (photo : Vectra)

Le Défectographe permet de relever la déflexion sur les deux traces de roue (gauche et droite) avec un ratio (Vitesse / Intervalle de mesure) plus élevé que la plupart des techniques de mesure de déformabilité. Les mesures réalisées avec un maillage serré donnent des informations plus complètes sur l'état structural de la chaussée, des informations qui servent de base à l'évaluation de la capacité portante de la structure auscultée.

3.3.2. Curviamètre

Le Curviamètre (Fig. 7) est un appareil de mesure de la déformabilité (déflexion et rayon de courbure) d'une chaussée sous l'influence d'un essieu jumelé qui circule à 18 km/h. Développé par le Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux publics français (CEBTP) en 1973 [PAQ97], il est basé sur la méthode de la poutre de Benkelman remplacée par une chaîne équipée de géophones.



Figure 7 : Curviamètre (photo : STAC)

Le principe de base du Curviamètre consiste en une mesure continue et rapide de la déformée des chaussées au passage d'un jumelage chargé (de 80 à 130 kN, modifiable). La mesure de la déflexion s'effectue à raison d'un point tous les 5 mètres à 18 km/h au moyen d'une chaîne déroulante passant entre les pneus du jumelage qui dépose à intervalles réguliers des géophones fixés. Cette chaîne est asservie au mouvement du camion porteur de manière à éviter le glissement des capteurs sur la surface du revêtement ausculté.

Le modèle MT-15 produit dans le début des années 90 [CUR91] [LEP97b] permet des vitesses d'exploitation plus rapides (6 m/s ou 21,6 km/h), ce qui donne une capacité de mesure journalière située entre 70 et 100 km selon le réseau.

Le traitement des mesures permet l'obtention des lignes d'influence de la déflexion, de la déflexion maximale et du rayon de courbure. Des interprétations statistiques permettent le découpage en sections structurellement homogènes de la chaussée.

L'analyse des résultats consiste à déterminer pour chaque section homogène :

- les modules des couches par une procédure d'analyse inverse,
- la durée de vie en se basant sur la déflexion ainsi qu'à partir de données sur le trafic.

3.3.3. Rolling Wheel Deflectometer

Le Rolling Wheel Deflectometer (RWD) est monté directement sur une semi-remorque. La déflexion mesurée est la réponse à la charge d'un essieu de 80 kN qui se déplace à des vitesses normales de circulation. Une barre de référence en aluminium, suspendue sous la remorque et supportant quatre capteurs laser, mesure la distance à la surface de la chaussée (cf. figure 8). Des confrontations entre la méthode RWD et FWD ont été réalisées [AND02] et ont montré une bonne corrélation entre les deux méthodes à des vitesses de circulation normales.



Figure 8 : Rolling Wheel Deflectometer (photo : [STEE08])

3.3.4. Traffic Speed Deflectometer

Le TSD (Traffic Speed Deflectometer) est une remorque avec un seul essieu double de 10 tonnes (Fig. 9). Le mouvement (vitesse verticale) de la surface de la chaussée causé par la charge de la remorque est mesuré par des capteurs laser Doppler positionnés comme indiqué sur la Figure 9. Le résultat des mesures TSD est traité en continu à partir des indicateurs classiques d0-d300 (voir partie 5), du maximum de déflexion et du rayon de courbure. Le TSD fonctionne à la vitesse du trafic (jusqu'à 80 km/h). La vitesse minimale de fonctionnement est de 40 km/h. Des premiers essais [BAL10] ont montré une bonne répétabilité de l'essai et une indépendance de la vitesse du véhicule ainsi qu'une bonne corrélation avec des essais FWD et Défectographe.

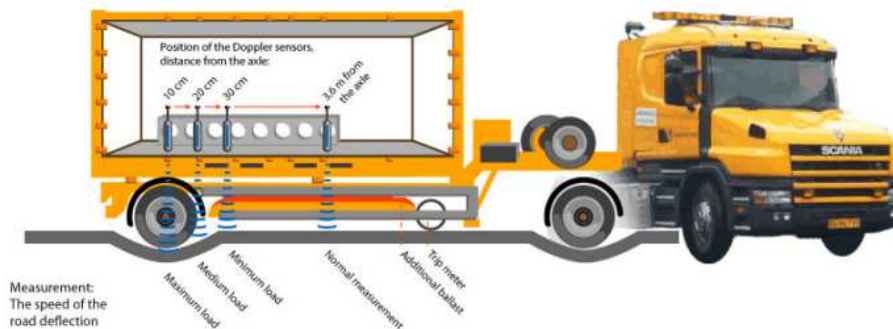


Figure 9 : Traffic Speed Deflectometer (photo : [BAL10])

Des études (comme [CHA16b]) ont porté sur la corrélation entre données FWD et données TSD et ont montré que pour la plupart des chaussées, il apparaît un comportement de sous-couche non linéaire dans les données mesurées par le TSD provoqué par les effets dynamiques de la charge. Une comparaison entre les données FWD et TSD ont alors montré une tendance linéaire estimée à l'aide d'une relation de corrélation du type :

$$D_0(\text{FWD}) = 0.999 * D_0(\text{TSD}) + 0.0026k.$$

4 Historique et présentation du FWD

Depuis le début des années 60, le critère de déflexion est devenu l'indicateur structurel de base pour suivre l'évolution du comportement d'une structure de chaussée, déterminer sa capacité portante et estimer sa durée de vie résiduelle. Le suivi des chaussées s'appuyait au début essentiellement sur des auscultations périodiques systématiques par mesure de la déformabilité en utilisant des méthodes d'essai statiques ou quasi-statiques (essai à la plaque ou Benkelman). Le problème de ces techniques est que les conditions d'essais sont différentes des conditions réelles en cours d'exploitation (chargement dynamique subit par la chaussée). C'est dans ce contexte que le déflectomètre à boulet a été mis au point au LCPC en 1963 [BRE63]. Le premier prototype était constitué de trois parties principales :

- un dispositif de chargement composé d'un boulet (masse métallique de 150 kg), d'un ressort amortisseur et d'une plaque rigide de 360 mm de diamètre,
- un dispositif de levage mécanique pour monter et relâcher la masse à la hauteur voulue,
- un dispositif de mesure composé d'un capteur de déplacement placé au centre de la plaque de chargement.

La sollicitation produite par la chute libre de la masse est transmise à la chaussée par l'intermédiaire de la plaque de chargement et la déflexion de la surface est mesurée par le capteur de déplacement. L'appareil a fait l'objet de quelques améliorations mineures (système d'amortissement [DOS64] et support de transport [BON67]) avant d'être abandonné au profit du Déflectographe Lacroix. Le développement de l'appareil est mené par les pays scandinaves avec l'apparition du premier déflectomètre à masse tombante au Danemark en 1972 [BOH72], version améliorée du déflectomètre à boulet installé sur une remorque.

Au milieu des années soixante, Phønix (aujourd'hui Sweco Pavement Consultants) fabrique le premier FWD remorqué. En 1979, la société Dynatest présente son premier FWD (FWD Dynatest 8001). En 1981, Phønix présente un FWD (ML5000) avec une cellule de charge et 6 géophones pour concurrencer le FWD Dynatest 8001. Phønix a poursuivi le développement et l'amélioration de son FWD avec une évolution vers le ML10000 (remorque à un essieu) puis

le ML12000 (remorque à 2 essieux). Les deux équipements ont des plages de mesures allant jusqu'à 120 kN. Dans les années 80, la société commercialise les FWD MLY10000 et MLY12000 toujours avec 6 géophones mais actionnés par moteur hydraulique et des systèmes d'enregistrement électronique.

À la fin des années 1980, des développements aboutissent à la série PRI qui compte de 6 à 9 géophones et est réglable de 7 à 250 kN.

Le FWD tel qu'utilisé aujourd'hui a donc été le fruit d'une série d'améliorations entre 1975 et 1982 qui ont permis le perfectionnement et l'automatisation de l'appareil avec :

- l'automatisation des opérations de l'essai,
- l'augmentation du niveau de chargement,
- l'amélioration de la plaque de chargement pour assurer une pression uniforme sur la surface de la chaussée,
- l'utilisation de plusieurs capteurs pour mesurer le bassin de déflexion au lieu d'un seul point au centre de la plaque de chargement,
- la mise en place d'un support pour l'installation de capteurs supplémentaires.

Récemment Dynatest a développé une nouvelle version nommée FastFWD avec chargement électrique plutôt qu'hydraulique qui augmente le nombre de points de mesure effectués de plus de 70%.

4.1 Versions existantes

Les versions améliorées du FWD sont fabriquées et commercialisées par plusieurs sociétés aujourd'hui : Dynatest (Danemark), Carl Bro (ancien Phønix, Danemark), KUAB (USA), JILS (USA) et Pavetesting (UK) [ALA08].

► Dynatest

Le groupe Dynatest, leader du marché, compte en 2017 650 appareils utilisés dans le monde dont 600 du type FWD 8000 (figure 10) et HWD 8081 et 30 récents FastFWD 8012. En plus de l'équipement FWD, Dynatest fournit des calibrages FWD. Les FWD de Dynatest sont montés sur une remorque ou sur un véhicule. La plupart des FWD Dynatest utilisent ELMOD. Le programme est basé sur une itération mathématique (élément fini supporté par la théorie élastique linéaire ou un algorithme de sous-niveau non linéaire). Les fichiers de base de données générés par Dynatest WinFWD sont gérés avec Microsoft Access.



Figure 10 : Dynatest 8000 (photo : Laboratoire GC2D)

► Carl Bro - Sweco

Le groupe Carl Bro, acquis par le cabinet de conseil néerlandais Grontmij en 2006, offre trois types de FWD: monté sur remorque, monté sur véhicules, et portables. Il existe actuellement

3 versions nommées PRIMA-X : PRIMA100 LWD portable ; PRIMAX 1500 FWD ; PRIMAX 2100S OR 3500 HWD (figure 11).



Figure 11 : PRIMAX 2100 HWD (photo : [BRO14])

Le logiciel d'analyse est RoSy DESIGN développé par la société consultante Grontmij. Basé sur un algorithme de transformation de Fourier rapide, il calcule les contraintes de la couche de chaussée dans un environnement Windows 32 bits et est capable de lier les données recalculées à une base de données géospatiale. Le programme est également compatible avec les données provenant de tout équipement FWD.

► KUAB

Les remorques et véhicules embarquant un FWD sous la marque KUAB sont commercialisés par la société Engineering and Research International, basé à Savoy, Illinois (États-Unis). L'entreprise propose également services de réparation et d'étalonnage de FWD. Le KUAB 150 (figure 12), seul modèle de la société (180 exemplaires vendus dans le monde), utilise un système unique de chargement double masse pour créer une déflexion qui produit une durée de chargement plus longue et représente plus précisément une charge de roue.



Figure 12 : KUAB 150 (photo : Engineering and Research International)

La mesure de la déflexion se fait par des capteurs LVDT qui fournissent des mesures de déflexions directes avec une plage de mesure plus grande et peuvent ainsi mesurer à la fois les grandes déflexions (sols) et les plus petites (chaussées). Pour l'analyse des données, KUAB fournit le progiciel ERIDA. Ce logiciel est compatible avec les équipements Dynatest FWD («Pavement Analysis Software» 2003). Le programme prend en charge le format FWD de KUAB, les fichiers texte Unicode et les fichiers PDDX.

► PaveTesting

PaveTesting est une société anglaise qui propose 3 trois modèles : PaveFWD monté sur remorque (figure 13), PaveFWD monté sur véhicule et PaveHWD / PaveSHWD. PaveFWD utilise 7 capteurs de déflexion qui mesurent l'impulsion de charge sur 60ms, le système est néanmoins capable de mesurer jusqu'à 23 impulsions sur 240ms.



Figure 13 : PaveHWD (photo : PaveTesting)

► Jills

Jills est une société américaine commercialisant des véhicules instrumentés d'un FWD JILLS 20T et d'un GPR (figure 14).



Figure 14 : JILLS 20T (photo : Jills)

Une comparaison et analyse des différents fabricants de FWD a été réalisé par le National Cooperative Highway Research Program [ALA08].

4.2 Description générale de l'appareil et de l'essai FWD

Le défectomètre à masse tombante se compose de trois parties distinctes regroupés dans une remorque tractée : le chargement (figure 15), le système hydraulique et l'électronique embarquée. Un système d'acquisition de données situé dans le véhicule tracteur permet de contrôler l'exécution des essais et d'enregistrer les données.

Le principe de l'essai consiste à reproduire la sollicitation due au passage d'un véhicule lourd et à estimer la réaction de la chaussée en mesurant la déformation induite. Le but est de déterminer les propriétés mécaniques de chaque couche, évaluer leur capacité portante et les éventuelles épaisseurs de renforcement de la chaussée. L'utilisation du FWD pour l'auscultation des chaussées routières et aéroportuaires, souples ou rigides, permet généralement de démontrer que certaines routes :

- sont sous-dimensionnées par rapport au trafic,

- offrent une portance insuffisante au regard de l'épaisseur des couches,
- ont souffert de vieillissement lié à des phénomènes de surcharge.



Figure 15 : Plaque de chargement et rampe de géophone (photo : GC2D)

Le FWD conventionnel est capable d'appliquer des charges allant de 7 à 120 kN, il est utilisable pour des essais sur tout type de routes et autoroutes ainsi que beaucoup de chaussées aéroportuaires [REP05]. La charge standard utilisée pour l'analyse structurale des chaussées souples est habituellement de 40 à 50 kN, soit la moitié de l'essieu de référence. Pendant l'essai, la masse s'élève à la hauteur voulue (en fonction de la nature de la structure testée) puis est lâchée grâce à un signal électrique. L'impulsion est transmise par un amortisseur en caoutchouc à une enclume reposant sur une plaque d'acier circulaire qui peut s'incliner de quelques degrés pour mieux épouser la surface de la chaussée. Une membrane de caoutchouc placée entre la plaque et le revêtement permet de répartir uniformément les contraintes. Le chargement dynamique produit par la chute de la masse est mesuré par une cellule de charge située au-dessus de la plaque de chargement et peut varier selon le poids de la charge et la hauteur de chute. Sur le Dynatest 8000, le poids de la charge est de 50 à 300 kg et sa hauteur de chute peut varier de 50 à 400 mm. La force appliquée sur le sol se situe alors dans une plage de pression de 0,1 à 1,5 MPa. La durée de l'impulsion semi-sinusoidale générée est typiquement de 20 à 30 millièmes de seconde, ce qui correspond au temps de chargement produit par un camion circulant de 65 à 80 km/h.

La déformation verticale de la surface de la chaussée est enregistrée par des géophones. Le premier géophone est situé dans une cavité aménagée au centre de la plaque de chargement. Les autres sont placés sous le châssis le long d'une poutrelle mobile et peuvent être positionnés aux endroits désirés selon les besoins (une rangée de sept à neuf capteurs de déflexion placés par défaut à des endroits situés entre 200 et 1900 mm depuis le centre de la plaque de chargement). Chaque géophone peut mesurer des déflexions de ± 2 microns avec une précision de 2% (Fig. 16). Pour chaque valeur de déflexion, les coordonnées des points de mesure, la température de l'air, la température de l'asphalte, la charge, la position et la déflexion maximale pour chacun des géophones sont enregistrées.

Au cours de ces dernières années, le FWD est de plus en plus utilisé pour sa polyvalence, sa fiabilité, et sa facilité d'utilisation [LYT86] [BEN89] [NCH01] [HOL05]. La durée d'un essai est de quelques minutes, et plus de 100 points de mesure peuvent être effectués par jour. Généralement l'intervalle entre deux points d'essai est de 50 à 500 m, cet intervalle varie en fonction de la structure testée. L'essai FWD a bénéficié depuis sa création de nombreuses comparaisons avec d'autres techniques. Pour cela, il est possible de se référer à : [KRA05], [CAL99], [FLI12], [SIM15], [CHA16b].

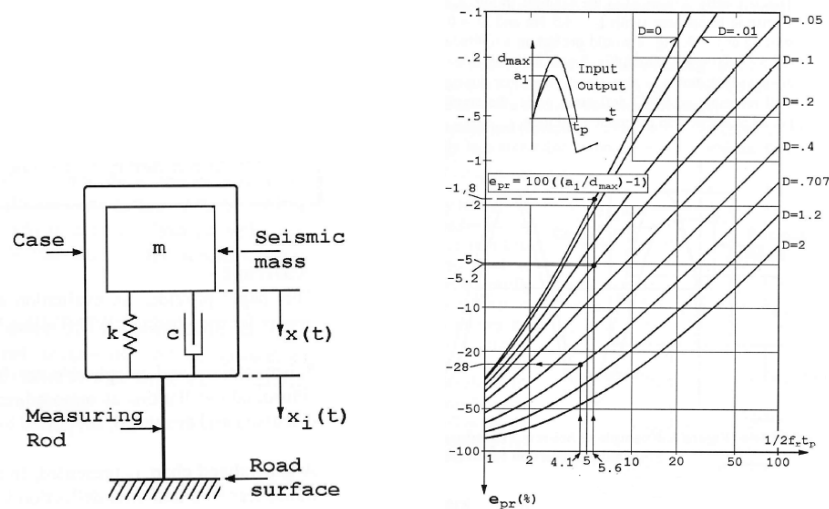


Figure 16 : Fonctionnement d'un géophone estimation d'erreur (doc Dynatest)

Le FWD Dynatest 8000 présente de très bonnes performances métrologiques [LEP97]. Du point de vue de sa répétabilité et de sa justesse relative (sous son propre chargement), il appartient aux déflectomètres de classe 2, telle que définie dans la méthode LPC de mesure et d'exploitation de la déformabilité de surface. Pour mesurer directement la déflexion de référence, au sens de la méthode LPC, la hauteur de chute doit être choisie de sorte qu'elle produise une charge égale à 68 kN. De façon générale, la reproductibilité reste le problème principal des FWD, surtout lorsqu'on est amené à considérer ensemble des appareils de technologies différentes.

Enfin, le FWD a été récemment utilisé pour le contrôle du compactage des couches de chaussée [FEN13] et sur chaussée instrumentée circulée (CAPTIF : type manège de fatigue) pour estimer la durée de vie [VER89] ou non circulée pour les travaux présentés à la fin de ce document [TAU16].

5 Les indicateurs structurels utilisés aujourd'hui

Des indicateurs basés principalement sur la déflexion ont été développés depuis la création du FWD pour quantifier l'état structurel des revêtements souples directement en utilisant le bassin de déflexion mesuré pendant les essais. Ces indices d'évaluation structurelle utilisés depuis l'origine du FWD sont principalement d'origine statique. Nous distinguons dans cette partie les indicateurs structurels de base reposant sur des écarts de déflexions entre deux géophones et les indicateurs basés sur des lois empiriques.

5.1 Indicateurs structurels basiques

- ▶ Déflexion maximale et rayon de courbure

La déflexion maximale est la déflexion mesurée au centre de la charge D_0 , elle donne une indication sur la structure totale avec une contribution importante du sol support (environ 70% d'après [HOR06]).

Le rayon de courbure est calculé par [HOR06] :

$$R_{courb} = \frac{200^2}{2D_0[(D_0/D_{200}) - 1]}$$

Cet indicateur est dépendant de la déflexion au centre de la charge et à 200 mm du centre, il donne une indication sur la structure en surface et en sommet de la couche de base. Les

déflexions maximales sont de bons indicateurs pour tout type de chaussée. Le produit du rayon de courbure par la déflexion maximale est parfois utilisé et permet de qualifier la qualité de la chaussée avec un critère limite ($R_d = 15\ 000\ \text{m} \cdot 1/100\text{mm}$)

► Indices BLI, MLI et LLI

L'indice de la couche de base BLI ou SCI (Base Layer index ou Surface Curvature Index) caractérise une zone proche de la charge et se calcule par [BIL14], [HOR08], [HOR09], [SET09], [SOL17] :

$$SCI = BLI = D_0 - D_{300}$$

Cette différence entre la déflexion au centre de la charge et à 300 mm donne une indication sur la couche de base. Il existe également un calcul permettant d'obtenir un indice de résistance SSI à partir du BLI et de la déflexion D_7 .

L'indice de la couche intermédiaire MLI ou BDI (Middle Layer Index ou Base Damage Index) caractérise une zone médiane et se calcule par :

$$BDI = MLI = D_{300} - D_{600}$$

Cette différence entre la déflexion à 300 mm et à 600 mm donne une indication sur la sous-couche.

L'indice de la sous couche LLI ou BCI (Lower Layer Index ou Base Curvature Index) caractérise une zone plus éloignée et se calcule par :

$$BCI = LLI = D_{600} - D_{900}$$

Cette différence entre la déflexion à 600 mm et à 900 mm donne une indication sur la sous-couche la plus profonde.

Les indexes BLI, MLI et LLI (cf. Fig. 17) permettent un classement par valeurs critiques de l'état structurel d'une chaussée en fonction de son type.

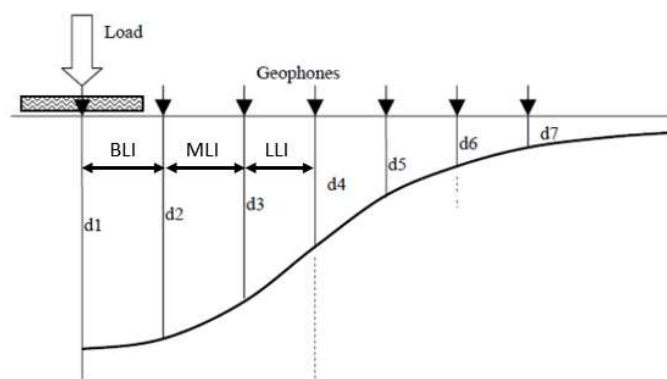


Figure 17 : Indicateurs BLI, MLI, LLI ([GOY15])

Des valeurs limites empiriques sont alors définies pour caractériser l'état suivant 3 catégories (cf. Table 1) : sain, préoccupant et sévère suivant la table 1 [HOR06] pour deux valeurs de charge (50 et 100 kN).

Kim et al. [KIM02] présentent un algorithme (figure 18) répertoriant ces indicateurs et leurs choix d'utilisation sur les paramètres du bassin et les réponses critiques des chaussées pour déterminer la résistance des matériaux de surface, de base et de sous-couche.

Ces indicateurs sont néanmoins critiquables. Goyer et al. [GOY15a] ont montré que les rayons de courbures calculés, caractéristiques des couches de surface, peuvent parfois être erronés lors de variations de température. Leurs interprétations restent correctes pour des températures allant de 25 à 35°C.

Condition structurelle	Gamme de valeurs pour une charge de 50kN				
	R_{courb} (m)	D0 (micron)	BLI (micron)	MLI (micron)	LLI (micron)
Bonne	>100	<500	<200	<100	<50
Limite	50 à 100	500 à 750	200 à 400	100 à 200	50 à 100
Dégradée	< 50	>750	>400	>200	>100

Condition structurelle	Gamme de valeurs pour une charge de 100kN				
	R_{courb} (m)	D0 (micron)	BLI (micron)	MLI (micron)	LLI (micron)
Bonne	>90	<625	<250	<115	<65
Limite	42 à 90	625 à 920	250 à 475	115 à 220	65 à 120
Dégradée	< 42	>925	>475	>225	>120

Table 1 : Valeur critique des indicateurs structurels (d'après [HOR06])

Des indices de zone (Area Index AI) sont parfois utilisés [HOR15a] :

- Couche supérieure : $AI_1 = \frac{D_0 + D_{300}}{2D_0}$
- Couche intermédiaire : $AI_2 = \frac{D_{300} + D_{600}}{2D_0}$ et $AI_3 = \frac{D_{600} + D_{900}}{2D_0}$
- Couche inférieure : $AI_4 = \frac{D_{900} + D_{1200}}{2D_0}$

L'indice américain MSI (Modified Structural Index) est utilisé par VDOT (Etat de Virginia, USA) [BRY13]. Les auteurs démontrent que les sections avec des valeurs de MSI faibles se détériorent fonctionnellement plus rapidement que les sections avec des valeurs de MSI plus élevées. L'indice est calculé par :

$$MSI = \frac{0,4728(D_0 - D_{1,5H})^{-0,481} H^{0,7581}}{0,05716(\log(ESAL) - 2,32\log(M_R))^{2,36777}}$$

où H est l'épaisseur de la chaussée, ESAL la charge équivalente et MR le module résilient.

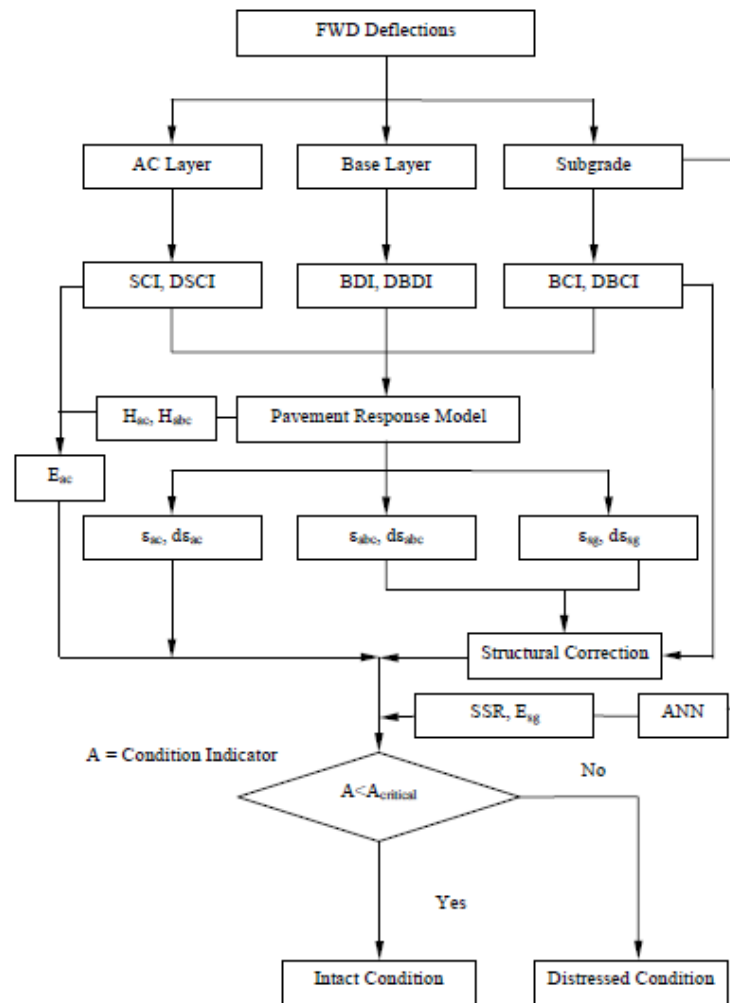


Figure 18 : Liste des indicateurs utilisés dans AASHTOT et comparatif [KIM02].

L'indice américain SSI (Structural Strength Index) est utilisé par INDOT (Indiana, États-Unis) [FLO10] :

$$SSI = 100 \left\{ 1 - \alpha e^{-\frac{\beta}{\sigma \gamma}} \right\}$$

où α , β , γ sont des coefficients de régression calculés pour des familles de chaussées et σ est la déflexion au centre de la charge. Les seuils du SSI sont fixés par les conditions excellentes, très bonnes, bonnes, équitables et mauvaises suivant la table 2.

Pavement Family	Excellent	Very good	Good	fair	poor
Flexible interstate	95-100	90-95	85-90	80-85	<80
Flexible NHS	90-100	85-90	80-85	75-80	<75
Flexible Non NHS	85-100	80-85	75-80	70-75	<70
Rigid interstate	95-100	90-95	85-90	80-85	<80
Rigid NHS	90-100	85-90	80-85	75-80	<75
Rigid Non NHS	85-100	80-85	75-80	70-75	<70

Table 2 : Critère du SSI

L'indice américain PCI (Pavement Condition Index développé par le LADOTD (Etat de Louisiane, USA) [KHA09] intègre dans ses variables les fissures apparentes, l'orniérage, les réparations éventuelles et varie de 95 à 100 (très bon), 85 à 94 (bon), 65 à 84 (moyen), 50 à 64 (faible), et 49 ou moins (mauvais)

5.2 Indicateurs basés sur des lois empiriques

► Structural Number SN

Le guide de conception des chaussées américain AASHTO [AAS93] définit le nombre structurel effectif SN_{eff} en fonction de l'épaisseur totale des couches de chaussée D , et le module de revêtement efficace de toutes les couches au-dessus de la couche de fondation E_p sous la forme suivante [SOL15] :

$$SN_{\text{eff}} = 0,0045D^3\sqrt{E_p}$$

SN fournit une représentation précise des conditions de chaussées en service en termes de fissuration et d'orniérage [HOR14], ainsi que l'épaisseur des couches de chaussée. En général, un SN élevé serait mesuré pour les chaussées ayant une épaisseur de couche plus importante et / ou avec une dégradation superficielle faible. Le module effectif de la couche de fondation est calculé grâce à une formule analytique fonction du chargement de la déflexion mesurée au centre du chargement et de l'épaisseur. L'approche est basée sur la théorie à deux couches de Burmister, qui suppose une sous-couche linéaire élastique infinie et repose sur des couches rigides. D'autres méthodes ont été proposées dans la littérature pour calculer le nombre structurel effectif (SN_{eff}) à partir des données de déflexion de FWD. Abdel-Khalek et al. [ABD16] utilisent le modèle de Burmister et la translation de température et présentent des méthodes approchées pour une comparaison de résultats et de performances d'indice structurel via FWD. Alam et Al. [ALA07a] ont proposé des recommandations pour ASHTO et ELMOD. Pour cela, le module élastique (M_R) défini par :

$$M_R = \frac{P(1 - \mu^2)}{\pi r d_0}$$

et le nombre structurel effectif SN_{eff} sont choisis comme réponse et ont été calculés conformément à la norme AASHTO où la déflexion au centre de la charge d_0 peut être calculée par :

$$d_0 = 1,5Pa \left[\frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a}\right)^3 \frac{\sqrt{E_p}}{M_R}}} + \frac{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{D^2}{a^2}}}\right)}{E_p} \right]$$

Le détail de ces méthodes d'analyse est présenté dans [HOR14] et [SAR15]. Des corrélations avec les différents paramètres de pente sur le bassin sont évoqués et permettent de conforter les analyses sur une structure de référence. Elles sont alors renforcées par la détermination du nombre structurel SN_{eff} , du nombre structurel ajusté SNP_{eff} et d'un nombre appelé Pavement Number (PN_{eff}) (voir paragraphe suivant). Ces indices structurels sont basés sur les équations de corrélation développées à partir d'une base de données de divers types de chaussées sud-africaines.

Rohde [RHO96] a développé une corrélation entre le nombre SN, la déflexion à d_0 et une déflexion mesurée à 1,5 fois l'épaisseur totale du revêtement. Dans cette approche, le module de la sous couche est lié à un nombre noté California Bearing Ratio (CBR). Le SN_{SG} peut alors être déterminé au moyen des valeurs réelles de laboratoire CBR ou dérivé du FWD.

$$SN_{SG} = 3.51(\log_{10} CBR) - 0.85(\log_{10} CBR)^2 - 1.43$$

Un nombre structurel modifié (SNP) a également été défini :

$$SNP = SN + SN_{SG}$$

où SN est la contribution structurelle des couches de chaussée au-dessus de la couche de fondation et SN_{SG} représente la contribution de la couche de fondation.

Le TxDOT (Etat du Texas, USA) [ZHA03] a développé des estimateurs de l'état structurel, en utilisant principalement le SNP et l'indice de condition structurelle SCI comme outils pour les décisions concernant l'entretien et la réhabilitation.

Le SCI est déterminé par : $SCI = SNP_{eff} / SNP_{req}$ où SNP_{eff} est le nombre structurel existant et SNP_{req} le nombre structurel requis généralement calculé comme nécessaire pour 20 ans d'utilisation en fonction des qualités et des épaisseurs de matériaux connues. L'utilisation de l'indice SCI s'est révélée efficace pour discriminer les chaussées qui ont besoin de renforcement structurel de celles qui sont en bonne condition.

Rohde et al. [ROH94] ont proposé une approche de calcul qui permet de prendre en compte l'épaisseur du matériau de chaussée pour déterminer la réponse mécanique du sous-sol. Sur la base de l'hypothèse que la zone d'influence conique du stress à travers la structure de chaussée est située à 34° sous la surface, l'approche suggère deux paramètres principaux : SIP (indice structurel de chaussée) et SIS (réponse des matériaux de chaussée et des premiers 300 mm de la couche de fondation). Le travail de Rohde a été utilisé pour estimer le nombre structural SN de la structure, associé au SIP, et le module de sous-couche. L'étude a examiné 7776 différentes combinaisons typiques de modules / épaisseur pour chaque matériau de chaussée pour effectuer le calcul de déflexion de surface à différentes distances d'une charge de 40 kN appliquée sur une surface circulaire en utilisant un logiciel élastique linéaire multicouches. Un modèle à éléments finis a été utilisé pour obtenir le bassin de déflexions et la déformation verticale au sommet de la couche de fondation pour les conditions de chargement standard et diverses caractéristiques du matériau. La modification de l'indice de déflexion a été effectuée afin de l'utiliser pour des structures de chaussées plus épaisses sans avoir besoin d'extrapoler des données lorsque la configuration typique de FWD est utilisée. Cette équation a été validée de manière satisfaisante avec des données in situ et peut être utilisée pour obtenir directement la déformation verticale au sommet de la couche de fondation à partir de bassins de déflexion obtenus à partir de tests FWD.

► Pavement number PN

Ulitz [ULI87] a développé un indicateur nommé SM qui calcule le module de surface proportionnel au rayon de la plaque et à la déflexion mesurée à une distance donnée (utilisé dans le calcul à la dynaplaque en d_0 par exemple) et permet de qualifier l'état grâce à l'écart entre le module de surface mesurée en fonction de la distance par rapport à un modèle élastique. Ce module de surface SM est déterminé à une distance où la charge crée une déflexion maximale d_0 par :

$$SM_0 = \frac{2a\sigma_0(1 - \mu^2)}{d_0}$$

et en chaque point par :

$$SM_R = \frac{a^2\sigma_0(1 - \mu^2)}{Rd_R}$$

Où σ est l'épaisseur de la couche, μ le coefficient de Poisson, a le rayon de la plaque, d_R la déflexion à une distance r . Ce nombre permet d'estimer le module de la sous couche par une estimation du module de surface. Ullidtz a déterminé que le gradient du module de surface (SM) peut être utilisé pour déterminer des modifications de contraintes dans la plateforme et donc de comportement (élastique linéaire ou non).

Le module de surface différentiel (SM_{diff}) est la différence entre le module de surface (SM) à 600 mm et à 1200mm peut donc être utilisé comme indicateur de la pente de la courbe SM. Des gammes de SM_{diff} peuvent servir d'estimateur (Elastique linéaire : SM_{diff} entre -20 et 20 Mpa, souple : >20 et rigide < -20).

Le Pavement Number PN utilise soit une approximation de massif semi infini élastique théorique équivalente par l'équation d'Odemark ou les équations de Boussinesq pour calculer les valeurs des modules de surface comme «module moyen pondéré» du semi-espace équivalent. Les valeurs de Module de Surface (SM_i) peuvent être calculées à n'importe quel endroit i , à partir du point central de chargement. On peut donc déterminer la contribution SM équivalente de la structure de chaussée au total (SM_{pav}) en faisant une distinction entre la contribution de la sous-surface SM et en la soustrayant, ou en supposant que la contribution SM équivalente du système stratifié est la même que pour la sous-couche. Ainsi, en convertissant la structure de chaussée en un demi-espace élastique idéal de Boussinesq, l'épaisseur de couche équivalente (He) est multipliée par le SM_{pav} . Le PN_{eff} ainsi déterminé est en fait un système de chaussée à deux couches (une couche de fondation sur lequel repose une couche de matériau théoriquement idéalisé).

$$PN_{eff} = \frac{SM_{300}he}{10}$$

Où SM_{300} est le module de surface à d_{300} et he l'épaisseur de la couche équivalente.

► Structural Health Index (SHI)

Plus récemment, Elbagalati et al. [ELB16] ont développé un indicateur de durée de vie d'une structure de chaussée nommé SHI. Les auteurs utilisent ELMOD 6 pour l'analyse inverse et BELLS2 pour les corrections en température dans la couche de matériau bitumineux. Un calcul du nombre structurel SN précédemment défini est effectué et la formulation du SHI en fonction de SN est présenté par la formule :

$$SHI = \frac{100}{1 + e^{0,15(SN_{loss\%}-30)}}$$

SHI utilise l'indice structurel SN modifié d'un facteur de correction SN_{loss} . SHI a été comparé au PCI du LADOTD et montre peu de différence. L'avantage est ici une échelle définie entre 0 et 100 (table 3).

Initial decision	New decision			
	SHI >70	SHI 50-70	SHI 30-50	SHI <30
Micro surfacing	Micro surfacing	Thin overlay	Med overlay	Thick overlay
Thin overlay	Thin overlay	Med overlay	Thick overlay	Reconstruct
Med overlay	Med overlay	Thick overlay	Reconstruct	Reconstruct
Thick overlay	Thick overlay	Thick overlay	Reconstruct	Reconstruct

Table 3 : Critère du SHI

6 Les différentes modélisations numériques de l'essai FWD

Différentes méthodes ont été proposées pour estimer le module élastique basé sur des tests en laboratoire et des équations empiriques (BON77) et [SAL11]) ou des méthodes de propagation des ondes ([BRI92], [BEN09]). Plusieurs méthodes ont été développées pour calculer les propriétés mécaniques des chaussées souples. Ces méthodes varient selon le type d'analyse, le modèle de matériau et l'algorithme d'optimisation. Les principales méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles régissant le comportement d'un massif soumis à une excitation de type FWD peuvent se classer en trois familles : les méthodes analytiques, les méthodes semi-analytiques et les méthodes numériques. Lorsque les calculs le permettent, les méthodes analytiques ou semi-analytiques sont employées. Elles s'appliquent en général à des géométries simples et des modèles linéaires. Lorsque ce n'est plus le cas, les méthodes numériques (différences finies, éléments finis FEM, éléments frontières BEM, etc.) peuvent être utilisées.

6.1 Approche statique

► Modèle de Boussinesq

Il s'agit d'un modèle monocouche développé initialement pour la mécanique des sols. Ce modèle, développé par Boussinesq en 1885 [BOU85], permet de calculer la réponse d'un massif élastique semi-infini soumis à l'action d'une charge statique ponctuelle. Dans le cas d'une charge d'intensité uniformément répartie sur un cercle de rayon a , le déplacement u_z , la contrainte verticale σ_z et la contrainte radiale σ_r en un point sur l'axe de la charge situé à une profondeur z peuvent être déterminés à partir des expressions suivantes :

$$u_z = \frac{q_0}{E} \left[2(-v^2)\sqrt{a^2 + z^2} - \frac{(1+v)z^2}{\sqrt{a^2 + z^2}} + (v + 2v^2 - 1)z \right]$$
$$\sigma_z = q_0 \left[-1 + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right]$$
$$\sigma_r = \frac{q_0}{2} \left[(-1 + 2v) - \frac{2(1+v)z}{\sqrt{a^2 + z^2}} - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right]$$

Malgré la simplicité et l'efficacité de ce modèle, son principal inconvénient est qu'il ne permet pas de modéliser les structures multicouches. Benedetto et al. [BEN12] proposent un modèle elliptique pour prédire les déflexions induites par un LWD (Light Weight Deflectometer) basé sur la théorie de Boussinesq.

► Modèles à deux couches

Le premier modèle bicouche dédié aux chaussées a été créé par Westergaard en 1926 [WES26]. Il permet de déterminer les contraintes et déformations d'un système constitué d'une plaque reposant sur un sol assimilé à un ensemble de ressorts indépendants. Il a été suivi par le modèle de Hogg en 1938 [HOG38] qui présente la chaussée comme une plaque reposant sur un massif élastique semi-indéfini de type Boussinesq. Depuis, plusieurs améliorations ont été apportées aux deux modèles par l'introduction d'une couche de cisaillement entre la couche de chaussée et le sol [PAS54] puis l'introduction d'un assemblage de ressorts entre la couche de chaussée et la couche de cisaillement [KER64]. Bien que ces modèles soient à la base de la conception des chaussées rigides, ils restent incapables de représenter une structure multicouche.

► **Modèle multicouche de Burmister**

En 1943, Burmister a présenté la solution des équations différentielles d'un système multicouche élastique [BUR43] permettant pour la première fois de disposer d'un modèle pour les chaussées souples. Le modèle traite le problème général d'une structure à n couches reposant sur un massif élastique semi-indéfini de Boussinesq. Il permet de calculer les contraintes, les déformations et les déplacements en tout point dans la structure de chaussée à partir du module réversible et de l'épaisseur des couches qui la constituent. Les principaux avantages du modèle sont que les couches sont traitées comme des structures élastiques (et non comme des plaques), les interfaces entre couches peuvent être collées ou décollées et le cas de charges complexes (jumelages, essieux tandem ou tridem etc.) peut être traité en additionnant les effets des charges élémentaires.

Le logiciel Alizé-LCPC [LCP94] permet le calcul des sollicitations créées par le trafic dans les structures de chaussées. Le programme repose sur la solution au problème du multicouche élastique linéaire isotrope de Burmister. Il considère un massif semi-infini, constitué d'une superposition de couches de matériau d'épaisseur constante. Chaque matériau est décrit par son comportement mécanique, caractérisé par son module d'Young et son coefficient de Poisson. La solution est la combinaison des réponses aux charges élémentaires, permettant de modéliser l'ensemble des sollicitations possibles. La charge du FWD étant connue (diamètre de la plaque de chargement, force appliquée), le logiciel Alizé - LCPC permet d'exploiter le bassin de déflexions par rétrocalcul : si l'épaisseur des couches de chaussées, et leurs conditions d'interfaces (collées ou non) sont connues, les modules des différentes couches de chaussées peuvent être calculés. Cette exploitation se fait en statique, sur la base de la force maximale appliquée. L'algorithme utilisé pour la détermination des modules par analyse inverse est basé sur la méthode de Newton-Raphson.

► **Modèle multicouche d'Odemark-Boussinesq**

Développée en 1949 par Odemark [ODE49], cette méthode suppose que les contraintes et les déformations à la base de chaque couche dépendent uniquement de l'épaisseur de cette couche et que la rigidité d'une couche est proportionnelle à $h^3E/(1-\nu^2)$. Cette hypothèse permet de transformer un système multicouche en un massif semi-infini de Boussinesq en calculant l'épaisseur équivalente h_e d'un système composé de n couches.

Asli et al. [ASL12] utilisent cette méthode pour une application au deflectomètre portable (LWD) en remettant en question le modèle élasto-statique basé sur la théorie de Boussinesq, sa fiabilité et la précision de la méthode de la valeur crête couramment utilisée pour extraire les modules du sol. Ils proposent l'utilisation de la minimisation, basée sur l'algorithme des moindres carrés comme méthode alternative pour l'analyse des données et identification de la rigidité sous la forme d'un amortisseur de masse élastique équivalent, le comportement dynamique complexe du sol étant réduit à une onde viscoélastique unidimensionnelle.

► **Faiblesse de la modélisation statique**

Murillo et al. [MUR13] ont montré que les déflexions sous une charge statique sont plus élevées que celles générées par une charge dynamique. Les résultats obtenus sous charge statique ne représentent pas avec précision les effets d'une charge mobile. Les auteurs montrent néanmoins qu'il existe une corrélation entre les déflexions obtenues à partir de poutre Benkelman (statique) et FWD (dynamique).

De même, Ruta et al. [RUT15] ont montré une bonne correspondance entre les méthodes lors d'essais statiques mais pas lorsque les valeurs d'essais dynamiques (sous la forme des déplacements maximaux enregistrés par les géophones) ont été utilisées directement dans le processus d'identification. Des différences significatives entre les résultats dynamiques d'identification d'essai et les résultats d'identification en statique ont été trouvés. Les modules obtenus à partir d'un essai dynamique direct sont considérablement plus élevés (jusqu'à deux

fois plus élevés) que les modules obtenus à partir des déflexions quasi-statiques issues du bassin de déflexions, ce qui suggère une surévaluation de la capacité portante et la résistance à la fatigue de la chaussée. Stolle et al. [STO96] ont comparé des méthodes d'analyses inverses avec solution élastique et avec impédance dynamique. L'article démontre l'importance des effets dynamiques et l'influence de l'inertie dans la réponse FWD [STO95], amélioré dans le modèle dynamique par sa prise en compte via un facteur de correction. Les réponses de la chaussée provoquées par une charge en déplacement [WAN16] ont permis de conclure que les durées d'impulsion des contraintes de compression sont significativement affectées par la vitesse et la profondeur de la chaussée. Les résultats présentés soulignent que l'utilisation des chargements dynamiques impulsifs (FWD) pour prédire des réponses réalistes des chaussées sous chargement des véhicules à des vitesses importantes n'est pas recommandée. Le chargement peut également entraîner une plus grande erreur de calcul à des températures élevées ou des couches minces. Les auteurs préconisent de trouver une corrélation sur les vitesses équivalentes FWD/charge mobile.

6.2 Analyse dynamique basée sur la propagation d'ondes

► Méthodes semi-analytiques

Les méthodes semi-analytiques sont des approches intégrales alliant des développements théoriques conduisant à une solution analytique et un calcul numérique. Elles sont généralement utilisées pour l'étude de la propagation des ondes mécaniques dans un milieu continu. L'idée générale est de transformer les équations élastodynamiques (Navier ou Helmholtz) dans le domaine fréquentiel ou des nombres d'ondes, dans lequel le problème se réduit à un système d'équations différentielles, en utilisant la transformation de Fourier ou la transformation de Laplace. Après la résolution, le retour dans le domaine spatiotemporel est effectué numériquement par un algorithme de transformée de Fourier rapide inverse (IFFT). La plupart des modèles semi-analytiques ont été développés pour les applications ferroviaires ou sismiques et se limitent généralement à l'étude d'un massif semi-infini homogène [JON98], [LEF99], [CHA01]. Parmi les modèles qui traitent les systèmes multicouches, on peut citer les travaux de Picoux [PIC02] sur l'interaction voie ferrée / sol multicouche, les travaux de Duhamel qui prennent en compte le comportement thermoviscoélastique des enrobés bitumineux en utilisant le modèle de Huet-Sayegh [DUH03] et qui a servi de base pour le logiciel de calcul de chaussées VISCOROUTE, ainsi que les travaux de Picoux et al. [ELA12] pour la modélisation semi analytique de l'essai FWD sur chaussée multicouches.

Ahmed et Al [AHM16] développent un modèle semi analytique incrémental. Ils utilisent la méthode de Laplace et une correspondance « elastic – viscoelastic » nommé LVE Collocation. Ji et Al [JI06] proposent une approche simplifiée basée sur la méthode semi-analytique « spline » pour l'analyse visco-élastique de la réponse dynamique de la chaussée. La définition de fonctions de déplacement exprimées en tant que produit d'une fonction spline de base et d'une série de Fourier permet de ramener le problème en trois dimensions à un problème numérique unidimensionnel. Le rétrocalcul est réalisé dans le domaine temporel par une méthode d'identification du système. La technique de régularisation numérique, appelée SVD, est explorée pour assurer une meilleure stabilité de la procédure d'inversion dans les itérations. La solution est montrée comme rapidement convergente dans une large plage de valeurs initiales du module.

Avec l'approche de type semi-analytique, Feng et al. [FEN17] ont testé l'influence de la fréquence en fonction de la vitesse sur les déplacements verticaux, l'influence de la vitesse et de l'épaisseur de la couche et l'influence de la perméabilité dans un modèle poroélastique. De même, Hu et al. [HU16a], [HU16b] ont démontré l'intérêt d'un modèle poroélastique par une analyse paramétrique sur une charge roulante. Une comparaison entre chargement dynamique et charge roulante a également été faite. Lu et al. [LU16] ont testé l'effet de la vitesse du chargement. Ils montrent que la résonance du véhicule et du système de couplage route-sol se produit lorsque la fréquence de vibration du véhicule est proche de sa fréquence

naturelle. L'ampleur de la force dynamique est alors linéairement proportionnelle à l'irrégularité de la chaussée ce qui implique que les irrégularités de surface peuvent affecter les charges dynamiques. Ce résultat indique que la charge dynamique générée par les vibrations couplées du système chaussée - véhicule contribue de manière significative aux composantes de contraintes induites par le trafic et ne peut être négligée dans la prédiction des contraintes induites par le trafic.

Kim et al. [KIM07b] ont modélisé un essai LWD en dynamique (analytique) et réalisé une comparaison statique / dynamique pour arriver à une loi de régression.

Enfin, une mise en équation simple de la chute de masse et de la dynamique de la structure avec prise en compte des effets visqueux et dynamiques a été réalisé dans [KOP10] pour une comparaison entre FWD et PLT en laboratoire ainsi que des essais de modules de chaussée avec la méthode AASHTO, FDOT et FWD.

► Analyse dynamique basée sur la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (FEM) est une méthode basée sur la discrétisation spatiale des milieux continus en sous-domaines élémentaires de forme géométrique simple interconnectés en des points appelés nœuds. L'objectif est de chercher à approcher le champ de déplacements continus à partir de fonctions d'interpolation définies sur chaque domaine. L'assemblage des vecteurs des déplacements nodaux de chaque élément permet d'aboutir au système matriciel d'équations spatialement discrétisées intégrant les matrices masses, raideurs et amortissements du système. Ce système matriciel est résolu numériquement en utilisant soit une approche modale soit une approche temporelle.

L'approche modale est une approche qualitative dans le domaine fréquentiel. Le principe de la méthode consiste à déterminer les fréquences propres (valeurs propres) de vibration ainsi que les modes de déformées propres associés (vecteurs propres) qui s'obtiennent en cherchant la solution de la forme spectrale de l'équation de mouvement libre (non forcée) qui permet d'obtenir N équations différentielles scalaires découplées. Après résolution, la reconstruction de la solution est effectuée dans son espace d'origine. Cette méthode est surtout adaptée aux moyennes et basses fréquences à cause du nombre trop important de modes propres mis en jeu à hautes fréquences. Le modèle FEM de Dong et al. [DON02] utilise par exemple l'analyse modale et une méthode du vecteur de Ritz.

L'approche temporelle (pas à pas) est une approche quantitative dans le domaine temporel. Le principe de la méthode est basé sur la discrétisation des équations différentielles à partir de la technique d'intégration temporelle directe [GER92]. Parmi les schémas d'intégration numériques existants, la famille des schémas de Newmark [NEW59] sont les plus répandus dans les codes de calcul. Ces schémas permettent de calculer les déplacements et les vitesses à chaque pas de temps. Le choix d'une méthode de résolution est généralement dicté par le contenu fréquentiel du chargement appliqué qui fixe la taille du pas de temps. Les schémas précis au second ordre des différences centrées et de l'accélération moyenne sont privilégiés pour les faibles erreurs d'amplitude et de périodicité qu'ils engendrent. Le schéma des différences centrées est un schéma explicite, il est surtout adapté pour les chargements dynamiques rapides et la résolution des problèmes de propagation d'ondes, il a également été utilisé pour la modélisation de l'essai FWD par Gosk [GOS16].

Dans la modélisation FEM il est important de prendre garde aux modes propres de la structure d'où l'intérêt d'une étude modale préalable à la simulation [PAR98] et aux réflexions aux bords du maillage. Un maillage de grande taille est nécessaire, ou des frontières absorbantes [ELA10] ou encore des éléments infinis [XU14]

Dans la littérature, la majorité des modèles, développés pour étudier le comportement des structures multicouches puis adaptés aux chaussées souples, sont basés sur la méthode des éléments finis et d'approche élastique linéaire. Parmi les modèles qui considèrent le comportement complexe des matériaux viscoélastiques, on peut citer les travaux développés par [FIR05], [YIN07], [CHE02], [PAR01].

Les principaux logiciels utilisés en éléments finis sont ABAQUS [SEO09], LS dyna [UDD93], CAST3M [ELA10] [TAU16] utilisé pour modéliser l'essai dynamique FWD, et Cesar LCPC [BRO10] pour l'analyse des données dynamiques HWD.

► Analyse dynamique basée sur les éléments spectraux

Al-Khoury et al. [ALK01a] ont développé un modèle basé sur l'analyse spectrale comme moyen d'analyse du comportement dynamique des systèmes multi-couches à symétrie axiale soumis à une force transitoire. L'intérêt de la méthode est d'éviter les subdivisions en sous couches. En conséquence, la taille de la structure modélisée devient aussi grande que le nombre de couches impliquées. Ceci réduit considérablement les besoins en calcul et permet ainsi une utilisation efficace de la méthode dans des algorithmes itératifs pour résoudre des problèmes inverses. La procédure pour le calcul inverse [ALK01b] des paramètres du système est basée sur des comparaisons itératives des fonctions de transfert du système mesurées par rapport à celles théoriquement déterminées. La performance de trois algorithmes de minimisation est testée : mise à jour sémantique factorisée, Levenberg-Marquardt et Powell pour la résolution du système résultant d'équations non linéaires. Pour le problème multicouche, l'algorithme hybride de Powell présente de meilleures caractéristiques de stabilité et de convergence. La procédure inverse est utilisée pour la détermination des modules de couche de chaussée et des épaisseurs par l'utilisation de l'essai FWD. Les calculs montrent que la procédure développée est précise et efficace et suggèrent des modifications de la pratique standard des mesures et de l'instrumentation FWD.

Le problème de propagation des ondes dans les systèmes stratifiés viscoélastiques et l'identification de paramètres visqueux à partir de tests dynamiques non destructifs est étudié dans [ALK02a]. Une méthodologie qui combine la technique de l'élément spectral, pour la simulation de propagation d'onde, avec la technique de l'opérateur différentiel, pour la relation tension-déformation dans les matériaux viscoélastiques est adoptée. La compatibilité entre les deux techniques découle du fait que les deux peuvent être traitées dans le domaine fréquentiel, ce qui permet naturellement l'adoption d'une superposition de Fourier. La formulation mathématique des éléments spectraux pour le modèle de matériau viscoélastique de Burger est mise en évidence. De plus, une procédure inverse pour l'identification des modules de Young et des modules complexes pour les systèmes de couches est décrite. Il est démontré que la méthodologie proposée permet de remplacer une procédure coûteuse d'essai en laboratoire pour la détermination de modules complexes matériels avec des essais dynamiques non destructifs.

Dans [ALK02b] la théorie de Biot sur la propagation des ondes élastiques dans un solide poreux saturé de fluide avec la technique de l'élément spectral est traitée. Le domaine spatial de l'élément dans la direction verticale est supposé s'étendre à l'infini. Les auteurs présentent un exemple de l'utilisation de l'élément développé pour l'identification de paramètres de couches de chaussée par l'utilisation d'un test FWD. En conséquence, l'utilisation de la technique des éléments spectraux est en effet efficace comme moyen d'analyse du comportement dynamique de systèmes multicouches axisymétriques constitués de couches de matériaux homogènes et non homogènes et soumis à une force transitoire [ALK07]. La solution générale des équations d'ondes et le problème de la valeur limite sont obtenus par triple sommation sur des séries de Fourier, Fourier-Bessel et Frobenius rapides. Grenier [GRE09a] utilise également cette méthode avec la prise en compte du modèle de Huet Sayet et l'effet de la température. [KIM07a] et [YUS15] traitent des ondes de surface par l'analyse spectrale utilisée comme une technique alternative à l'évaluation de la chaussée et le suivi basé sur des essais non destructifs dynamiques utilisant la technique de la transformée de Fourier rapide et le spectre de phase pour mesurer le déphasage entre chaque récepteur. La corrélation entre le module de l'analyse spectrale des ondes de surface (SASW) et du déflectomètre FWD a été jugée significative avec $R^2 > 0,98$. L'analyse spectrale appliquée à la méthode de propagation de l'onde de surface est donc capable de caractériser la rigidité in situ en termes de module élastique, de vitesse de l'onde de cisaillement et du rapport d'amortissement pour la structure de la sous-couche de chaussée.

7 Les programmes d'analyse inverse appliqués au FWD

Les mesures de déflexion fournies par le FWD servent de base à une évaluation de la capacité portante de la structure auscultée. Le calcul se base généralement sur une approche d'analyse inverse à l'aide d'un modèle mécanique de la chaussée. L'analyse (ou calcul) inverse est le terme utilisé pour désigner un processus par lequel les propriétés des matériaux tels que les modules d'élasticité, coefficients de Poisson et les épaisseurs des couches sont estimés à partir des mesures de déflexion de la surface de chaussée [GOP09].

L'estimation rapide et précise des modules des couches par analyse inverse est un problème complexe. En effet, en plus du modèle utilisé pour calculer les déflexions qui peut prendre en compte le comportement réel des différents matériaux tels que la non linéarité du sol et la viscoélasticité des enrobés, le principal problème se situe au niveau du processus d'optimisation utilisé. Dans les programmes d'analyse inverse standards, ce processus utilise généralement soit un algorithme classique d'identification des paramètres (algorithme linéaire ou non des moindres carrés, algorithme de Gauss-Newton, etc.), soit un algorithme de recherche dans une base de données [BUR06]. Cependant, ce dernier présente plusieurs inconvénients : le nombre de paramètres à gérer est limité, la convergence de la solution dépend parfois des modules initiaux, la solution peut converger vers un point optimal local ce qui fausse les résultats, l'estimation précise des modules est souvent longue et fastidieuse. Pour calculer les modules à partir des mesures FWD, deux approches différentes d'analyse inverse peuvent être utilisées : statique ou dynamique (cf. Fig 19 et 20).

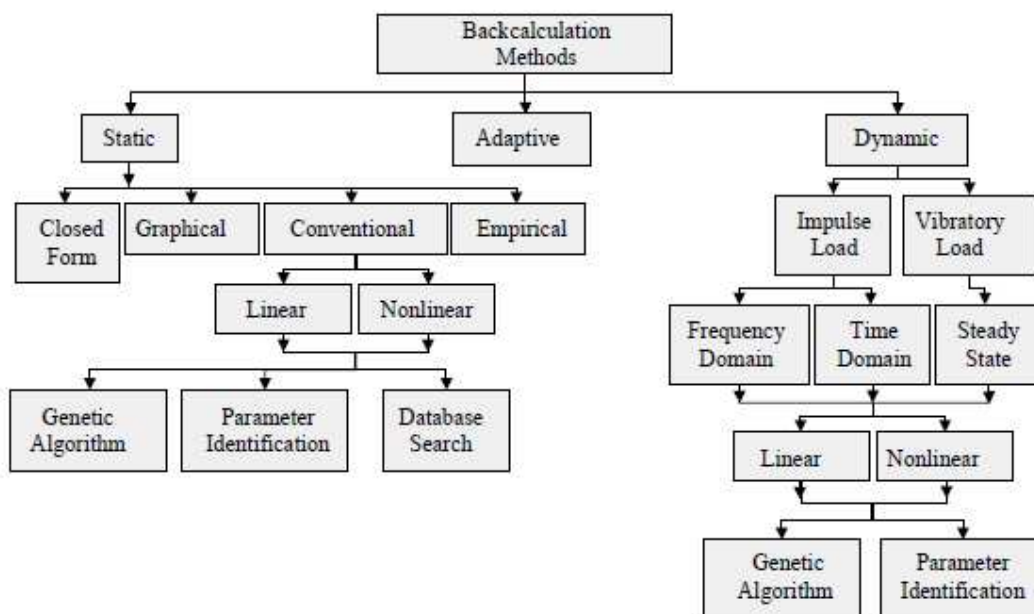


Figure 19 : Schéma classique d'analyse inverse [BUR06]

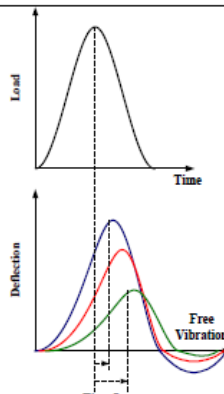
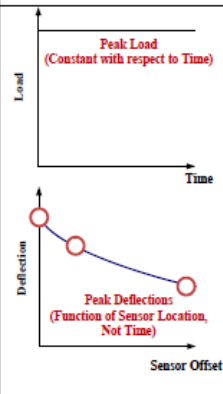
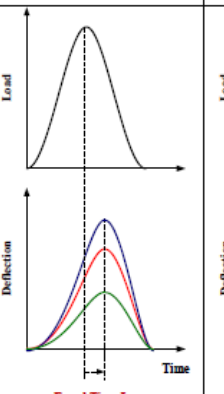
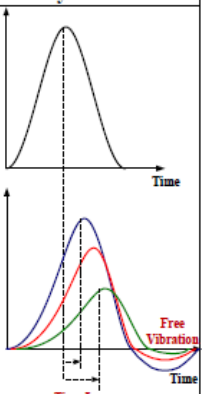
Description	Measured FWD Data	Type of Mechanistic Model (Forward Solution)		
		Static	Viscoelastic	Dynamic
Schematics				
Model Efficiency	Not applicable	Extremely efficient	Efficient	Inefficient
Material Time-Dependency	Present due to viscoelastic AC	Not considered	Considered	Considered
Inertial, Dynamic Effects	Present due to impact load	Not considered	Not considered	Considered
Deflection Time Lags	Different for each sensor	Not considered	Equal time lag for all sensors	Considered (Different for each sensor)
Free Vibration	Present depending on pavement structure	Not considered	Not considered	Considered

Figure 20 : Présentation des différents modèles [LEE16a]

► Approche statique

Dans le processus de rétrocalcul effectué par des données de chargement statique, seule l'application de la charge maximale est utilisée en raison de l'hypothèse du matériau élastique linéaire. Par conséquent, les niveaux de chargement ne sont pas pris en compte dans le comportement de matériau statique et dans le modèle de réponse de chaussée. Afin de calculer des valeurs de déflexion plus proche de la réalité, il est souvent nécessaire de considérer la non-linéarité du comportement du matériau. De nombreuses études ont porté sur ce type d'inversion, c'est le cas de Mamlouk [MAM03], Stolle [STO89], Ong et Al. [ONS90], Meier [MEI94], Foinquinos [FOI95]. Noredin et Al. [NOR93] réalisent un calcul inverse des modules et des épaisseurs pour un essai FWD à partir de scénarii d'estimation des déflexions et des rayons de courbures (sans modèle numérique). Chatti et Al. [CHA93] utilisent le bassin de déflexion en conjonction avec les décalages temporels entre la charge et la déflexion pour les instants du signal réponse où les valeurs sont maximales. Cai et al. [CAI15a] présentent une méthode par identification de système nommé SID, [CAI15b] pour inversion du module des couches. Cette méthode est basée sur le développement en série de Taylor d'une fonction non périodique combinée avec un schéma itératif. Dans le processus SID inverse, les déflexions au niveau des neuf capteurs mesurés par le FWD sont utilisées comme entrées pour les modules retrocalculés dans chaque couche de la chaussée. Les modules ajustés sont alors obtenus par le biais d'un processus itératif et contrôlé par une équation sur l'erreur relative (procédure de minimisation). Le guide américain de conception des chaussées (MEPDG) [ARA04] et la méthode française [LCP94] utilisent l'analyse élastique linéaire mais prennent en compte indirectement la viscoélasticité linéaire et l'élasticité non linéaire des matériaux.

► Approche dynamique

L'utilisation des méthodes classiques utilisant l'approche élastostatique pour l'analyse de l'essai FWD conduit forcément à des erreurs systématiques dans l'estimation des modules des matériaux de la chaussée vu les caractéristiques dynamiques de l'essai. Dans

ce cas, l'utilisation d'une approche d'analyse dynamique paraît plus appropriée pour plusieurs raisons :

- contrairement à l'analyse statique, l'analyse dynamique peut utiliser tout l'historique de déflexion ce qui permet d'avoir plus d'informations, la rendant plus précise,
- elle est physiquement plus réaliste, parce qu'elle prend en compte les phénomènes transitoires de propagation des ondes dans les couches de la chaussée,
- les propriétés viscoélastiques des enrobés bitumineux peuvent être caractérisées par des fonctions de fluage dans le temps ou par le module complexe dans le domaine des fréquences alors que l'analyse statique est limitée à l'élasticité,
- une meilleure compréhension physique de la chaussée peut être obtenue par l'analyse dynamique comme la présence d'une couche rocheuse, la réponse modale, les réflexions et réfractions entre les couches, etc.

Dans le cas d'un rétrocalcul dynamique, tout ou partie des données de l'historique de déflexions sont utilisées. Pour optimiser les temps de calcul, les modèles développés se sont limités à certaines observations caractéristiques. C'est le cas de Matsui et Al. [MKNK00] ou Dong et Al. [DON02a], [DON02b] qui utilisent une dizaine de points sur les historiques de déflexion réparties autour de la déflexion maximale et dans un intervalle de 18 ms. Uzan [UZA94b] considère 75 observations réparties sur les historiques de déflexion par pas de 0.8 ms entre 0 et 60 ms. Dans le domaine fréquentiel (cf. Fig 21), ce sont toutes les composantes harmoniques de la décomposition spectrale des signaux de l'essai FWD qui doivent être observées. Elles sont comprises sur une plage de fréquence allant de 0 à 150 Hz environ, selon les conditions d'essais. Magnusson et al. [MAG90] utilisent une à trois fréquences. Stubbs et al. [STLM94] ont pris la fréquence de 48.89 Hz. Kang [KAN98] a retenu soit 8 et 25 Hz soit 1 et 2.5 Hz ou encore 1, 2.5 et 5 Hz. Losa [LOS02] a utilisé 0.1 et 60 Hz. Al-Khoury et al. [ALK01c] choisissent 12 fréquences réparties entre 15 et 40 Hz jusqu'à 20 fréquences tandis que Uzan [UZA94b] en utilise 13, réparties entre 9.8 et 127.1Hz.

Cependant, ces procédures sont aujourd'hui limitées par la complexité et les temps de calcul, le schéma de minimisation des erreurs qui peut tomber dans un minimum local (qui peut ne pas être le minimum absolu) et l'unicité de la solution qui dépend du nombre de paramètres inconnus et de la corrélation entre ces paramètres [GOK06], [GRE09].

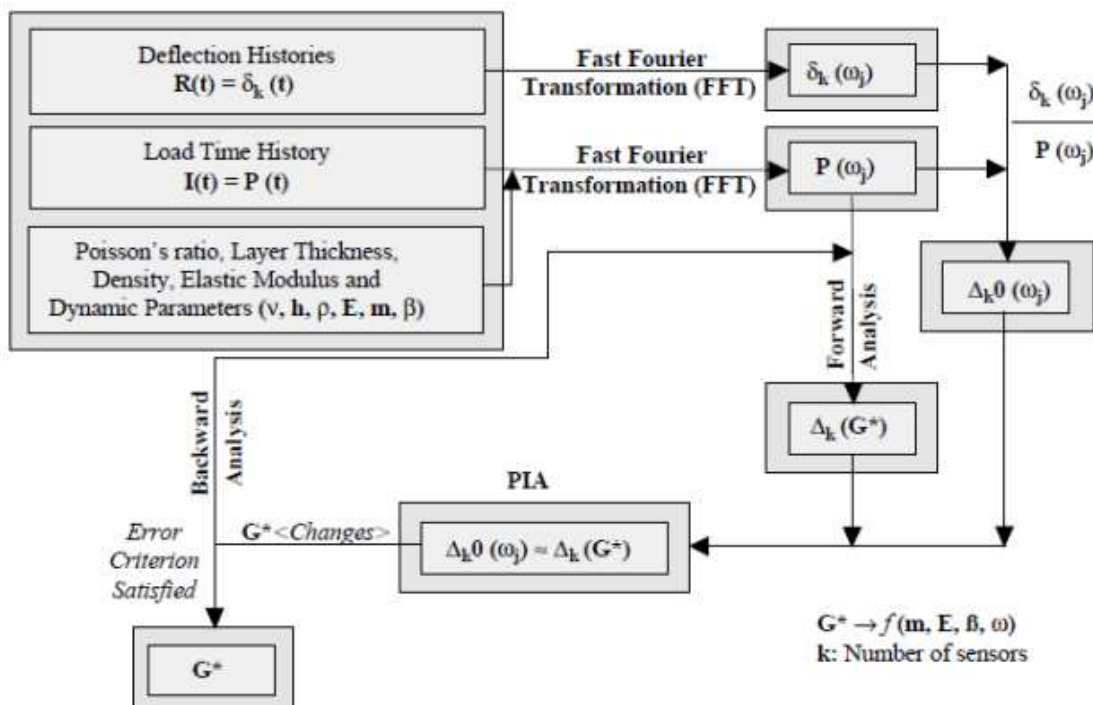


Figure 21 : Schéma d'analyse inverse dynamique utilisant une analyse fréquentielle [GOK06]

► Techniques utilisées pour l'analyse inverse

Différentes méthodes de minimisation ont été proposées pour l'analyse des essais FWD. Les techniques d'inversion peuvent se résumer en trois catégories [ZX03] :

- Méthodes itératives de Newton de minimisation non linéaire. Elles calculent le gradient donné par le Jacobien pour minimiser la fonction objective des moindres carrés en ajustant, de façon itérative, les paramètres inconnus tels que les modules élastiques des couches mais aussi la profondeur du roc. Cette technique est utilisée de façon simplifiée pour une analyse inverse (et un calcul direct) par un modèle de poutre et une résolution énergétique par le principe de Hamilton [LIA98].

- Techniques de recherche dans des bases de données. Elles consistent à générer, pour une charge donnée, un ensemble de bassins de déflexion à partir de modules élastiques des couches de matériaux compris dans la plage des valeurs attendues. Lorsque la base de données est complétée, un algorithme de recherche de "patron" est utilisé pour déterminer les bassins de déflexion théoriques s'approchant de celui mesuré et ainsi d'obtenir par interpolation l'ensemble des modules d'Young équivalents les plus appropriés. Saltan et al. [SAL11], par exemple, présentent une méthode de data mining (statistiques sur base de données) et réalisent de nombreux tests en utilisant plusieurs méthodes de recherche (régression linéaire, NN, KStar, M5rule, Table de decision, M5P).

- Méthodes d'intelligence artificielle et de réseaux de neurones. Parmi ces méthodes on peut citer les algorithmes génétiques (GA : genetic algorithms) [ZHA98] [RED02], les réseaux de neurones artificiels (ANN : artificial neural networks) [MEI95],[SAL04], [SAL08], [SHA08], et les neuro-floues ou systèmes basés sur la logique floue [SAL07] [KAU99].

L'algorithme génétique peut être utilisé pour optimiser le domaine de recherche de l'analyse inverse [GOK06]. Fwa et al. [FWA97] ont développé un programme basé sur les algorithmes génétiques et le comparent à quatre autres programmes de rétrocalcul non génétiques. Les avantages de cette méthode sont la capacité d'éviter les optima locaux dans la procédure et l'élimination de la dépendance de la solution sur les valeurs d'entrée. Les paramètres GA optimaux pour le rétrocalcul des modules de couche de chaussée ont été estimés par Reddy et al. [RED04] en fonction du niveau de précision souhaité et de l'effort de calcul correspondant.

Les modèles ANN utilisent des réseaux de neurones artificiels ou des algorithmes génétiques (comme dans [TAN13] pour une application au LWD) pour identifier les paramètres inconnus du système. Ils permettent d'établir les corrélations entre les variables d'entrée X_i et les variables de sortie Y_j à travers les neurones interconnectés (via des facteurs de poids w_{ji}). Dans le cas des chaussées, les variables de sortie Y_j représentent les réactions de chaussée calculées, la sélection des paramètres d'entrée X_i est basée sur l'analyse de sensibilité des modèles d'éléments finis développés.

Dans ces méthodes, un neurone artificiel reçoit des informations d'autres neurones, les traite, puis relaie le signal filtré aux autres neurones. Le neurone reçoit des signaux entrants, in_1, in_2, \dots, in_n . A chacun est attribué un poids, qui est donné en fonction de l'expérience et qui peut changer pendant le processus de formation des autres. La somme de tous les signaux pondérés donne l'entrée combinée I_k . La quantité d'entrée combinée, I_k , est ensuite envoyée via une fonction de transfert présélectionnée (parfois appelée fonction d'activation), à la sortie du neurone artificiel. Le processus peut être écrit sous la forme des équations suivantes [GOP11] :

$$I_k = \sum_{i=1}^n w_{ik} in_i$$

Plusieurs types de fonctions de transfert peuvent être utilisées, y compris les fonctions sigmoïde, seuil et gaussienne. La fonction de transfert utilisée le plus souvent est la fonction sigmoïde représentée par l'équation suivante :

$$T(I) = \frac{1}{1 + e^{-\phi I}}$$

où ϕ est une constante de mise à l'échelle positive, qui contrôle la pente entre les deux valeurs asymptotiques, 0 et 1. L'algorithme d'apprentissage est l'algorithme de formation le plus utilisé dans lequel le réseau apprend la relation entre les paires de données entrées-sorties. La convergence est assurée par la formulation des moindres carrés représentée par une erreur moyenne carrée (MSE) comme suit :

$$MSE = \frac{1}{MP} \sum_{1}^p \sum_{k=1}^m (d_k - y_k)^2$$

où y_k et d_k sont des sorties réelles et souhaitées, respectivement, M est le nombre de neurones dans la couche de sortie et P représente le nombre total de modèles. D'autres mesures de performance, telles que l'erreur de cross-entropy (CE), moindre carrée (RMSE), erreur moyenne absolue (AAE), etc. peuvent être également utilisées.

L'utilisation d'algorithmes génétiques pour un recalage en analyse inverse est effectuée dans [CEY14]. Un modèle multicouche viscoélastique (cf. Fig 22) est utilisé pour générer une base de données de courbes maîtresses.

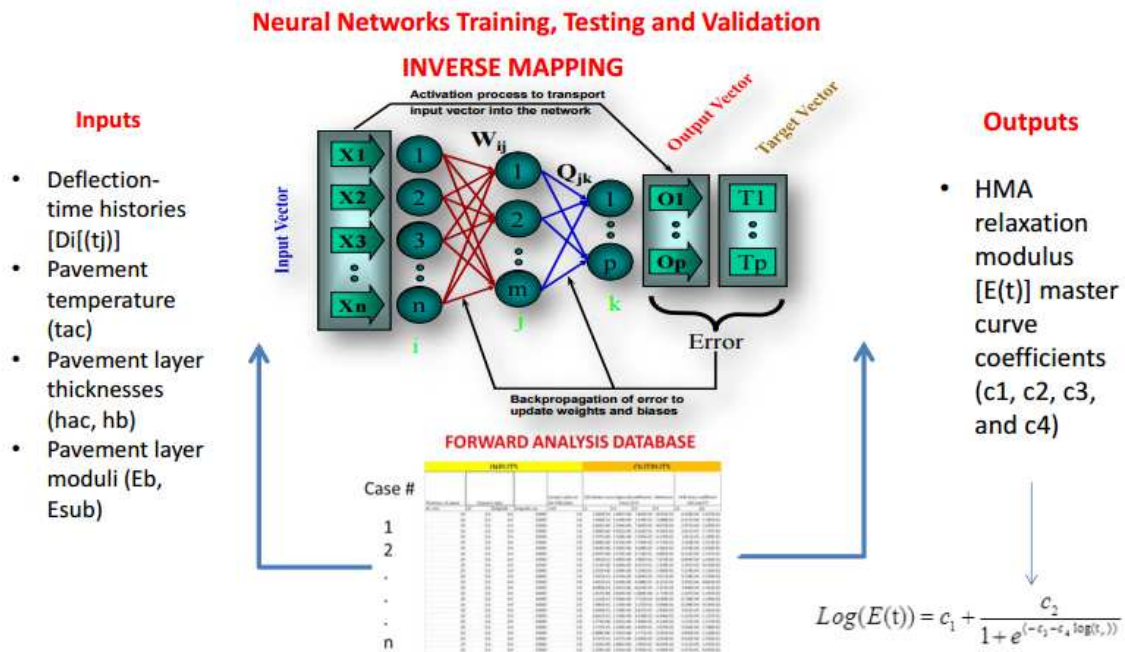


Figure 22 : Schéma d'un procédé d'analyse par réseau de neurones pour la reconstruction de la courbe maîtresse à l'aide d'un essai FWD (d'après [CEY14])

Différents scénarii sont établis en fonction de la température et de l'épaisseur des couches par un calcul direct puis utilisés dans un calcul inverse. Cette technique a également été utilisée pour analyser les résultats d'un essai FWD sur structure de chaussée rigide [SUL11] et notamment pour rétrocalculer le module élastique. Gu et al. [GU17] utilisent l'approche ANN pour prédire les réponses critiques des structures renforcées par géogrille. Les paramètres d'entrée identifiés pour le modèle ANN comprennent l'épaisseur de la couche, le module de la couche, la rigidité de la géogrille et son emplacement. Une architecture de réseau neuronal à trois couches consistant en une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie a été construite. Les paramètres d'entrée sont répertoriés à l'exception de l'emplacement de la géogrille. Dans cette étude, la couche cachée a reçu 20 neurones pour établir la connexion

entre la couche de sortie et la couche d'entrée. L'algorithme de génération utilise la méthode inverse de propagation Levenberg-Marquardt pour minimiser l'erreur quadratique moyenne. Une fonction pondérée en gradient a été utilisée comme algorithme d'apprentissage pour ajuster les facteurs de poids w_{ji} . La base de données de réponse a d'abord été répartie de manière aléatoire dans un ensemble de données d'apprentissage (80%) et un ensemble de données de validation (20%). L'ensemble des données d'apprentissage a été utilisé pour déterminer les facteurs de poids w_{ji} et l'ensemble des données de validation a été utilisé pour examiner la précision de prédiction du réseau de neurones développé.

Gopalakrishnan et al. [GOP10] développent une méthode dite de l'adaptation de la matrice de covariance couplée à une méthode de réseau de neurones pour l'analyse inverse (CMANIA) permettant de limiter les problèmes de divergence des autres méthodes et donc limitant le besoin d'info sur le nombre de couche et l'épaisseur. Le modèle est 2D axisymétrique non-linéaire et dispose d'une base de données intégrée avec nombreux scénari précalculés. Gopalakrishnan [GOP09] réalise une analyse de la chaussée combinant modélisation aux éléments finis, réseaux de neurones et algorithmes génétiques. Gonzales et al. [GON14] proposent un modèle visco-élastique avec variables de viscosité indexées sur un modèle de Kelvin-Voight et une analyse inverse dynamique intégrant les réseaux de neurones. Plus récemment Li et al. [LI17] ont développé un programme d'analyse inverse basé sur la méthode ANN combinée à un algorithme d'optimisation de l'algorithme génétique (GA). Le programme utilise la méthode des éléments finis axisymétriques dynamiques et les paramètres viscoélastiques des matériaux bitumineux et non-linéaires des couches non liés. Le modèle aux éléments finis est utilisé pour générer la base de données synthétique qui couvre les variations des paramètres du matériau, de la structure, des températures et des niveaux de chargement pour utilisation dans l'algorithme ANN-GA.

► Les programmes développés

Utilisant ces techniques, plusieurs programmes d'analyse inverse ont été développés depuis le développement du FWD pour une exploitation rapide des mesures de déflexion, nous listons ci-dessous l'ensemble des programmes d'analyse inverse existants, par ordre alphabétique de leur nom.

BACKCAL

Issu d'une étude GPR-FWD [NOR03] montrant l'utilité et la nécessité de combiner les deux techniques, l'auteur présente une technique d'analyse inverse BACKCAL permettant de rétrocalculer les modules et les épaisseurs pour s'affranchir du radar. Les résultats montrent que les résultats GPR sont un peu sous-estimés par rapport à ceux du FWD.

BACKFAA

Développé en Visual Basic par l'Administration Fédérale de l'Aviation américaine (FAA), BAKFAA est basé sur une analyse élastique multicouches qui utilise la méthode de minimisation du simplex (méthode souvent appropriée pour trouver la valeur minimale d'une fonction de plus d'une variable indépendante) à plusieurs dimensions et un processus de minimisation pour l'analyse inverse. BAKFAA peut analyser une chaussée ayant dix couches mais ne peut pas calculer la profondeur de la couche rigide et ne tient pas compte de l'effet de la température dans le calcul du module. [TAR13].

BACKGENETIC 3D

BackGenetic3D [SAN14] est un programme développé par le groupe de l'Université d'Akron qui utilise une GA améliorée et le programme multi-Smart3D efficace et précis pour corriger l'épaisseur ainsi que les modules de couche de toute structure de chaussée. Il n'y a aucune restriction sur le nombre de couches, l'épaisseur, l'emplacement des points de réponse, le nombre de cercles de chargement, la forme de la zone de chargement et le type de chargement appliqué.

BACKLAVAN

Un modèle viscoélastique non-linéaire (appelé LAVAN) a été utilisé [VAR15] pour élaborer un système de rétrocalcul basé sur un algorithme génétique (appelé BACKLAVAN). LAVAN peut considérer à la fois le comportement viscoélastique du béton bitumineux et le comportement élastique non-linéaire de couches non liées. L'algorithme de BACKLAVAN utilise l'historique des données FWD à différentes températures d'essai. Une comparaison entre les résultats rétrocalculés et mesurés indique qu'il devrait être possible de déduire les propriétés viscoélastiques linéaires, ainsi que des propriétés élastiques non-linéaires des couches non liées à partir des essais FWD. Toutefois, en cas de présence d'effets dynamiques considérables dans les données FWD (par exemple rochers peu profonds, réflexions), l'algorithme BACKLAVAN ne donne pas de résultat acceptable.

BISAR 3.0

Basé sur Microsoft Windows, BISAR a été développé par la société Shell et utilise la théorie de Burmister. Il peut traiter jusqu'à dix couches. Les interfaces entre les couches peuvent être spécifiées en utilisant le concept de raideur de cisaillement. En plus des charges verticales, il permet la prise en compte de forces horizontales. BISAR a été utilisé en partie par [NEG16] lors d'une analyse dynamique du FWD et une estimation des modules de couches par algorithmes d'interprétation du bassin.

BKGREEN

Basé sur la méthode des couches minces, l'utilisation des fonctions de Green et la méthode itérative de Levenberg-Marquardt [KAN98], BKGREEN réalise une inversion dans le domaine fréquentiel.

BOUSDEF

Le programme BOUSDEF utilise la théorie des épaisseurs équivalentes, la théorie de Boussinesq, et la prise en compte de la non-linéarité des matériaux de chaussée [ZHO92].

CAPA3D

Le modèle CAPA3D utilise MODCOMP et FEBack [HIL02] pour l'analyse inverse des données FWD d'une charge dynamique sur massif non linéaire. Ce modèle permet une meilleure prédiction des composantes de déformation.

CMANIA

CMANIA est une stratégie hybride qui intègre la stratégie d'évolution de la matrice de covariance en élément fini avec un mappage non linéaire de réseaux neuronaux pour le calcul inverse non-linéaire. Les résultats [GOP10] démontrent la supériorité de cette méthode en termes de précision, une meilleure vitesse de calcul et une robustesse pour prédire les modules de couches de chaussée par rapport aux méthodes conventionnelles.

COMDEF

Développé par Anderson [AND89] pour déterminer les modules élastiques des couches d'une structure de chaussée, il utilise une base de données de bassins des déflexions générées par CHEVRON. Son point faible est qu'il est incapable de traiter des problèmes dans le cas de faibles déflexions ou lors de la présence de couches de faibles épaisseurs.

DIPLOMAT

Programme [KHA95] basé sur la théorie élastique stratifiée de Burmister étendue pour accueillir le chargement d'un système de chaussée multicouches incorporant une séquence arbitraire de plaques élastiques en plus des couches isotropes, il permet des chargements à plusieurs roues et peut être utilisé pour étudier les effets d'une variété d'interfaces et de conditions aux limites, y compris celle d'une base rigide.

DYNABACK

Méthode itérative de Newton-Raphson avec inversion dans les domaines des fréquences et du temps [CHA03]. Une version récente a été utilisée pour estimer et tenter de reconstruire la courbe maîtresse du matériau en utilisant des essais FWD [ZAA14]. Cette version viscoélastique nommée DYNABACK VE intègre les séries de Prony avec 14 coefficients pour construire la courbe maîtresse dans le domaine de Laplace.

DYNAMIC

Ce programme d'inversion dans le domaine temporel utilise la méthode itérative des couches minces [MAM85], [SH89] [KAU82].

DYNAPAV-UL

Il s'agit d'une méthode robuste de calcul inverse utilisant une technique itérative de minimisation de Levenberg-Marquardt [Gre08], [GRE09b] et les éléments spectraux. Le programme dynapav-ul/ucode est basé sur 20 observations sur le signal dynamique et une minimisation du RMS. Les auteurs montrent une différence jusqu'à 60% sur le calcul des modules entre une méthode statique et dynamique. En revanche l'analyse inverse n'est faite que sur les modules (pas de prise en compte de la variation de température mais amortissement hystérétique avec des valeurs comprises entre 1 et 5%).

DYN-BAL

Issu de la modification du rétrocalcul statique de BALMAT [SEO09], la procédure est utilisée pour examiner les effets dynamiques de l'essai FWD par la conversion dynamique en déviation de surface pseudo-statique en utilisant un facteur de correction.

ELMOD

Il s'agit d'un programme développé à l'origine par Ullitz [ULL87], qui utilise le modèle de Boussinesq-Odemark basé sur l'hypothèse de l'épaisseur équivalente et une procédure itérative pour déterminer les modules des couches. Il propose une technique d'analyse particulière [DYN10] en considérant d'abord l'effet d'une couche rigide par détermination de sa profondeur à l'aide des déflexions mesurées avant l'analyse des différentes couches. Il tient compte du comportement non linéaire du sol par un rapport simplifié qui capture les aspects les plus importants de la non-linéarité. ELMOD est plus efficace lorsque la rigidité des matériaux de la chaussée diminue avec la profondeur, et l'épaisseur de la couche de surface est supérieure à 75 mm. Ce programme est plus rapide que ceux basés sur la théorie multicouche élastique et permet de traiter jusqu'à 4 couches (sans couche rigide).

Goyer [GOY15a] montre que l'utilisation de ELMOD s'avère limitée à 3 couches en dépit de trop de paramètres à déterminer. La principale limite à la détermination des modules des couches par rétrocalcul est alors que plusieurs structures de chaussées et donc différentes combinaisons de modules peuvent entraîner le même bassin de déflexion. L'utilisateur peut néanmoins affiner le calcul en spécifiant des limites acceptables pour les valeurs de rigidité pour le processus itératif.

ELSYM5

Initialement développé à l'Université de Berkeley par Kopperman et al. [KOP86], il s'agit d'un logiciel qui ne prend en compte que les propriétés élastiques linéaires des matériaux et peut seulement gérer jusqu'à cinq couches.

EVERCALC

Développé par Mahoney et al. [MAH89], il est basé sur l'approche multicouche élastique, il utilise un algorithme itératif de Gauss-Newton modifié comme processus d'optimisation qui ajuste les modules élastiques pour retrouver le bassin de déflexion mesuré. Ce programme permet la détection de la couche rigide et l'évaluation de sa profondeur à l'aide du bassin de déflexion ([TUR04], [ZHA15]). Il peut traiter 3 couches (sans couche rigide), 12 lâchés par station avec 10 mesures par lâché (10 géophones). Dans le cas de mesures avec plusieurs

niveaux de chargement, EVERCALC détermine des coefficients de sensibilité des déflexions par rapport aux niveaux des contraintes. La fiabilité est testée par Tarefder [TAR13] et s'avère plus fiable pour l'analyse inverse que d'autres programmes testés : MODULUS, KENLAYER et BACKFAA.

EVERSTRESS 5.0

Le logiciel a été développé par le Département des Transports de l'Etat de Washington. Il peut gérer jusqu'à cinq couches et peut considérer les caractéristiques des matériaux de chaussée non liés. L'interface entre les différentes couches peut être spécifiée non liées ou entièrement liées.

FEDPAN

Ce modèle intègre les éléments finis SAP IV [ONG90], une méthode itérative de type Newton-Raphson et une inversion dans le domaine temporel.

FWD-DYN

Méthode des couches minces [FOI95] avec un processus itératif de Newton-Raphson et une inversion dans le domaine temporel.

ILLI-PAVE

Bayrak et al. [BAY05] utilisent la méthode de réseaux neuronaux appliquée aux essais FWD avec prise en compte d'un modèle Kteta pour les matériaux non-linéaires et réalisent des tests sur 6 chaussées différentes pour démontrer l'importance du modèle non linéaire sur le calcul inverse. Dans l'analyse ILLI-PAVE [GOP02], les déflexions du FWD sont utilisées pour prédire le module de sous-couche en utilisant les équations pour les chaussées classiques. La méthode est comparée à la méthode AASHTO dans [SAR16] avec des essais sur 10 sections différentes pour déduire une méthode semi-empirique applicable à des cas de chaussées standards.

INTPAVE

Le programme est basé sur un modèle non-linéaire pour milieu granulaire [TIR14] avec calcul du module résilient MR pour le comportement non-linéaire des matériaux granulaires ainsi que réseaux de neurones ANN pour l'analyse des résultats. L'auteur démontre l'importance de la prise en compte des non-linéarités dans la réponse par rapport à un modèle linéaire élastique.

ISSEM4

Conçu pour évaluer uniquement les données du Dynatest FWD, ISSEM4 [DYN88] applique des relations non-linéaires dans le volume d'influence conique de la charge FWD. Les algorithmes du processus sont basés sur les équations de Boussinesq et une version de la méthode de l'épaisseur équivalente. ELSYM5 est utilisé comme sous-programme pour ajuster les modules de sous-couche jusqu'à l'apparition d'une correspondance de déviations mesurées et calculées. ISSEM4 fournit diverses options d'analyse ou "identificateurs de mode d'itération" qui comprennent la fixation du module de la couche de surface et le calcul de l'épaisseur de cette couche. Des itérations multiples sont effectuées par le programme jusqu'à ce que le pourcentage de différence entre les valeurs de module de couche entre deux itérations consécutives soit inférieur à 3,5 %.

KENLAYER

Ce programme de calcul inverse a été développé par Huang [HUA93]. Basé sur la théorie multicouche élastique, il permet de déterminer les modules des couches des chaussées souples en tenant compte de la viscoélasticité et de la non-linéarité des différentes couches. La particularité de ce programme réside dans la possibilité de l'utiliser pour l'analyse d'endommagement (fissuration par fatigue, orniérage).

KENPAVE

Développé par Huang [HU93], il combine kenlayer pour chaussées souples et Kenslabs pour les chaussées rigides. Ce logiciel permet l'utilisation d'un modèle élastique linéaire, non-linéaire, et viscoélastique des matériaux pour les différentes couches. Le logiciel peut gérer jusqu'à 19 couches et permet d'intégrer des défauts. L'interface entre les différentes couches peut être spécifiée comme présentant des matériaux non liés ou entièrement liés.

LAMDA

Lié à la méthode des éléments spectraux [ALK01], LAMDA peut utiliser trois méthodes itératives (Factored secant update algorithm, Levenberg-Marquardt modifiée, algorithme hybride de Powell) avec inversion dans le domaine des fréquences.

MICHBACK

MICHBACK [HAR90] est un programme basé sur une méthode de Newton modifiée pour le calcul des modules de couche de chaussées souples et composites, des épaisseurs et la profondeur de la couche rigide. La procédure est itérative, nécessitant plusieurs calculs au préalable. MICHBACK Version 1.0 a été utilisé par le dispositif KUAB FWD. Dans la méthode Newton modifiée, une matrice dégradée est utilisée pour déterminer comment modifier l'estimation actuelle des modules de couches (et éventuellement une épaisseur de couche).

MODULUS

Développé par Uzan [UZA89], ce programme utilise un modèle élastique linéaire pour produire une base de données de bassins de déflexions qui sont comparés aux déflexions mesurées. Un calcul préalable, établissant une base de données de déflexions, permet une convergence de la réponse plus rapide [MIC95]. Pour déterminer les modules des différentes couches, une fonction objective qui représente l'erreur doit être réduite au minimum. Le programme peut être utilisé pour la détection de la couche rigide, la détermination de l'influence de chaque couche et l'estimation du nombre optimal de capteurs à utiliser pour l'analyse [BEN97]. Le nombre d'inconnues est limité à 4 couches afin de minimiser les erreurs d'interpolation.

MODCOMP

Développé par Irwin [IRW92], il utilise le programme CHEVRON basé sur la théorie multicouche élastique. Il a la possibilité d'employer un certain nombre de rapports non-linéaires pour calculer les déflexions. Ce programme utilise une approche d'analyse itérative qui fait varier les modules pour retrouver les déflexions mesurées. Il commence par évaluer la couche inférieure puis remonte jusqu'à la couche de surface et peut gérer de deux à quinze couches (avec seulement 5 inconnues). Malgré quelques problèmes de stabilité dans certains cas et des modules extrêmes (tel qu'un module du sol élevé alors que le module d'une couche granulaire intermédiaire est faible), sa rapidité de convergence lui permet d'analyser de grandes quantités de données dans un délai raisonnable [BEN97].

MNLAYER

Développé par Khazanovich et al [KHA07], MnLayer est basé sur la solution de Burmister et la transformée inverse de Hankel des solutions élastiques du massif multicouche. MnLayer est capable d'analyser un système multicouche avec plus de 20 couches.

PAV-SID

Méthode itérative de type Newton-Raphson avec inversion dans le domaine des fréquences [UZA94a], [UZA94b] grâce à l'utilisation de la théorie des réseaux de neurones [MEI94]

PAVANN

Développé dans l'environnement Visual Basic et la méthode ANN par Ghanizadeh et al [GHA15], il permet grâce à une base de données complète d'essais incluse dans le programme de calculer très rapidement les réponses critiques d'une chaussée, y compris la

contrainte de traction principale horizontale maximale au fond de la couche de béton bitumineux et la contrainte de compression maximale sur le dessus de la sous-couche.

SDUFEM

Modélisation basée sur un modèle éléments finis et un réseau de neurones [SAL99], [SAL06].

WESDEF

Ce programme a été développé par l'armée américaine [VAN89] et permet de traiter jusqu'à 5 couches. Sa particularité réside dans le fait qu'il inclut automatiquement une couche rigide semi-infinie dans l'analyse (avec un module de 7 GPa) ainsi que la possibilité de considérer différentes conditions d'interface.

8 Etude de sensibilité des paramètres physiques et mécaniques

Les mesures FWD sont sensibles à de nombreux paramètres physiques et mécaniques qui peuvent conduire à des erreurs aléatoires et systématiques. La température, l'humidité, les propriétés viscoélastiques et les effets dynamiques tels que l'inertie et l'amortissement sous chargement dynamique FWD peuvent affecter la réponse. Une attention particulière doit donc être portée sur ces paramètres.

8.1 Effet de la température

Des gradients de température existent dans les couches de matériaux bitumineux, ce qui peut conduire à une variation de module dans ces couches. Avec l'amélioration des modèles de description du comportement des matériaux de chaussée et ainsi de la viscoélasticité des matériaux bitumineux, la température est devenue un paramètre non négligeable dans les études de comportement et du diagnostic des structures en conditions réelles.

Les températures dans les programmes d'analyse inverse de structure de chaussées ont souvent été intégrées sous forme de formule de corrélation empirique.

Par exemple la correction proposée par le guide de renforcement des chaussées est proposée par [HOR15c] :

$$d_{15^{\circ}\text{C}} = \frac{d_T}{1 + K \frac{T - 15}{15}}$$

Avec $K = 0,15$ pour les chaussées souples, $0,20$ pour les chaussées épaisses et $0,08$ pour les chaussées mixtes.

Les corrections utilisées pour les études au curviamètre en Espagne et Belgique sont données respectivement par [HOR15c] :

$$d_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{200 \cdot d_T}{3T + 140}$$

$$d_{20^{\circ}\text{C}} = (0,00026008T^2 - 0,02589279T + 1,4111835)d_T$$

L'utilisation du FWD et du SASW a permis de vérifier [TAH13] la corrélation entre le module et la température. Cependant les programmes d'analyse mènent souvent à des erreurs d'appréciation de ce comportement.

Hornych [HOR15c] étudie l'influence de la température sur le comportement en fatigue des matériaux et l'applique au calcul de la température équivalente avec utilisation de mesures réelles sur chaussées. Une comparaison entre les résultats expérimentaux et un calcul Alizé-LCPC à différentes températures montrent qu'une variation de température mène à un calcul de durée de vie erroné (diminution d'un facteur 10 de la durée de vie d'une GB par exemple entre 24°C et 15°C). La méthode de calcul indique une diminution de la durée de vie en fatigue des chaussées lorsque la température équivalente augmente (cf. Fig 23). En haute température, il existe une forte perte de la rigidité initiale de la chaussée. Il est noté également l'importance des gradients de température (exemple de l'incidence des gradients de température sur les modules des matériaux, effet de la viscoélasticité, effet important proche de la surface : voir table 4). Il existe enfin de notables écarts de mesure de déflexions entre gradient positif et négatif.

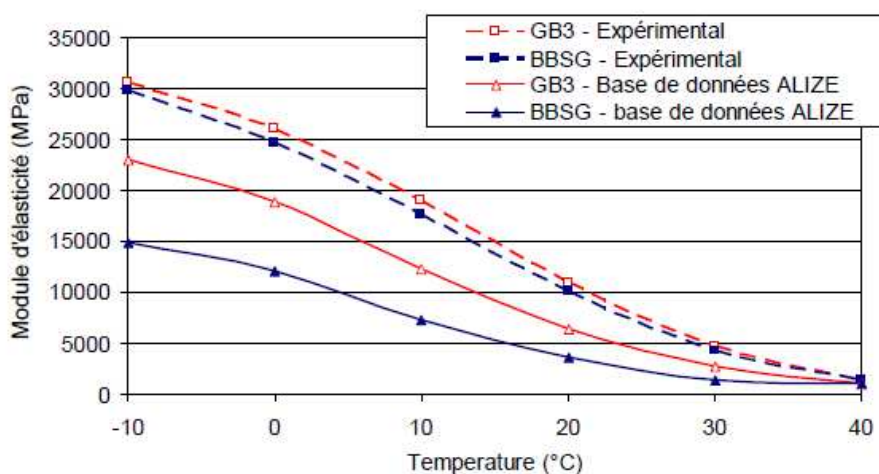


Figure 23 : Lois d'évolution du module d'élasticité des enrobés avec la température, à 10 Hz

		24 mars		8 juin	
Profondeur		8h	15h	8h	15h
2,5 cm	Temp (°C)	4.5	14.6	26.1	45.3
	E_{EME} (MPa)	21000	14300	8000	1500
25 cm	Temp (°C)	19.0	20.2	24.6	27.8
	E_{EME} (MPa)	11600	11000	8500	7000

Table 4 : Incidence des gradients de température sur les modules des matériaux [HOR15c]

Xu et al. [XU15] proposent un modèle aux éléments finis pour la viscoélasticité via le modèle de Maxwell généralisé. Leur méthode de résolution se fait par différences finies. Le modèle inverse est basé sur le théorème du multiplicateur de Lagrange pour inverser les propriétés visco-dynamiques des structures hétérogènes [XU16], le but étant d'améliorer la fiabilité et l'efficacité du calcul. Ils démontrent la possibilité d'inverser les courbes maîtresses de modules dynamiques à températures variables pour la modélisation précise des propriétés des matériaux et des déformations dynamiques.

Ahmed et al. [AHM15] montrent la nécessité d'un modèle orthotrope et dépendant de la température avec variation en profondeur pour prédire les dégradations par fatigue et l'orniérage sous une charge répétée. Ils évaluent ces effets sur deux saisons (juin et février). Deblois et al. [DEB10] étudient des résultats du FWD sur une saison (durant une phase de gel-dégel). Les auteurs utilisent un modèle élastique et viscoélastique pour les saisons été /

hiver et les notions d'angle de phase et d'énergie dissipée pour évaluer l'endommagement de la chaussée. Shoukry [SHO14] réalise des tests sur une section de chaussée rigide en mars et juillet, et introduit des recommandations de mesure en fonction de la température. Loulizi et al. [LOU02] introduisent un temps de chargement proportionnel à la vitesse, présentent quelques profils de température en fonction de la profondeur et montrent que la durée d'impulsion est fortement variable dans les 300 premiers millimètres de chaussées notamment dans les couches de béton bitumineux dans laquelle la température varie. Ils en concluent que la durée de chargement affecte le comportement viscoélastique du matériau. Zheng et al. [ZHE10] présentent un modèle intégrant la variation de la température sur des essais FWD. Sur des structures épaisses de l'ordre de 25 cm, l'effet de la température amène à un facteur de correction de 30% à 60% pour des températures allant de 0 à 50°C. Les auteurs étudient également l'effet de l'épaisseur de la couche sur la température.

Goyer [GOY15b] montre que les mesures de déflexions sont sensibles aux variations hydriques pendant deux mois précédant la mesure et recommande de faire les mesures en dehors des périodes de fortes chaleurs ou pluviométrie importante. Ces travaux ont pour objectif de corréliser les variations de températures aux évolutions des bassins de déflexions sur différents types de structures. Les travaux montrent des variations de résultats entre été et hiver de 28% sur les chaussées souples, 55% sur les chaussées épaisses et 116% sur les structures inverses. Ils montrent également l'importance des gradients de température dans les résultats obtenus avec un écart important dans les premières couches (cf. Fig 24) et un calcul inverse conduisant à des modules apparents de la structure très différents entre la période hivernale et estivale (rapport de 4 entre les deux périodes). Dans ce même programme de recherche (CCLEAR), Odeon et al. [ODE15] disposent d'un ensemble de mesures de déflexions réalisées sur 10 sections de chaussées souples et épaisses dans le Bas-Rhin à laquelle est associée une base de données climatiques disponibles pour caler les modèles. Des travaux plus récents [LI17] intègrent l'effet de la température dans un modèle dynamique implicite. Le modèle aux éléments finis est axisymétrique et utilise le logiciel ABAQUS. Le chargement FWD est représenté par un chargement impulsionnel appliqué sur la surface de la chaussée dans une zone circulaire. La viscoélasticité du matériau bitumineux est approchée par le biais d'un module de relaxation et modélisée avec le modèle de Maxwell généralisé et les séries de Prony. Le module de relaxation peut être obtenu à partir des composantes du module complexe. La dépendance à la température du module AC est caractérisée par le principe de superposition temps-température et approchée par la fonction Williams-Landell-Ferry (WLF). Les couches de matériaux granulaires intègrent un comportement non-linéaire. Les déflexions mesurées et calculées à trois températures différentes ont été comparées (figure 25).

Les travaux de Tautou [TAU16] basés sur le même type de modélisations mais explicites et implémentés sous CASTEM ont démontré l'influence du gradient de température dans les couches bitumineuses et son importance en fonction de l'épaisseur des couches [TAU17]. Un écart de 40% peut être constaté sur les mesures de déflexion lors de gradients de températures importants et pour des couches d'épaisseur de matériau bitumineux les plus importants. Ces travaux seront utilisés dans la dernière partie de ce document.

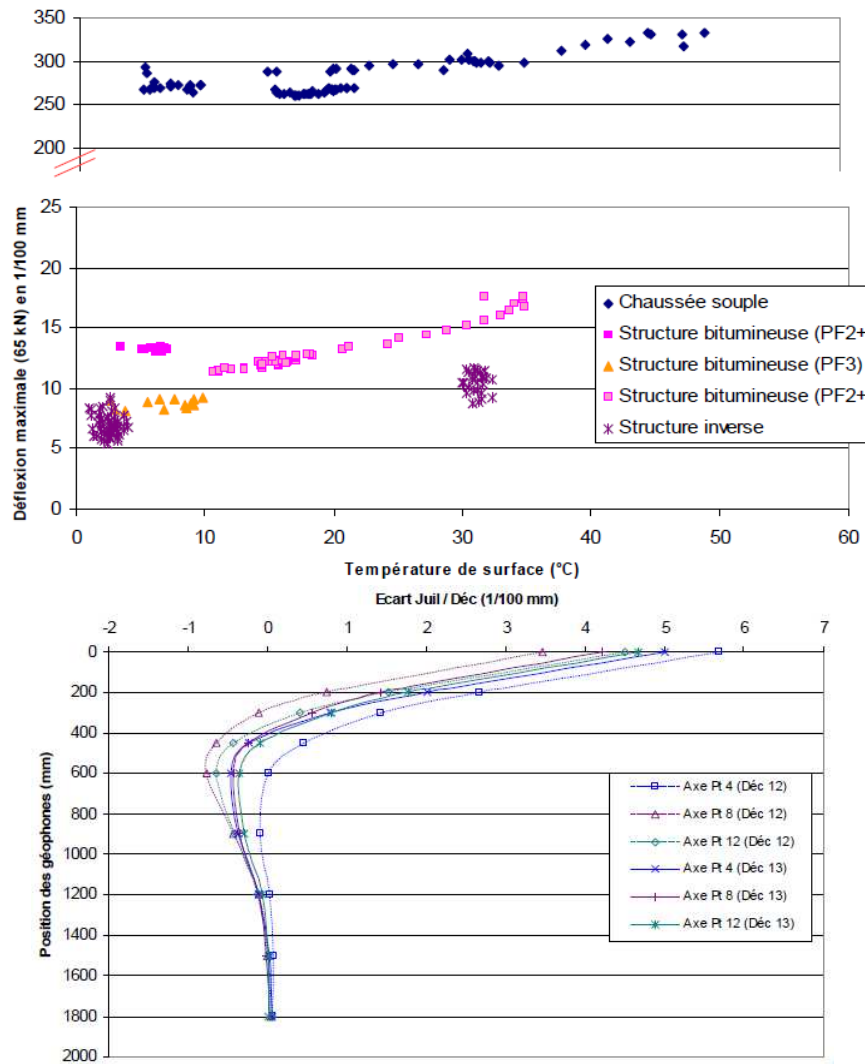


Figure 24 : Écart déflexion été / hiver en fonction de la position du géophone (Référence : Jul 2012) → zone d'influence de la température [GOY15b]

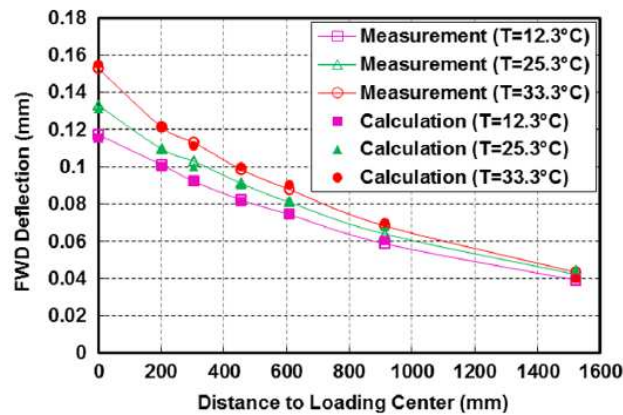


Figure 25 : Validation d'un modèle visco-dynamique avec effet de la température [LI17]

8.2 Effet de la teneur en eau

L'humidité et la profondeur du niveau d'eau dans une chaussée peut varier considérablement le long du profil d'une section. La présence d'une nappe phréatique peu profonde et ces diverses variations peuvent influencer les résultats. L'effet de la teneur en eau dans les couches de matériaux non-liés a pu être approché par Jin [JIN10] via un modèle de propagation de type semi-analytique avec un massif poroélastique. Une comparaison est faite entre massif poroélastique et élastique pur avec des différences de l'ordre du mm en déflexion verticale. Elshaer et al. [ELS17] évaluent l'effet sur la rigidité et donc sur la mesure FWD sous la forme d'un profil dans la structure de chaussée. Une équation de détermination du module résilient avec l'effet de l'humidité par un rapport entre le module résilient et une référence est présentée. Des essais FWD sont réalisés à deux saisons différentes pour voir l'effet de cette teneur en eau. La comparaison montre que la prise en compte de l'humidité améliore les résultats du bassin de déflexions surtout pour une profondeur équivalente à 10% de la contrainte maximale.

Salour et al. réalisent des essais FWD [SAL13a] durant des périodes froides, analysent la teneur en eau et les phases de gel/dégel. Les auteurs proposent un indice sur les bassins de déflexions sous forme de tableau exploitable dans de futurs calculs, avec des relations entre le module et la température, et le module et la teneur en eau. Ils développent une modélisation adaptée aux essais FWD de type k-teta dont le coefficient k est très influencé par la variation d'humidité [SAL13b]. Les auteurs montrent également que les bassins de déflexions sont très fortement influencés par la teneur en eau (cf. Fig 26) et que les indices SCI, BCI, BDI peuvent varier de 50 % sur la réponse [SAL15]. Une augmentation des contraintes de cisaillement et de compression retro-calculées en fonction de la teneur en eau est également démontrée.

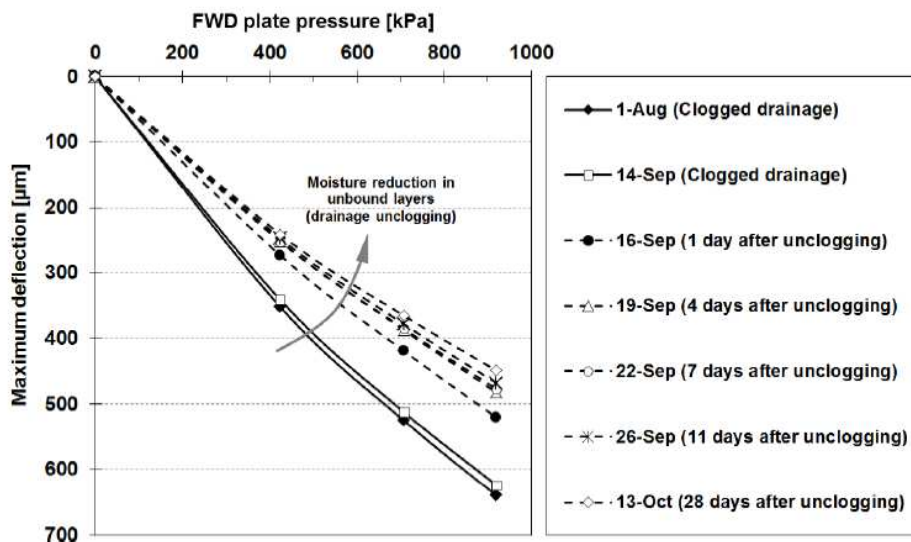


Figure 26 : Influence de la teneur en eau sur les déflexions mesurées au FWD

8.3 Autres paramètres influents

De nombreuses autres difficultés ont pu être rencontrées lors de l'analyse d'un essai FWD [HAK06] : non-linéarités de matériaux non-liés et du sous-sol, discontinuités, fissures, décollements, variations d'épaisseurs, couches d'âges différents et effets dynamiques.

▶ Effet du chargement

Le chargement FWD est dynamique. Le calage statique, souvent utilisé, néglige les effets dûs à l'inertie et à la variation temporelle de la charge et donc reflète peu la situation réelle. En outre, les courbes d'historiques de déflexions FWD contiennent des informations plus riches qui peuvent réduire les résultats erronés. L'importance du type de chargement et de sa modélisation a été montrée par Sahaf et al. [SAH14] en testant plusieurs types de chargement (sinus ou carrée). Sun et al. [SUN01] ont étudié l'importance de la fréquence et de la vitesse de la charge sur la réponse de chaussée et son importance dans la modélisation de la dynamique du véhicule. Kuo et al. [KUO14] étudient l'influence de l'amortissement de la sous-couche en fonction de la vitesse de la charge et son influence sur les mesures FWD. Konglitkul et al. [KON10] démontrent par une modélisation simple masse-ressort l'importance des effets dynamiques et visqueux et comparent les modules calculés par les méthodes AASHTO et FDOT et ceux du FWD. Des écarts importants sont constatés entre les différentes méthodes pour une chaussée bitumineuse.

▶ Effet de l'épaisseur des couches

Les épaisseurs de couches sont souvent mal connues, certaines sous couches peuvent être négligées ou mal identifiées. Les matériaux n'étant pas homogènes, les épaisseurs de couche ne sont pas uniformes in situ. L'effet de couches trop minces peut entraîner une réduction de la valeur de module rétrocalculé du fait de la faible contribution à la déflexion globale. Briggs et al. [BRI92] ont étudié in situ les données FWD couplées à un radar de chaussée lors de variations d'épaisseurs et leur effet dans le programme MODULUS et ont constaté que les propriétés du matériau rétrocalculées étaient extrêmement sensibles à l'épaisseur de la couche de chaussée. Meier [MEI95] montre également à l'aide d'un programme basé sur un réseau neuronal et en utilisant un grand nombre de données générées par des modèles statique et dynamique que des erreurs significatives pourraient provenir principalement d'erreurs d'épaisseurs.

▶ Effet d'interface

La modélisation de l'interface entre couche de roulement et couche de forme par une raideur complexe viscoélastique et l'intégration de la viscoélasticité du matériau a une importance particulière sur les essais [CHU15] en fonction du type d'interface (collée ou décollée). Une analyse des erreurs potentielles réalisées dans le calcul du module des couches de chaussée en raison d'une modélisation incorrecte de l'état de l'interface de couche a été effectuée à l'aide de données synthétiques et d'une méthode ANN par Leiva-Villacorta et al. [LEI17]. Les résultats ont indiqué que la tendance était de surestimer de manière significative le module de béton bitumineux de l'ordre de 30% et de sous-estimer le module de la base granulaire de l'ordre de 75%.

▶ Effet de la viscoélasticité

Lorsque la masse chute sur la surface de matériau bitumineux, une impulsion est générée dans le matériau et crée une onde volumique. Le décalage temporel mesuré entre deux géophones est issu de deux phénomènes physiques : la propagation des ondes à partir de la charge appliquée et le retard de temps en raison de l'amortissement visqueux du matériau. Les propriétés viscoélastiques de la plate-forme peuvent affecter la réponse des chaussées souples, ce qui a des répercussions tant sur le comportement que sur la conception de la chaussée [KHA15], [CRI06], [KUT11]. Cette viscoélasticité est le plus souvent prise en compte par le concept d'un rapport d'amortissement dérivé de la théorie des vibrations [CHA96], [CHA04], [ELA10].

Lee et al. [LEE16a] [LEE16b] proposent un programme nommé ViscoWave utilisé pour la simulation de la réponse visco-dynamique de la chaussée sous une charge mobile et montre que le modèle de matériau viscoélastique offre une meilleure prédiction de la déflexion, par rapport au modèle élastique. Pour son étude, Lee utilise une section de chaussée

instrumentée testée avec un FWD et un RWD (cf. Fig 27). Les déflexions mesurées avec le FWD sont utilisées pour recalculer le module dynamique de la couche de bitume (à l'aide des courbes maîtresses) ainsi que le module des sous-couches. Les modules issus du calcul inverse sont directement utilisés pour simuler les déflexions sous une charge en mouvement de type RWD.

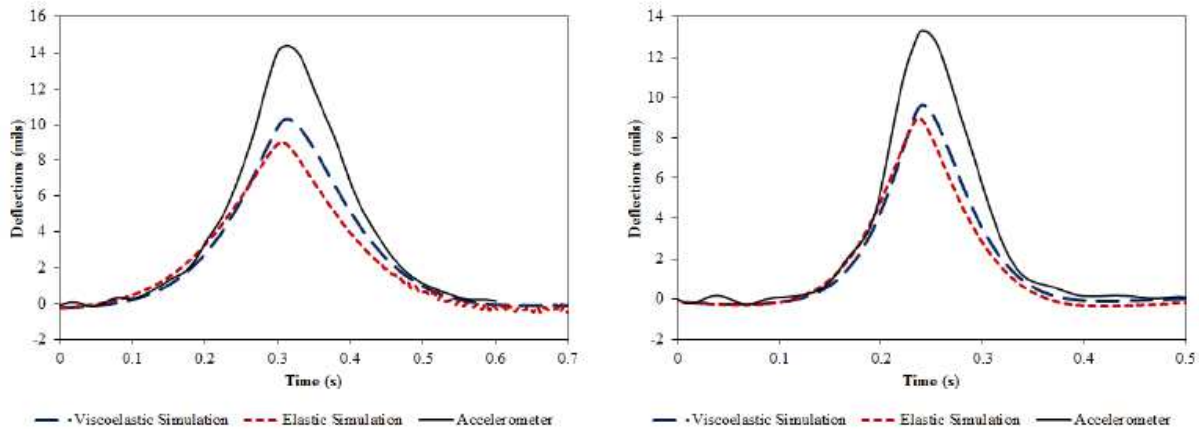


Figure 27 : Comparaison entre modèle élastique et viscoélastique (RWD à 48 et 96 km/h) [LEE16a]

Les résultats de ces calculs estiment l'importance de la viscoélasticité. Il est démontré également dans cet article que l'interaction entre deux demi-essieux qui composent l'essieu complet ne peut pas être ignorée. Lorsque l'essieu complet est modélisé, les résultats de la simulation approchent beaucoup mieux la mesure in situ.

► Effet de la non-linéarité des matériaux granulaires

Steven et al [STE07] montrent l'importance de l'utilisation d'un modèle non-linéaire complet pour les matériaux granulaires en utilisant un modèle par éléments finis via Abaqus. Falkner et al. [FAL10] donnent une relation qui permet d'approcher l'amortissement et la dissipation d'énergie dans les matériaux non liés (Fig 28).

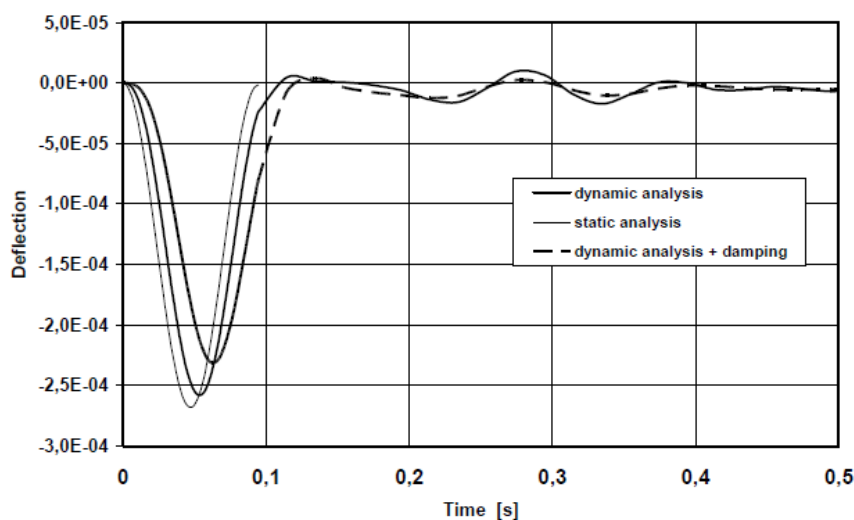


Figure 28 : Influence de l'amortissement des matériaux sur les déflexions mesurées au FWD [FAL10]

Ces auteurs ont montré l'importance de la prise en compte du comportement des matériaux granulaires dans les modèles. Parmi tous les modèles élastiques non linéaires, trois modèles ont été largement utilisés dans le domaine de l'ingénierie des chaussées souples dont le plus utilisé est le modèle K- θ :

$$M_r = K \left(\frac{\theta}{P_1} \right)^n$$

où K et n sont les paramètres matériaux, θ est la contrainte volumique et P_1 est la pression unitaire pour normaliser θ . Le modèle présente l'inconvénient de ne pas inclure le champ de contraintes réel. Ce déficit peut être corrigé [GHA16] dans le modèle proposé pour englober des conditions tridimensionnelles complètes :

$$M_r = k_1 P_0 \left(\frac{I_1}{P_0} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_0} \right)^{k_3}$$

où I_1 et τ_{oct} sont respectivement les premiers invariants des tenseurs de contrainte et des contraintes de cisaillement octaédriques. P_0 indique la pression atmosphérique et k_1 , k_2 et k_3 sont les paramètres du matériau. Bien que les modèles mentionnés ci-dessus comprennent la dépendance aux contraintes des matériaux, ils sont principalement basés sur l'observation expérimentale plutôt que sur une base théorique.

Tiliouine et al. [TIL15] montrent l'importance et l'influence de la prise en compte d'un modèle non linéaire en particulier pour les chaussées souples peu ou moyennement circulées et comparent différents modèles non linéaires pour des couches de sol (base) : modèle K-téta ; K-G ; NCHRP avec des essais FWD.

▶ Effet des dégradations

Les fissures majeures à proximité des essais, d'un bord ou d'un joint de chaussée peuvent entraîner une variation importante des données de déflexions [GOP14]. Les chaussées comprenant des fissures ou discontinuités ne sont donc pas adaptées à une analyse inverse basée sur une théorie élastique en couches.

La modélisation des fissures et des décollements entre couches dans une structure de chaussée endommagée peut se faire selon plusieurs méthodes :

- en considérant l'état d'interface (pour le décollement) ou la zone fissurée comme glissants, soit un contact unilatéral glissant ;
- en créant au niveau du défaut, une couche mince de module élastique réduit (pour le décollement), une fine tranchée vide ou remplie de matériau à faible module élastique (pour la fissure). Dans ce cas, le modèle est continu et le défaut a une épaisseur donnée.

EI Ayadi [ELA10] a modélisé des défauts d'interface et des fissures en éléments finis utilisant cette technique et a testé différentes méthodes d'identification tels que les variations sur le bassin de déflexions et les variations sur sa dérivée première puis seconde. Les résultats ont montré l'efficacité de la méthode numérique (localisation du défaut et de son étendue, cf. figure [29](#)) mais aussi la difficulté de son utilisation sur un appareil du type FWD.

▶ Autres facteurs liés à l'analyse des données

Ces facteurs comprennent les inexactitudes de mesure de déflexion FWD, l'étalonnage des données [IRW05] et les inexactitudes dans les procédures de calcul inverses. Des capteurs FWD mal positionnés, une mauvaise définition des épaisseurs des couches peuvent générer des inexactitudes majeures dans les modules calculés via la procédure inverse.

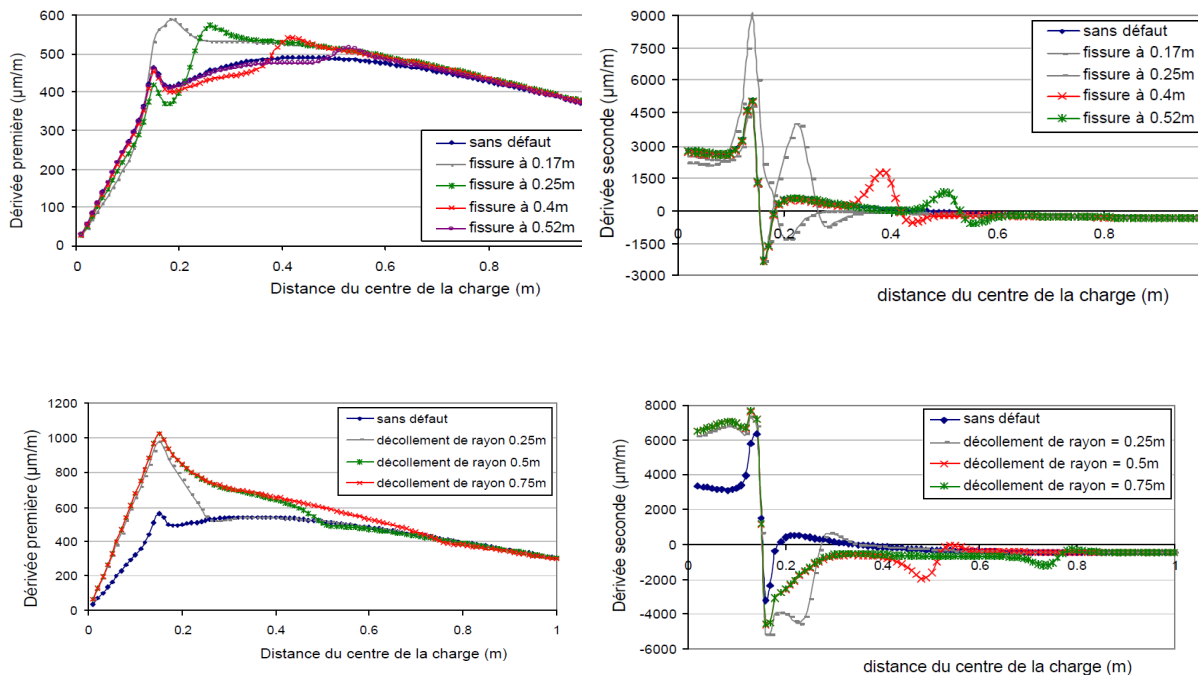


Figure 29 : Influence des défauts sur la dérivée première et seconde du bassin de déflexion

9 Etude thermo-visco-dynamique

Cette dernière partie présente une modélisation thermique et un couplage entre modèle thermique et dynamique développé au laboratoire GC2D. Le modèle, basé sur la résolution de l'équation dynamique dans le domaine fréquentiel à l'aide de CAST3M permet la prise en compte de l'aspect thermo – viscoélastique du matériau bitumineux.

9.1 Modélisation numérique

9.1.1 Problème dynamique

La discrétisation de l'équation dynamique pour la modélisation éléments finis d'un système non-conservatif (dissipatif), entraîne la forme d'équation suivante :

$$M\{\ddot{y}(t)\} + C\{\dot{y}(t)\} + K\{y(t)\} = \{F(t)\}$$

où M est la matrice de masse liée à la seconde loi de Newton, C la matrice d'amortissement proportionnelle à la vitesse et K la matrice de raideur proportionnel aux déplacements du système selon la loi de Hooke. F(t) contient le chargement imposé à la surface de la structure, et y(t) correspond aux déplacements verticaux engendrés.

Contrairement aux méthodes numériques telle que celles utilisant les éléments finis, les méthodes de calcul analytiques ne permettent pas actuellement d'obtenir de solutions explicites dans le domaine fréquentiel. Or, pour un matériau fortement dépendant de la fréquence et de la température, il est important de prendre en compte cette particularité de manière à prendre en compte cette dépendance dans la réponse de la structure et de sa sollicitation. Le calcul dans le domaine fréquentiel permet donc d'intégrer la variation du module complexe en fonction de la fréquence.

Pour permettre cela, la sollicitation et la réponse de la structure sont écrits respectivement :

$$\begin{aligned} \{\tilde{F}^*(\omega)\} &= \{\tilde{F}'(\omega)\}\cos\omega t + \{\tilde{F}''(\omega)\}\sin\omega t \\ \{\tilde{y}^*(\omega)\} &= \{\tilde{y}'(\omega)\}\cos\omega t + \{\tilde{y}''(\omega)\}\sin\omega t \end{aligned}$$

L'équation de la dynamique, après transformée de Fourier, dans sa forme discrétisée, s'écrit donc pour la couche viscoélastique sous la forme :

$$-M\omega^2\{\tilde{y}^*(\omega)\} + K'(\omega)(1 + j\chi(\omega))\{\tilde{y}^*(\omega)\} = \{\tilde{F}^*(\omega)\}$$

où la matrice K intègre directement l'amortissement du matériau viscoélastique. L'équation fait apparaître un coefficient de perte $\chi(\omega)$ traduisant l'effet viscoélastique. D'autres amortissements peuvent également être pris en compte, tels que l'amortissement de Rayleigh ou hystérétique global dans le cas notamment de structures multicouches pour les couches non-liées dont le comportement sera considéré élastique.

La structure est 2D axisymétrique (cf figure 30). Son maillage en éléments finis est composé de 966 éléments de type QUA8, comporte 1050 nœuds et d'une largeur suffisante (10 mètres) pour s'affranchir au maximum des effets de réflexion sur les bords. Un signal de type demi-sinus carré est utilisé pour simuler le chargement réel du FWD après un calage de ses paramètres (amplitude, pulsation, déphasage) dans les domaines temporel et fréquentiel.

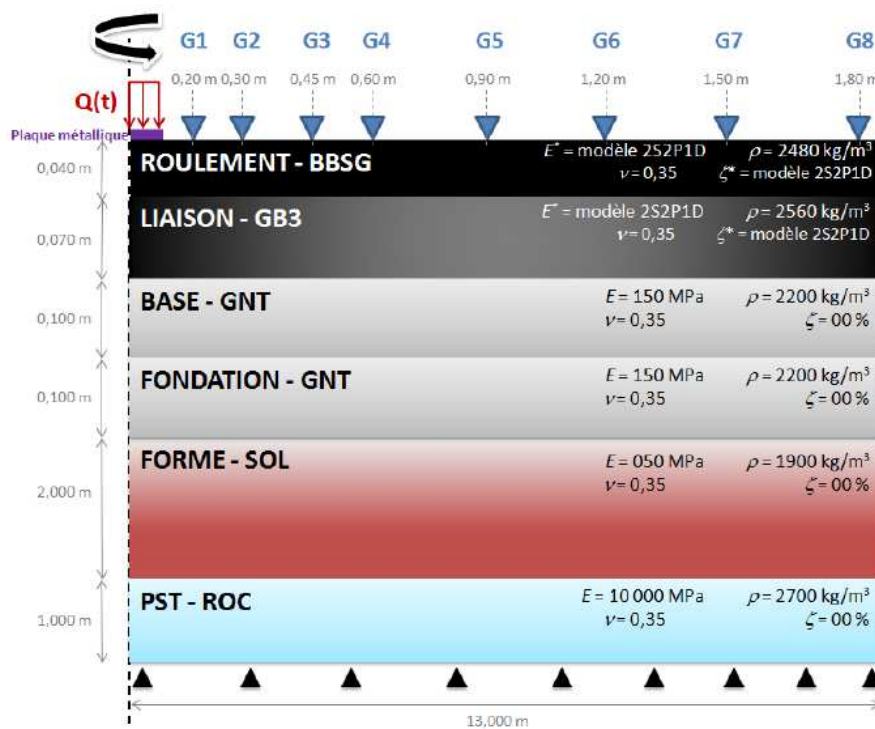


Figure 30 : Structure étudiée [TAU16]

9.1.2 Sensibilité paramétrique du modèle dynamique

Une étude de sensibilité paramétrique a été effectuée lors de travaux de doctorat. Les paramètres mécaniques et dynamiques ont été étudiés au cours de cette étude et résumés ici (le détail est donné par [TAU16]).

Les paramètres mécaniques tels que le module d'Young, le coefficient de Poisson et le ratio d'amortissement structural des différentes couches influent fortement sur les résultats de modélisation. L'étude a ainsi porté sur un plan d'expérience réduit permettant d'étudier une "tendance" de comportement de ces paramètres. Elle est basée sur des méthodes statistiques

qui consistent à sélectionner certaines combinaisons et permettent naturellement de réduire les coûts de calcul. Une matrice de Hadamard, optimale pour des plans d'expériences sans interactions, est utilisée. Ce type de plan permet d'avoir une première évaluation des influences des variables sur la réponse expérimentale. Les résultats montrent que deux des paramètres influençant fortement la modélisation sont les modules d'Young des couches. Celui des couches d'assises modifie fortement les réponses des géophones proches de la charge, tandis que le module de la couche de forme aura un effet plus prépondérant sur les réponses obtenues loin de la zone de chargement. Les autres paramètres mécaniques n'auront que très peu d'influence. Le ratio d'amortissement structural aura un effet sur le "rebond" constaté dans la réponse, beaucoup plus marqué pour les géophones éloignés. Le module d'Young de la couche de forme pourra également être utilisé pour influencer cette réponse. Cette étude doit être confortée par une étude de sensibilité complète vis-à-vis d'autres paramètres tels que la température et la fréquence.

9.1.3 Dépendance de la fréquence et de la température dans les matériaux bitumineux

La présence du liant hydrocarboné dans ces matériaux fait en sorte que le module de rigidité varie en fonction de la température et de la fréquence de chargement. Dans le cas des chaussées souples à faible trafic, les modèles viscoélastiques linéaires sont les mieux appropriés pour décrire le comportement des couches de surfaces. La méthode classique pour déterminer les propriétés rhéologiques de ce type de comportement consiste à déterminer l'évolution du module complexe sur une grande étendue de températures et de fréquences de chargement. Il peut être encore défini par sa composante élastique et un coefficient de perte correspondant au rapport entre sa partie imaginaire et sa composante réelle.

L'essai classique de module complexe permet de déterminer expérimentalement les caractéristiques intrinsèques du matériau bitumineux, et ce, pour un grand nombre de couples température / fréquence. A partir de cet essai, et grâce au principe d'équivalence temps / température, il est alors possible de construire la courbe maîtresse du matériau et de connaître ainsi ses propriétés pour toutes températures.

Le modèle utilisé ici est le modèle 2S2P1D défini par Olard [OLA03] par :

$$E^* = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}}$$

La dépendance des caractéristiques matériaux à la fréquence ainsi que la température peut ainsi être intégrée dans la loi de comportement mécanique.

9.1.3 Modélisation thermique

Dans une structure de chaussée, la température n'est pas uniforme mais elle est représentée sous la forme d'un gradient de température en fonction de conditions initiales de température et des variations d'ensoleillement, de mouvement d'air en surface et de température ambiante. L'objectif de la modélisation thermique est de pouvoir reconstruire numériquement le gradient thermique existant dans une structure de chaussée uniquement à partir des simples données météorologiques et d'estimer l'effet de l'historique météorologique sur ce gradient. Les transferts de chaleur dans la chaussée sont régis par des phénomènes combinés de conduction, convection et rayonnement (figure 31).

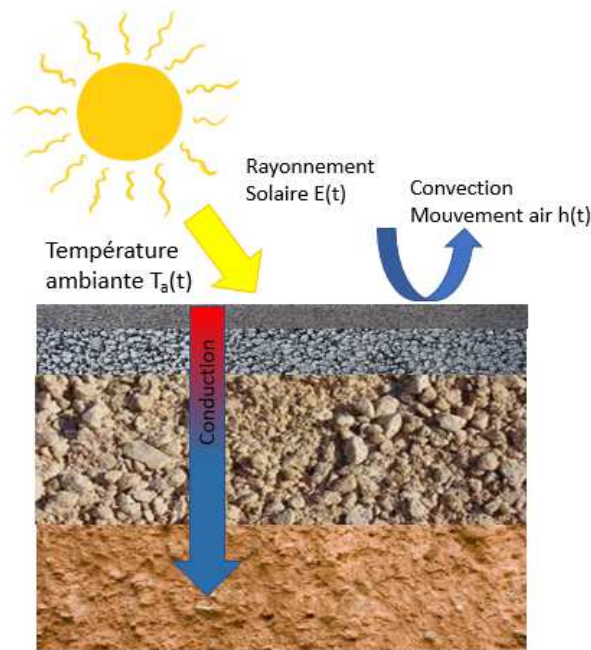


Figure 31 : Modèle thermique

L'équation de propagation de la chaleur par conduction en régime transitoire est donnée par :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + q$$

où λ est la conductivité thermique du matériau, ρ sa masse volumique, c sa capacité thermique.

La convection avec l'air en surface de la chaussée est modélisée par la loi de Newton. Elle est caractérisée par un coefficient de convection h_{air} donné par [QIN11] :

$$h_{\text{air}} = 5,6 + 0,332 \left(\frac{v_{\text{air}} L_{\text{ref}}}{\nu_{\text{air}}} \right)^{0,5} Pr^{0,7} \frac{\lambda_{\text{air}}}{L_{\text{ref}}}$$

où v_{air} est la vitesse de l'air en surface, L_{ref} une largeur de référence de la zone thermique sollicitée, λ_{air} la conductivité thermique de l'air, ν_{air} la viscosité cinématique et Pr le nombre de Prandtl de l'air. Quelques valeurs des paramètres physiques de l'air sont données en table 5.

	5°C	10°C	20°C	30°C	40°C
$\lambda_{\text{air}} (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	0,0244	0,0248	0,0255	0,0263	0,0270
$\nu_{\text{air}} (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$1,747 \cdot 10^{-5}$	$1,420 \cdot 10^{-5}$	$1,511 \cdot 10^{-5}$	$1,603 \cdot 10^{-5}$	$1,698 \cdot 10^{-5}$
Pr	0,718	0,717	0,715	0,713	0,712

Table 5 : Paramètres physiques de l'air

L_{ref} est choisi à la dimension d'une maille du modèle EF (0,02m), la température initiale pour l'ensemble du maillage est fixée à 15°C.

Enfin, l'échange par rayonnement est régi par la loi de Boltzmann qui permet une interaction entre le flux thermique incident (mesuré par l'ensoleillement global) et le rayonnement en surface proportionnel à la température de surface et l'émissivité du matériau.

9.2 Résultats d'essai sur chaussée instrumentée

Ces résultats ont été produits à la suite d'un stage Master financé par le programme DVDC.

9.2.1. Mesures météorologiques

Des essais ont été réalisés entre le 3 et le 7 juillet 2017 sur la plateforme instrumentée du laboratoire [ELA10]. Des mesures collectées en continu (1 mesure toutes les 15 minutes) de la station météorologique du laboratoire ont été enregistrées de juin à juillet (figure 32) et des essais FWD ont été réalisés à certaines heures caractéristiques de la journée.

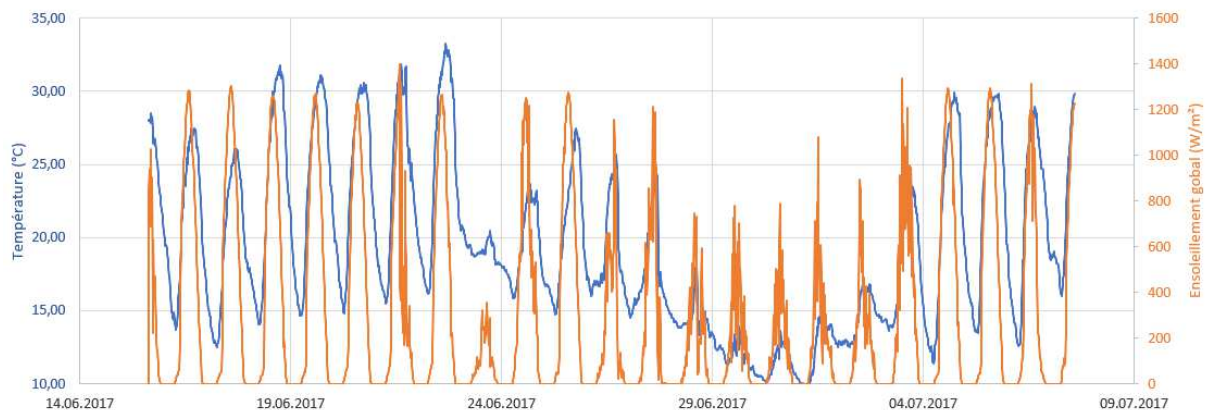


Figure 32 : Mesures météorologiques

Les températures internes à la chaussée ont été mesurées continuellement (1 mesure toutes les 15 minutes également) par des capteurs Pt100 présent dans la chaussée depuis sa construction. Leur position est : 0m (surface) ; 0,02m (milieu couche BBSG) ; 0,04m (interface BBSG/GB) ; 0,11m (interface GB/GNT) ; 0,21m (milieu couche GNT) ; 0,45m (interface sol/GNT) ; 0,91m (sol).

9.2.2. Validation du modèle thermique

Cinq mesures ont été choisies (matin ou après-midi) pour valider le modèle thermique. La comparaison entre les résultats du modèle thermique et les mesures de température dans la chaussée sont présentées sur les figure 33 à 37. Différentes modélisations ont été réalisées permettant d'approcher l'historique thermique allant de 1 à 7 jours. « ANT 1J » signifie que 24 heures de mesures de température et d'ensoleillement précédent l'instant d'étude ont été nécessaire pour obtenir le résultat de gradient. Par conséquent, « ANT 7J » a nécessité 168 valeurs de température et ensoleillement.

Les résultats obtenus montrent d'une part l'effet de l'historique de température et d'ensoleillement sur la chaussée. Ces effets semblent limités à 4 jours dès lors qu'il n'y a pas de grandes variations (période estivale ici). Ce résultat devra bien sûr être complété par des mesures lors d'autres périodes. D'autre part, les figures montrent que le modèle permet de retrouver correctement les évolutions de gradient à différentes périodes de la journée pour différentes formes de gradient (par exemple figure 35 puis 36). Notons que les résultats mesurés proche de la surface sur la figure 34 (9h15) sont différents suite à la présence de l'ombre de l'armoire contenant le matériel de mesure sur la chaussée à cette heure précise. Sur l'ensemble des courbes, on note une surestimation des températures en surface par le modèle numérique. Ce problème semble être à priori dû à la définition théorique du modèle de convection thermique utilisé. Ce point devra être approfondi par la suite.

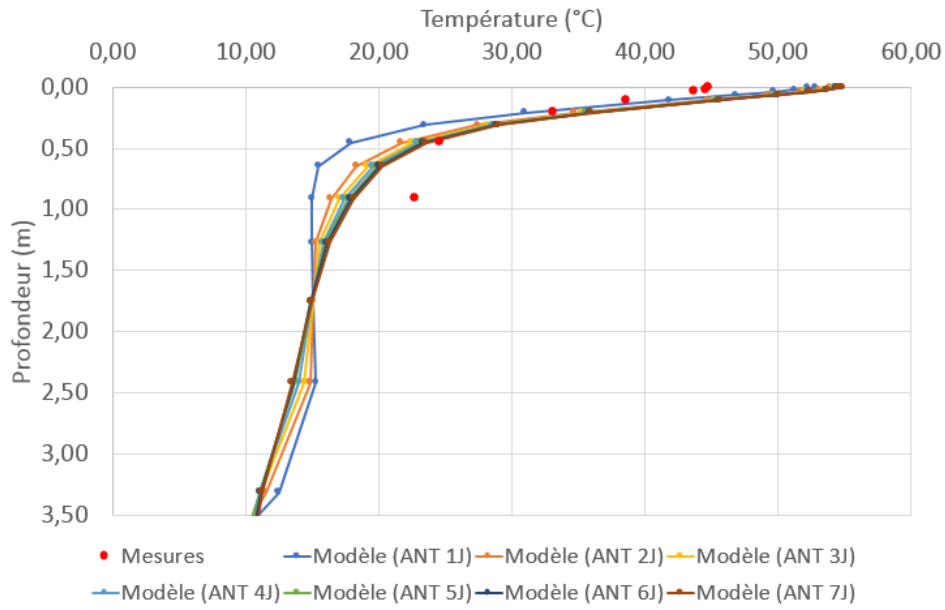


Figure 33 : Gradient thermique du 4 juillet (18h53)

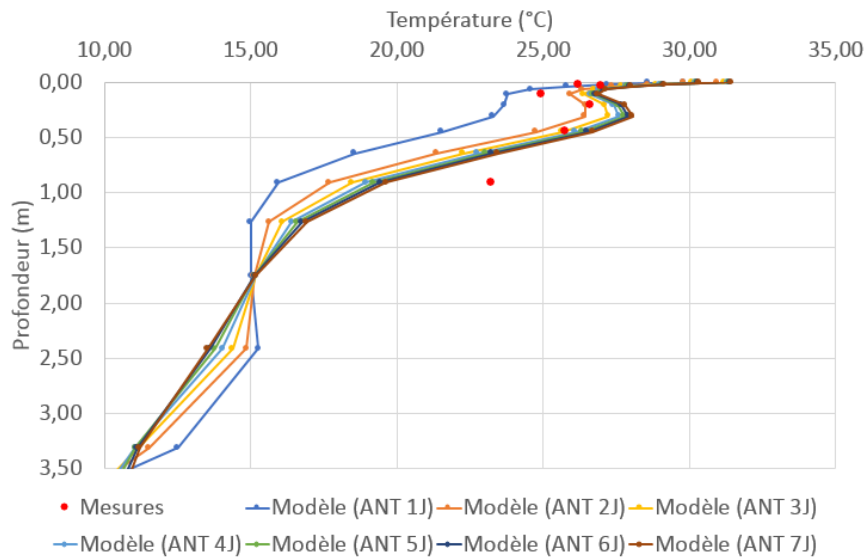


Figure 34 : Gradient thermique du 5 juillet (9h15)

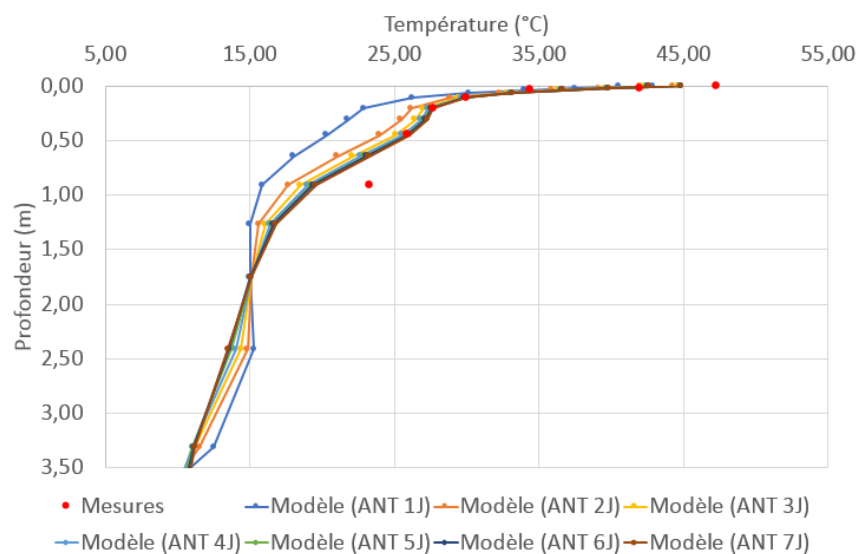


Figure 35 : Gradient thermique du 5 juillet (11h00)

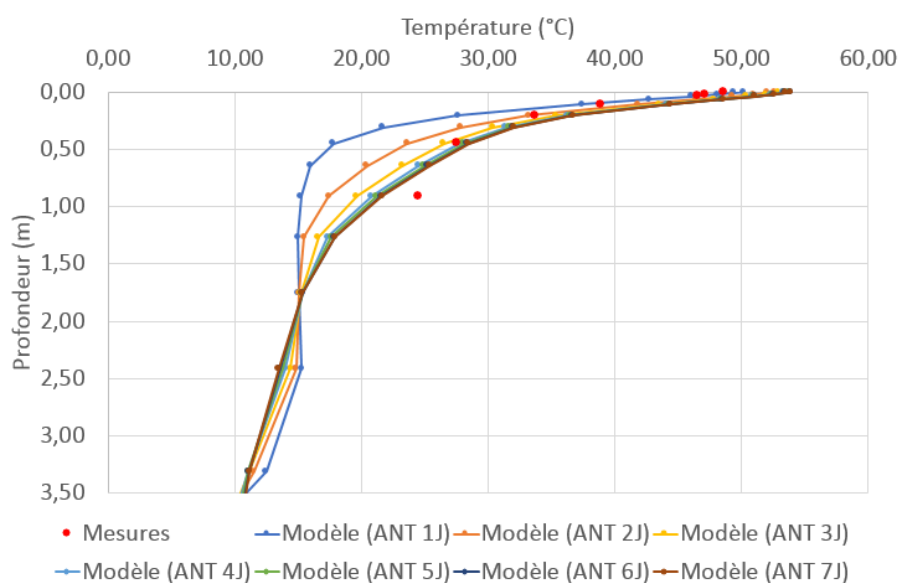


Figure 36 : Gradient thermique du 6 juillet (16h15)

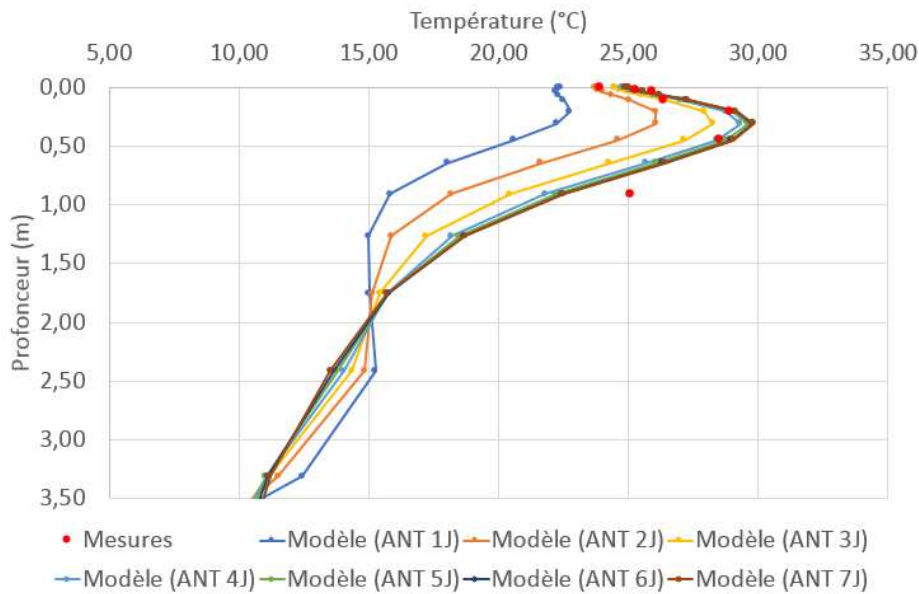


Figure 37 : Gradient thermique du 7 juillet (8h00)

9.2.3. Répétabilité & reproductibilité des mesures FWD

La répétabilité des essais FWD a déjà été démontrée dans de nombreuses études. Nous avons voulu tester la reproductibilité de la mesure. Pour cela un test FWD a été effectué 3 fois à intervalle de quelques minutes au même endroit mais en déplaçant l'appareil. La position du centre de la charge est donc différente de quelques centimètres à chaque essai, la position de l'axe de la rampe de géophone peut être également modifiée de quelques degrés. Le protocole FWD est construit de la manière suivante : 3 sollicitations de mise en place, 3 sollicitations successives H1, H2 puis H3. Les résultats des figures 38 à 40 montrent que la mesure est relativement reproductible avec un meilleur taux de reproductibilité à chargement plus élevé (chargement, bassin de déflexions et mesure dynamique). Ces résultats montrent également qu'il peut exister des légers déphasages dans le déclenchement du chargement et que les résultats dynamiques au-delà de 60ms sont souvent différents et peu exploitables. Cette étude doit être complétée par un échantillon de mesures plus important et par une estimation de la dispersion des résultats en fonction de la hauteur de chute et de l'évolution de la température.

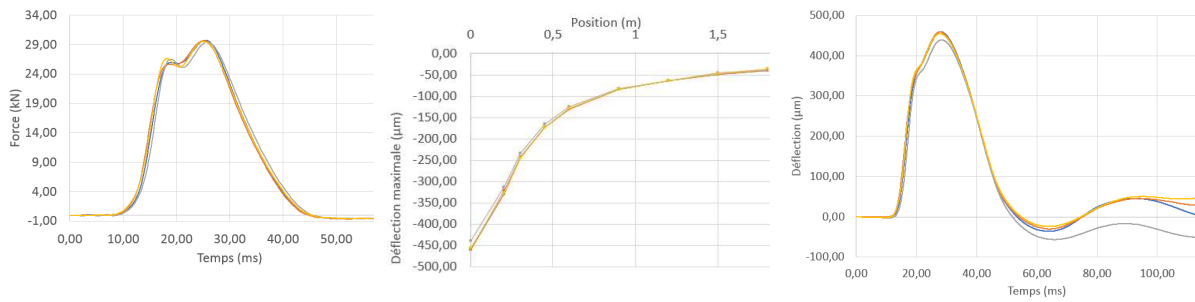


Figure 38 : Essais à hauteur de chute H1 (chargement, bassin, mesure en G1)

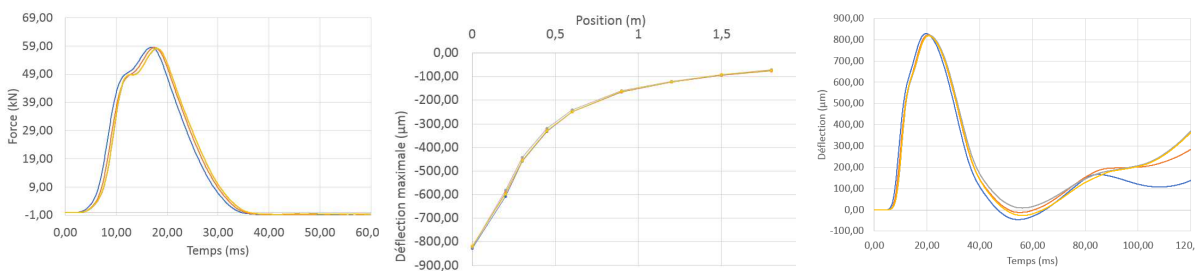


Figure 39 : Essais à hauteur de chute H2 (chargement, bassin, mesure en G1)

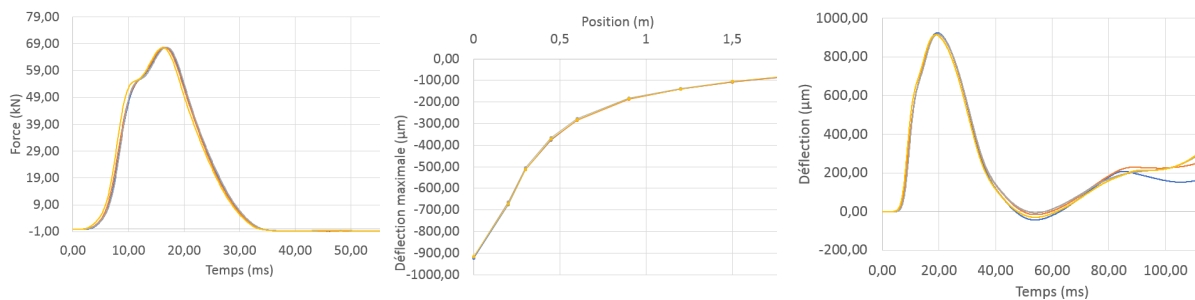


Figure 40 : Essais à hauteur de chute H3 (chargement, bassin, mesure en G1)

9.2.4. Comparaisons à différentes températures

La figure 41 présente des résultats d'essais à la même heure (16h) à différents jours (3, 5 puis 6 juillet). Les gradients mesurés de températures dans la chaussée du 5 et 6 juillet sont quasi identiques alors que celui du 3 juillet diffère quelque peu. L'effet est constaté dans les résultats dynamiques.

Les résultats de la figure 42 montrent une fois encore l'effet de la variation du gradient de température dans la chaussée. Cet effet est peu visible l'après-midi (température de chaussée importante, gradient établi entre 15h et 17h) mais important (écart proche de 20%) entre les mesures de fin de matinée et d'après-midi.

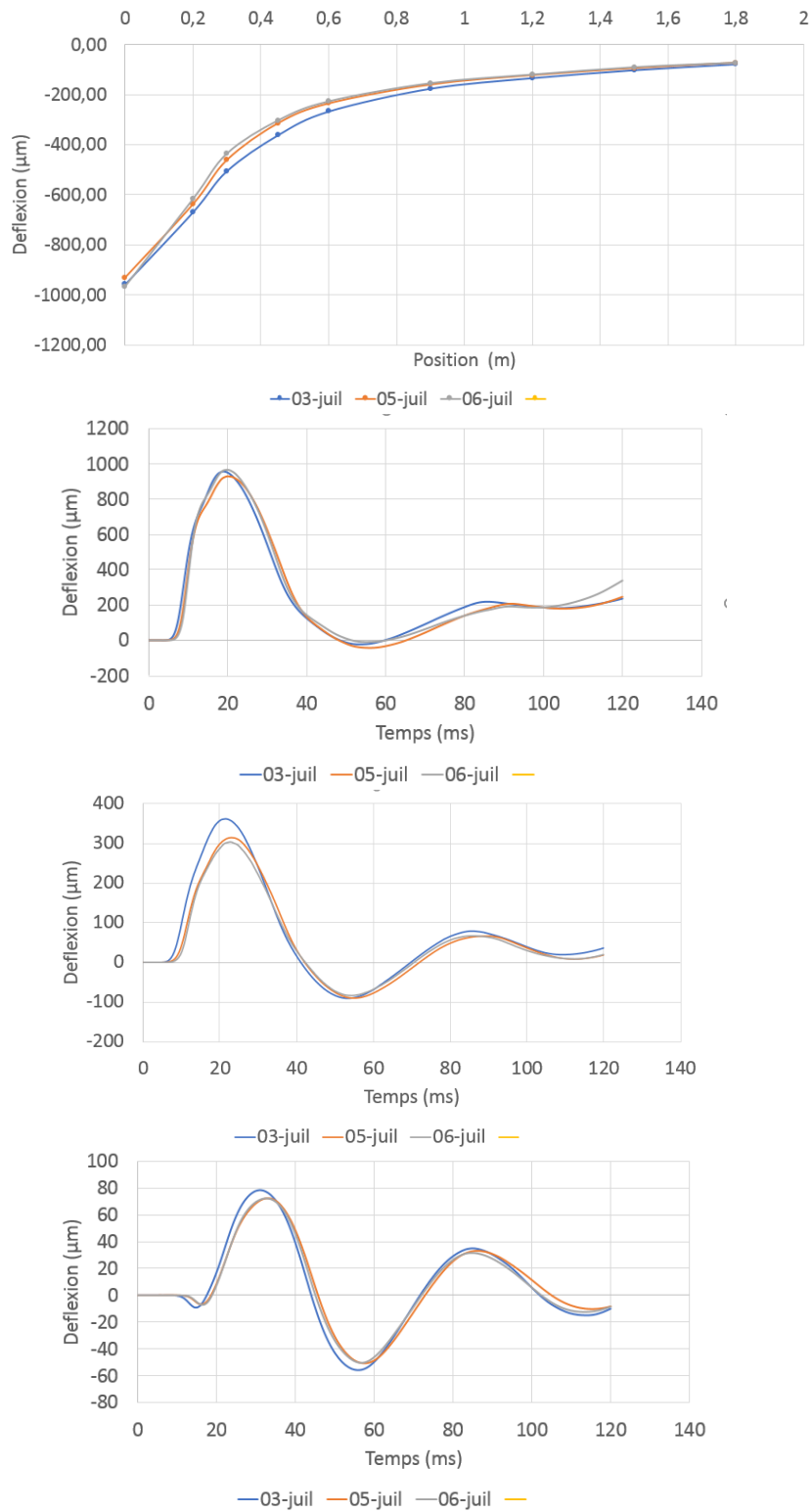


Figure 41 : Comparaison d'essais à la même heure (bassin, mesure en G1 G4 et G9)

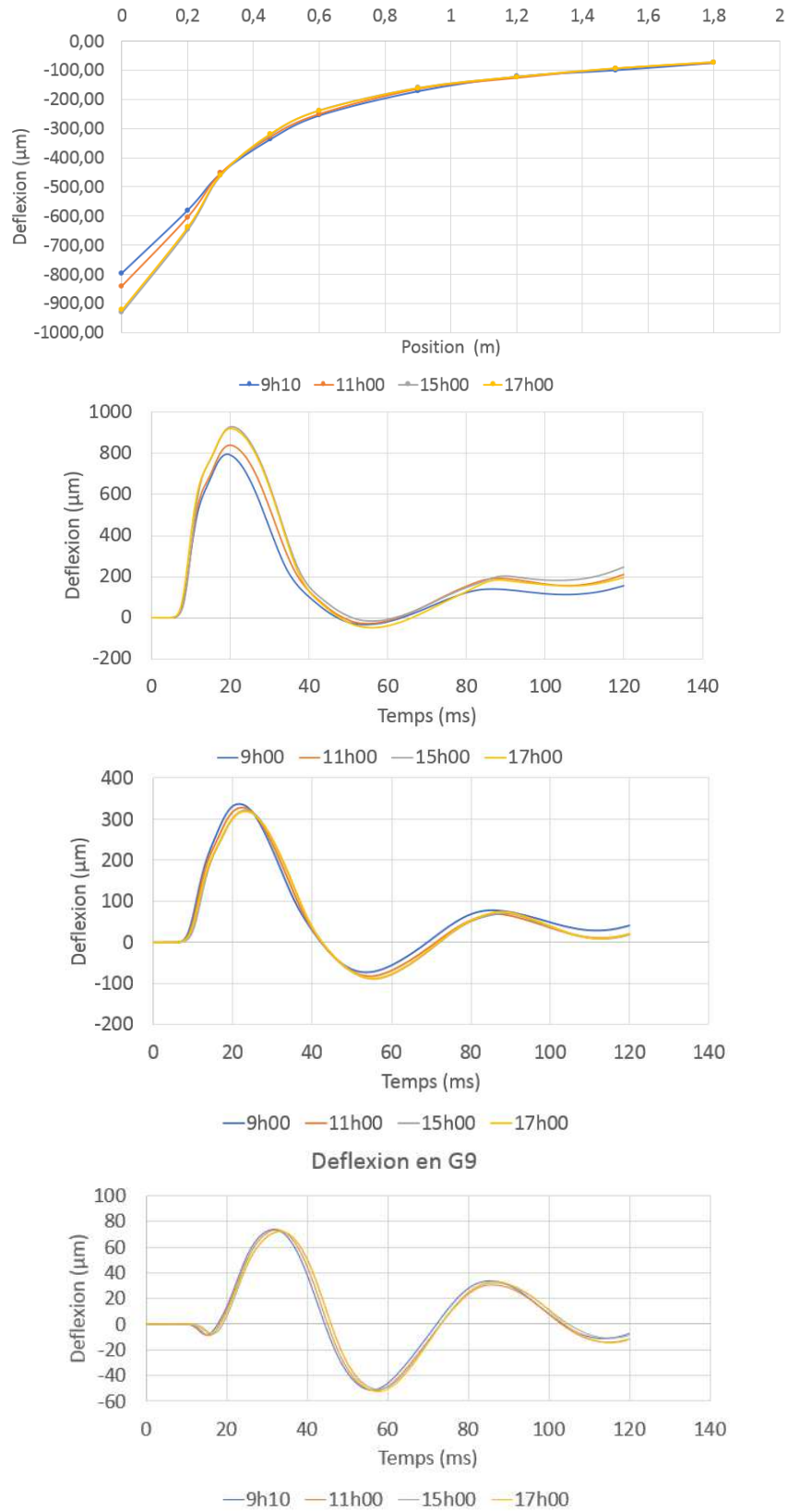


Figure 42 : Comparaison d'essais le même jour à différentes heures (Bassin, mesure en G1 G4 et G9)

9.3 Validation du modèle dynamique

9.3.1. Résultats numériques antérieurs

Le modèle numérique développé permet d'intégrer la dépendance en température du matériau bitumineux par le biais d'une évolution de type gradient. Cette dépendance température/fréquence est modélisée par la loi de comportement 2S2P1D. La figure 43 montre une comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux pour un gradient de température (sélectionné le matin) pour différentes charges (40, 50 et 65 kN). Le modèle permet de suivre correctement l'évolution expérimentale du bassin de déflexions.

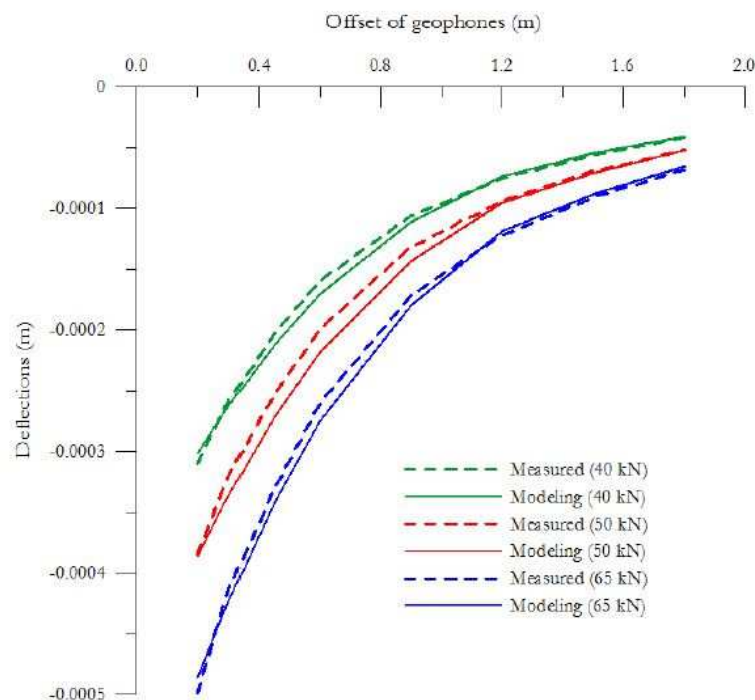


Figure 43 : Comparaison entre modèle et mesures le même jour à différents chargements

La figure 44 présente les résultats de comparaisons pour des gradients enregistrés le matin (à gauche) et l'après-midi (à droite) pour différents cas : la température de référence (15°C utilisée dans la plupart des modèles statiques), la température de surface de la chaussée (habituellement mesurée par un capteur infrarouge situé sur le FWD) et le gradient de température collecté pendant la mesure (ou reconstruit à partir du modèle thermique présenté dans la partie précédente). A basse température et faible gradient, les effets de la viscoélasticité ont un effet relativement faible. Les résultats obtenus pour un gradient plus large (après-midi) montrent un effet plus important de celle-ci. Une différence non négligeable est alors constatée à proximité de la zone de chargement. Cependant l'effet du gradient est encore peu important en raison de la faible couche de matériau bitumineux.

La figure 45 réalisée par Tautou & Al. [TAU17] montre l'importance de la prise en compte du gradient thermique par rapport à une température constante en fonction de l'épaisseur de la couche de matériau viscoélastique.

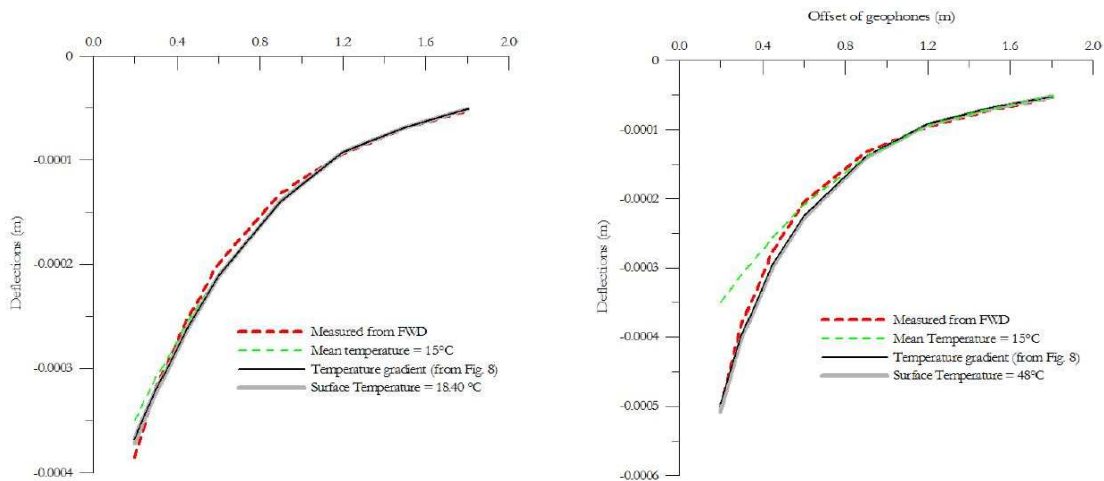


Figure 44 : Comparaison entre modèle et mesures à différents moments de la journée

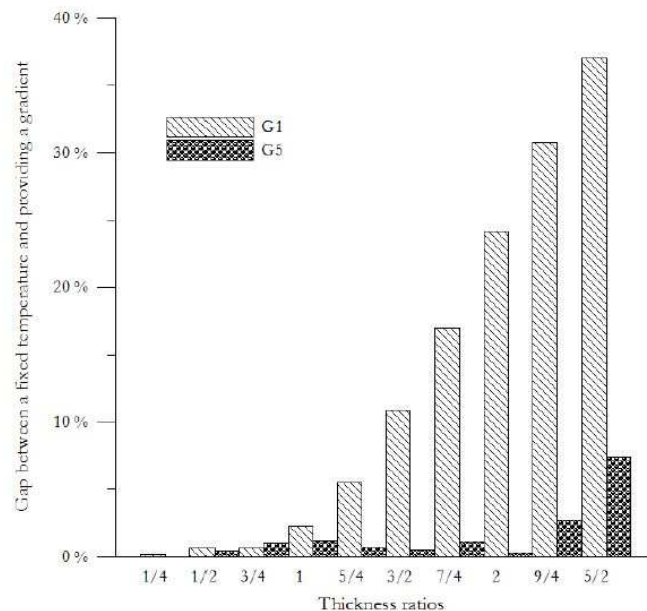


Figure 45 : Evolution de l'importance du gradient thermique en fonction de l'épaisseur

9.3.2. Comparaison entre résultats du modèle et mesures

Les figures 46 et 47 présentent les résultats du 4 juillet (19h) pour différents chargements. Le calage reste encore délicat et il existe un écart proche de la charge entre les résultats numériques et expérimentaux. Plusieurs causes peuvent être évoquées suite à la difficulté de caler ces bassins et signaux dynamiques.

Est-ce un problème de comportement de l'assise ? Y a-t-il eu une évolution des paramètres de la chaussée expérimentale ?

L'analyse inverse n'étant pas encore efficace (puisque manuelle), la programmation automatique avec plan d'expérience et sur l'intégralité des mesures de géophones et non sur le bassin de déflexions pour augmenter la fiabilité du résultat est prévue dans un prochain stage Master (mars à août 2018).

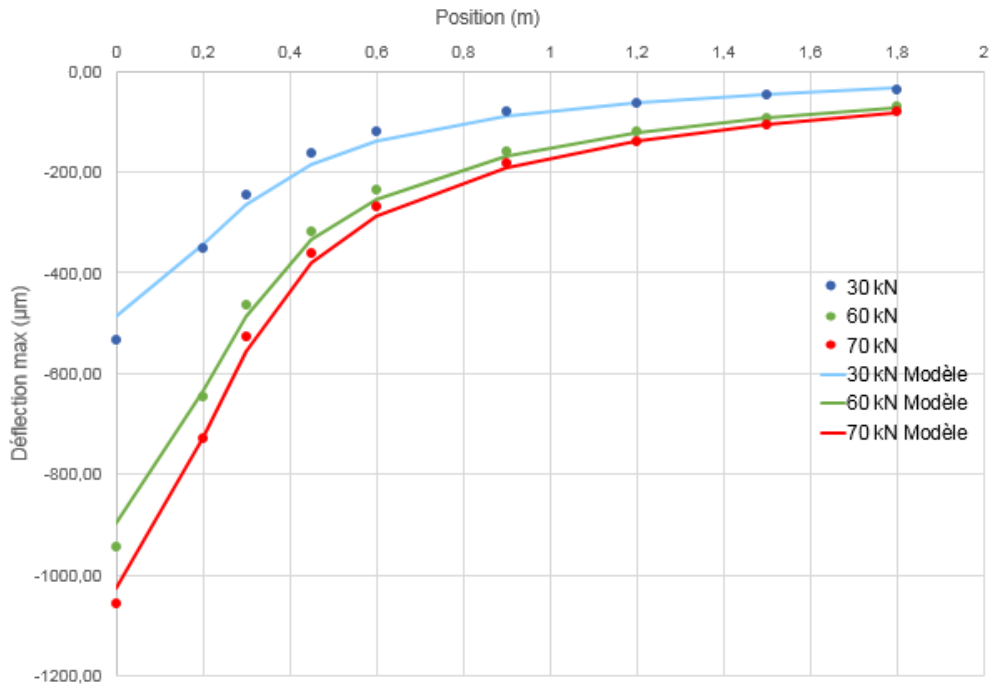


Figure 46 : Résultats sur les bassins de déflexions (4 juillet 19h)

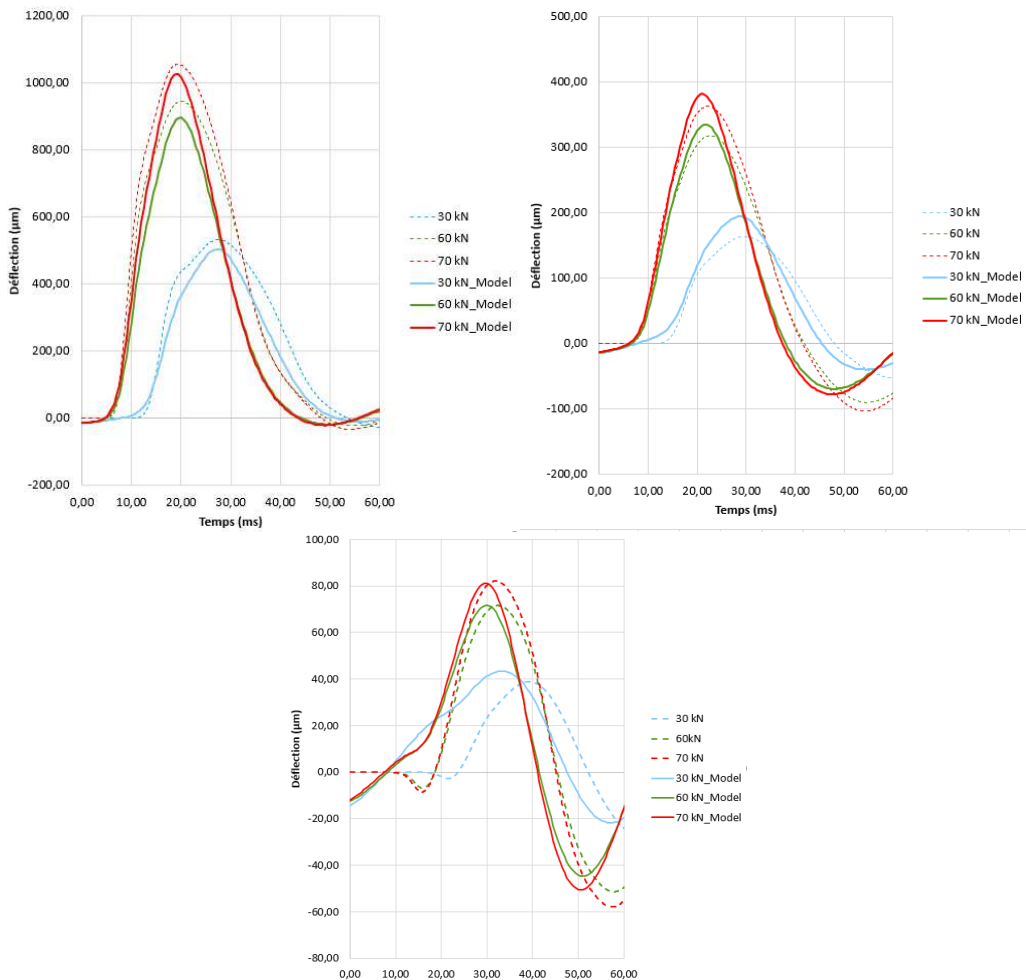


Figure 47 : Résultats pour 3 géophones G1, G4 et G9 (le 4 juillet 19h)

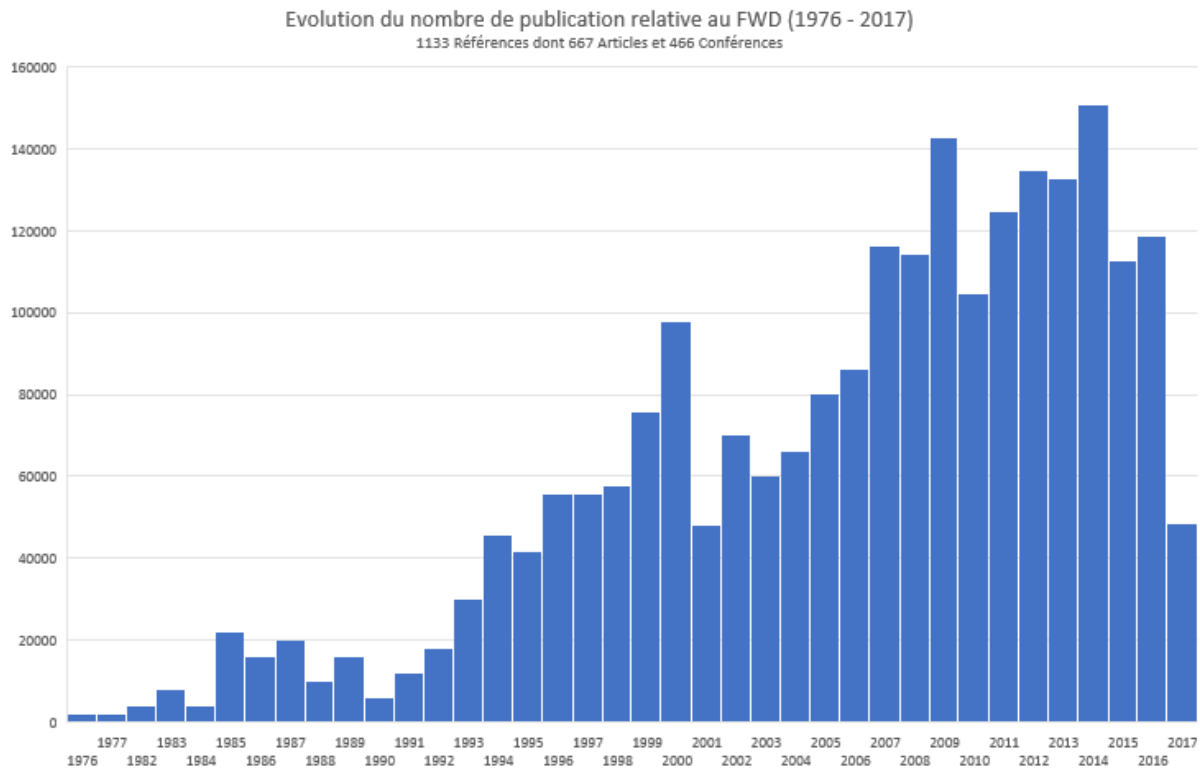
10 Conclusion

Ce rapport a dressé un état des connaissances sur la technique FWD et a montré que, jusqu'à peu, la plupart des logiciels de rétrocalcul utilisent un comportement linéaire élastique pour les matériaux des chaussées souples (incluant les matériaux bitumineux) et d'indice statique ou pseudo-statique. Quelques nouveaux modèles intègrent désormais les couches bitumineuses et les couches granulaires avec des comportements viscoélastiques et non-linéaires. Il a été également montré que l'analyse dynamique permet une meilleure évaluation et une meilleure prédiction du comportement mécanique des chaussées. L'utilisation de l'ensemble de l'historique des déflexions pour l'analyse ou bien l'utilisation des déflexions maximales et du retard (déphasage entre géophones) sont désormais possibles. Dans ce sens, des programmes de rétrocalcul basés sur des algorithmes dynamiques commencent à émerger. Cependant, la mise au point de l'analyse dynamique nécessite de plus amples investigations pour trouver une meilleure approche de comparaison entre les résultats mesurés et calculés et surtout afin de réduire les temps de calculs.

Les résultats de la faisabilité d'un modèle dynamique intégrant le comportement viscoélastique du matériau ainsi que les échanges thermiques dans la première couche ont montré l'importance de la prise en compte d'un gradient thermique, notamment pour les couches les plus épaisses. Le modèle ainsi développé, et validé par des essais in situ, permet alors de reconstruire le gradient de température en fonction des données météorologiques avec un historique sur plusieurs jours. Intégré dans le modèle dynamique, ce gradient permettra d'approcher plus finement le comportement viscoélastique du matériau et ainsi la déflexion prévisible. Ces résultats sont néanmoins à affiner par d'autres mesures en laboratoire et sur d'autres sites à différentes périodes de l'année.

Pour les travaux à venir composant les tranches futures, il est recommandé de collecter un plus grand nombre de données in situ pour valider davantage les procédures proposées, de compléter la modélisation et la validation du modèle thermique, d'évaluer la fiabilité et l'erreur des résultats dynamiques et enfin d'utiliser des méthodes d'analyse inverse basées sur des plans d'expériences, une étude de sensibilité paramétrique et une méthode numérique (type simplexe) sur des points caractéristiques du bassin de déflexions et du signal dynamique pour améliorer la précision des résultats de calcul inverse.

11 Références



- [ABD16] A. Abdel-Khalek, M. Elseifi, K. Gaspard, Z. Zhang, K. Dasari, *Model to Estimate Pavement Structural Number at Network Level with Rolling Wheel Deflectometer Data*, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 2304, 2016.
- [AHM15] M.U. Ahmed, A. Rahman, M.R. Islam, R.A. Tarefder, *Combined effect of asphalt concrete cross-anisotropy and temperature variation on pavement stress-strain under dynamic loading*. *Construction and building materials* 93, pp 685 – 694, 2015.
- [AHM16] A. Ahmed, S. Erlindsson, *Viscoelastic response modelling of a pavement under moving load*. *Transport Research Procedia*, 14, pp 748 – 757, 2016.
- [ALA07a] J. Alam, K.A. Galad, B.K. Diefenderfer, *Statistical determination of minimum testing intervals and number of drop levels on Virginia's Interstate System*. *Transportation Research Record : Journal of the transportation Research Board*, N 1990, pp.111-118, 2007.
- [ALA08] S. Alavi; M. P Tavares; J. F LeCates, *Falling Weight Deflectometer Usage*, *Journal of the transportation Research Board*, Report 381, 2008.
- [ALK01a] Al-Khoury, R., Scarpas, A., Kasbergen, C., Blaauwendraad, J., *Spectral element technique for efficient parameter identification of layered media. I. Forward calculation*, *International Journal of Solids and Structures*, 38 (9), pp. 1605-1623, 2001.

- [ALK01b] Al-Khoury, R., Kasbergen, C., Scarpas, A., Blaauwendraad, J., Spectral element technique for efficient parameter identification of layered media Part II: Inverse calculation, *International Journal of Solids and Structures*, 38 (48-49), pp. 8753-8772, 2001.
- [ALK01c] R. Al-Koury, A. Scarpas, C. Kastergen, J. Blaauwendraad, and C. Van Grup. Forward and inverse models for parameter identification of layered media. *International Journal of Solids and Structures*, 1(4) :441 - 458, 2001.
- [ALK02a] Al-Khoury, R., Scarpas, A., Kasbergen, C., Blaauwendraad, J., Spectral element technique for efficient parameter identification of layered media. Part III: Viscoelastic aspects, *International Journal of Solids and Structures*, 39 (8), pp. 2189-2201, 2002.
- [ALK02b] R. Al-Khoury, C. Kasbergen, A. Scarpas, J. Blaauwendraad, Poroelastic spectral element for wave propagation and parameter identification in multi-layer systems. *International Journal of Solids and Structures* 39 (2002) 4073–4091
- [ALK07] Al-Khoury, R., Scarpas, A., Kasbergen, C., Blaauwendraad, J., Nonhomogeneous spectral element for wave motion in multilayer systems, *International Journal of Geomechanics*, 7 (5), pp. 362-370, 2007.
- [ALZ08] S.P. Alzate-Diaz, J.S. Popovics, Application of MASW to characterize pavement top layers, *NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009*.
- [AND02] P. Andren and C.A. Lenngren, Rolling Wheel Deflectometer/FWD Correlation Study. Conference: Sixth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, At Cascais, Portugal, Volume: Workshop 3, 2002.
- [ARA04] ARA, Inc. ERES Division. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, Washington, DC: TRB,NCHRP 1-37A Final Report, 2004.
- [ASL12] C. Asli, Z.-Q. Feng, G. Porcher, J.-J. Rincent, Back-calculation of elastic modulus of soil and subgrade from portable falling weight deflectometer measurements. *Engineering Structures* 34, pp. 1–7, 2012.
- [AUT72] Autret P., Evolution du déflectographe Lacroix. Pourquoi ? *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1972, vol 60, pp. 11–17.
- [BAL10] S. Baltzer, D. Pratt, J. Weligamage, J. Adamsen, G. Hildebrand, Continuous bearing capacity profile of 18.000 km Australian road network in 5 months, 24th ARRB Conference – Building on 50 years of road and transport research, Melbourne, Australia 2010.
- [BAT91] M. Bats-Villard. Influence des défauts de liaison sur le dimensionnement et le comportement des chaussées. PhD thesis, Université de Nantes, 1991.
- [BAY05] M. B. Bayrak, A. Guclu, H. Ceylan, Rapid Pavement Backcalculation Technique for Evaluating flexible Pavement Systems, *Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August 2005*.
- [BEN09] Benedetto, H.D., Sauze´ata, C., and Sohm, J. Stiffness of bituminous mixtures using ultrasonic wave propagation. *Road Materials and Pavement Design*, 10 (4), 789–814, 2009.
- [BEN12] A. Benedetto, F. Tosti, L. Di Domenico, Elliptic model for prediction of deflections induced by a Light Falling Weight Deflectometer, *Journal of Terramechanics* 49 (2012) 1–12.

- [BEN89] Bentsen R.A., Bush A.J. and Harrison J.A., *Evaluation of Nondestructive Test Equipment for Airfield Pavements. Phase 1. Calibration Test Results and Field Data Collection*, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Washington, DC, 1989.
- [BEN97] L.J. Bendana, WS Yang, D. Mcauliffe, J. Lu, *Interpreting data from the falling weight deflectometer*, Research report FHWA/NY/RR-94/160, 1997.
- [BIL14] J.P. Bilodeau, *Direct Estimation of Vertical Strain at the Top of the Subgrade Soil from Interpretation of Falling Weight Deflectometer Deflection Basins*, *Revue canadienne de génie civil*, 41(5): 403-408, 2014.
- [BOH72] Bohn A., Ullidtz P., Stubstad R. and Sorensen A., *Danish Experiments with the French Falling Weight Deflectometer*, *Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, London, 1972, vol. 1, pp. 1119-1125.
- [BON67] J. Bonitzer, Ph.. Leger L.C.P.C. *Studies on Pavement Design. Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, 1967, pp. 652-663.
- [BON77] Bonnaure, F., Gest, G., Gravois, A., and Uge, P. *A new method of predicting the stiffness of asphalt paving mixtures*. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 46, 64–100, 1977.
- [BOU85] J. Boussinesq. *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques, principalement au calcul des déformations et des pressions que produisent, dans ces solides, des e_orts quelconques exercés sur une petite partie de leur surface ou de leur intérieur ; mémoire suivi de notes étendues sur divers points de physique mathématique et d'analyse*. Paris, Gauthier-Villars, 1885.
- [BRE63] Bretonnière S., *Les déflectomètres à boulet pour l'étude des déflexions des chaussées sous charges dynamiques*. *Bulletin de liaison des laboratoires routiers, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, N° 2, juillet-août 1963, pp. 43-5 à 43-16*.
- [BRI92] Briggs, R.C., Scullion, K.R., and Maser, K.R., *Asphalt thickness variation on Texas strategic highway research program sections and effects on backcalculated moduli*. *Transportation Research Record, No.1377, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 115–127, 1992*.
- [BRY13] Bryce, J., G.W. Flintsch, S.W. Katicha, and B.K. Diefenderfer. *Developing a Network-Level Structural Capacity Index for Structural Evaluation of Pavements*, 2013.
- [BRO10] M. Broutin. *Assessment of flexible airfield pavement using Heavy Weight Deflectometers*. PhD thesis, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2010.
- [BRO14] *Auscultation des chaussées souples aéronautiques au HWD, Guide technique, STAC, 2014*.
- [BUR06] A. Burak Goktepe, E. Agar, A. Hilmi Lav, *Advances in backcalculating the mechanical properties of flexible pavements*. *Advances in Engineering Software* 37 (2006) 421 – 431.
- [BUR43] D. M. Burmister, *The theory of stresse and displacement in layered systems and application of the design of airport runways*. *Proceedings of the Hingway Research Board, vol 23, novembre 1943*.

- [CAI15a] Y. Cai, A. Sangghaleh, E. Pan, *Effect of anisotropic base/interlayer on the mechanistic responses of layered pavements*. *Computers and Geotechnics* 65 (2015) 250–257.
- [CAI15b] Y. Cai, E. Pan and A. Sangghaleh, *Inverse calculation of elastic moduli in cross-anisotropic and layered pavements by system identification method*. *Inverse Problems in Science and Engineering*, Vol. 23, No. 4, 718–735, 2015.
- [CAL99] California Transit Association, *Pavement deflection measurement and interpretation for the design of rehabilitation treatments*, 1999.
- [CAZ06] A. Cazala, J. Deterne G. Crespy, P. Garnier, G. De Monchy, P. Rimattei, *Comparaison au niveau européen des coûts de construction, d'entretien et d'exploitation des routes, Rapport de mission d'audit de modernisation, décembre 2006*.
- [CEY14] H. Ceylan, S. Kim, O. Kaya, *Development of asphalt dynamic modulus master curve using falling weight deflectometer measurements, Final Report of Institute for transportation Iowa State University, June 2014*.
- [CHA01] Chabot A. et Piau J. M., *Calcul semi-analytique d'un massif viscoélastique soumis à une charge roulante rectangulaire*. 1ère Conférence Internationale Albert Caquot, 3-5 Octobre, Paris, 2001.
- [CHA03] K. Chatti, S.W. Haider, H.S. Lee, Y. Ji, and H. Salama. *Evaluation of nonlinear and dynamic effects on asphalt pavement response under FWD loading*. *International Journal of Pavement*, 2(1-2) :88_99, 2003.
- [CHA16a] A.S. Noureldin, *New Scenario for Backcalculation of Layer Moduli of Flexible Pavements*, *Transportation Research Record*, 1384.
- [CHA16b] G. Chai, S. Manoharan, A. Golding, G. Kelly, S. Chowdhury, *Evaluation of the Traffic Speed Deflectometer data using simplified deflection model*, *Transportation Research Procedia* 14 (2016) 3031 – 3039.
- [CHA93] K. Chatti, Y. Ji, and R. Harichandran. *Dynamic time domain backcalculation of layer moduli, damping and thicknesses in flexible pavements*. *Transportation Research Record TRB-1869, National Research Council, Washington, D.C., 1993*. pp. 106-116.
- [CHA96] Chatti, K., and Yun, K. K. 1996. *SAPSI-M: Computer Program for Analyzing Asphalt Concrete Pavements Under Moving Arbitrary Loads*. *Transportation Research Record*, 1539: 88-95.
- [CHA04] Chatti, K., Ji, Y., and Harichandran, R. 2004. *Dynamic Time Domain Backcalculation of Layer Moduli, Damping and Thicknesses in Flexible Pavements*. *Transportation Research Record*, 1869: 106-116.
- [CHE02] Chehab G.R., *Characterization of asphalt concrete in tension using a ViscoElastoPlastic model*. Ph.D. Dissertation, North Carolina State University, NC, 2002.
- [CHU15] S. Chun, K. Kim, J. Greene, B. Choubane, *Evaluation of interlayer bonding condition on structural response characteristics of asphalt pavement using finite element analysis and full-scale field tests*. *Construction and Building Materials* 96 (2015) 307–318.
- [CRI06] B. Crisman, G. Facchin, *Advanced numerical methods to evaluate pavements response comparison and parametric analysis*.

- [CUR91] *Curviamètre MT 15. Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Public Information Brochure, Septembre 1991.*
- [DEB10] *K. Deblois, J-P. Bilodeau, and G. Dore, Use of falling weight deflectometer time history data for the analysis of seasonal variation in pavement response. Can. J. Civ. Eng. 37: 1224–1231 (2010).*
- [DON02a] *Q.X. Dong, Y. Hachiya, O. Takahashi, Y. Tsubokawa, K. Matsui,, An efficient backcalculation algorithm of time domain for large-scale pavement structures using Ritz vectors. Finite elements in analysis an design, 38, 1131–1150, 2002.*
- [DON02b] *Q.X. Dong, T. Hachiya, O. Takakashi, Y. Tsubokawa, and K. Matsui. An efficient backcalculation algorithm of time domain for large-scale pavement structure using Ritz vectors. Finite Element in Analysis and Design, 38 :1131_1150, 2002.*
- [DOS64] *Dosso N. et Morin A., Première expérimentation à Angers d'un défectomètres à boulet et à ressorts « Jarret ». Bulletin de liaison des laboratoires routiers, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, N° 7, mai-juin 1964, pp. 8-2 à 8-6.*
- [DYN10] *Dynatest, Elmods6, <http://www.dynatest.com/elmod.php>, 2010.*
- [DYN88] *Dynatest Consulting, Inc., Description of and User's Guide for the Dynatest ISSEM4 Computer Program, Ojai, California, April 1988.*
- [ELA10] *A. El Ayadi, Apport de l'analyse dynamique pour le diagnostic de chaussées, PhD thesis, Université de Limoges, 2010.*
- [ELA12] *A. El Ayadi, B. Picoux, G. Lefeuvre-Mesgouez, A. Mesgouez, C. Petit, An improved dynamic model for the study of a flexible pavement, Advances in Engineering Software (IF = 1.045), Volume 44 (1), Fev 2012, pages 44-53.*
- [ELB16] *O. Elbagalati , M. A. Elseifi, K. Gaspard ,Development of the pavement structural health index based on falling weight deflectometer testing, International Journal of Pavement Engineering, 2016.*
- [ELS17] *M. Elshaer, M. Ghayoomi, J.S. Daniel, Methodology to evaluate performance of pavement structure using soil moisture profile, Road Materials and Pavement Design, 2017.*
- [FAL10] *F.J. Falkner, C. Adam, I. Paulmich, D. Adam, J. Furpass, Rapid impact compactation for middle improvement of the ground – numerical and experimental investigations. Research to design in European Practice Conference, Bratislava, 2010.*
- [FEN13] *J. Fengier, A. Pożarycki, T. Garbowski, Stiff-Plate Bearing Test Simulation Based on FWD Results. Procedia Engineering 57, pp 270 – 277, 2013.*
- [FEN17] *S.J. Feng, Y.C. Li, Z.L. Chen, H.X. Chen, Three dimensional dynamic response of ground with a porociscoelastic interlayer to a harmonic moving rectangular load, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013.*
- [FIR05] *Firmeza Soares R. Finite Element Analysis of the Mechanics of Viscoelastic Asphaltic Pavements Subjected to Varying Tire Configuration, Ph.D. Thesis, University of Nebraska, November 2005.*
- [FLI12] *G.W. Flintsch , B. Ferne, B. Diefenderfer, S. Katicha, J. Bryce, S. Nell, S. Evaluation of traffic-Speed Deflectometer. Transportation Research Record: Journal of the*

- Transportation Research Board, No. 2304, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2012, pp. 37–46.*
- [FLO10] *Flora, W.F., G.P.R. Ong, and K.C. Sinha. Development of a Structural Index as an Integral Part of the Overall Pavement Quality in the INDOT PMS, 2010.*
- [FOI95] *R. Foinquinos Mera. Dynamic nondestructive testing of pavements. Geotechnical engineering report GR95-4, Geotechnical Engineering Center, Austin, Texas, 1995.*
- [FWA97] *Fwa, T.F., Tan, C.Y., and Chan, W.T. Backcalculation analysis of pavement layer moduli using genetic algorithms. Transportation Research Record No. 1570, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 134–142, 1997.*
- [GAT08] *B. Gratz, S. Riedl, New methods for evaluating the load carrying capacity and stability of flexible pavements. Reports, 2008.*
- [GEO03] *K.P. George, Falling weight deflectometer for estimating subgrade resilient modulus, Final report of department of civil engineering, University of Mississippi, 2003.*
- [GER92] *Gérardin M., Rixen D., Théorie des vibrations – application à la dynamique des structures. Masson édition, 1992.*
- [GHA15] *A.R. Ghanizadeh, M.R. Ahadi, Application of Artificial Neural Networks for Analysis of Flexible Pavements under Static Loading of Standard Axle, International Journal of Transportation Engineering, Vol. 3 (1), pp. 31-43, 2015.*
- [GHA16] *B. Ghadimi, H. Nikraz, A comparison of implementation of linear and nonlinear constitutive models in numerical analysis of layered flexible pavement, Road Materials and Pavement Design, 2016.*
- [GOK16] *Goktepe, A.B., Agar, E., and Lav, A.H. Advances in backcalculating the mechanical properties of flexible pavements. Advances in Engineering Software, 37, 421–431, 2006.*
- [GON14] *J.M. Gonzalez, J.M. Carbonell, W. Van Bijsterveld, Evaluation of multilayer pavement viscoelastic properties from falling weight deflectometer using neural networks.*
- [GOP09] *K. Gopalakrishnan, Backcalculation of Non-Linear Pavement Moduli Using Finite-Element Based Neuro-Genetic Hybrid Optimization. The Open Civil Engineering Journal, Volume 3, 2009.*
- [GOP10] *K. Gopalakrishnan, A. Manik, Co-variance matrix adaptation evolution strategy for pavement backcalculation, Construction and building materials 24, pp 2177 – 2187, 2010.*
- [GOP11] *K. Gopalakrishnan, H. Papadopoulos, Reliable pavement backcalculation with confidence estimation, Scientia Iranica A, 18 (6) pp 1214 – 1221, 2011.*
- [GOP14] *K. Gopalakrishnan, S. Kim, H. Ceylan, O. Kaya, Development of Asphalt Dynamic Modulus Master Curve Using Falling Weight Deflectometer Measurements, Final report, Iowa State University, 2014.*
- [GOS16] *W. Gosk, Stiffness estimation of the soil build-in road embankment on the basis of light weight deflectometer test, 143, pp 395 – 402, 2016.*
- [GOY15a] *S. Goyer, Etude bibliographique : méthodologie d'exploitation des mesures FWD, rapport de projet ORSi DEDIR, 2015.*

- [GOY15b] S. Goyer, *Panorama des bassins de déflexion en tenant compte des variations saisonnières : campagne de mesures et retro-calculs*, Séminaire de restitution CCLEAR, 2015.
- [GRE09a] S. Grenier, JM. Konrad, D. LeBoeuf, *Dynamic simulation of falling weight deflectometer tests on flexible pavements using the spectral element method: Forward calculations*. *J. Civ. Eng.* 36: 944-956, 2009.
- [GRE09b] S. Grenier and JM. Konrad, *Dynamic interpretation of falling weight deflectometer tests on flexible pavements using the spectral element method: backcalculation*. *J. Civ. Eng.* 36: 957-968, 2009.
- [GU17] F. Gu, X. Luo, Y. Zhang, Y. Chen, R. Luo, R.L. Lytton, *Prediction of geogrid-reinforced flexible pavement performance using artificial neural network approach*, *Road Materials and Pavement Design*, 2017.
- [GUC12] N. Gucunski, M. Yan; Z. Wang; T. Fang, A. Maher, *Rapid Bridge Deck Condition Assessment Using Three-Dimensional Visualization of Impact Echo Data*, Vol. 18 (1), 2012.
- [GUZ02] B.B. Guzina, R.H. Osburn, *An effective tool for enhancing the elastostatic pavement diagnosis*. *Transportation Research Record*, 1806, pp 30 – 37, 2002.
- [HAK06] Hakim B., Brown S.F., *Pavement Analysis Using the FWD : Practical Difficulties and Proposed Simplification*, *Proceeding of the 10th International Conference on Asphalt Pavement*, Quebec City, Canada, 2006.
- [HAR90] Harichandran R.S., Yeh M.S. and Baladi G.Y., *MICH-PAVE: A nonlinear finite element program for analysis of flexible pavements*, *Transportation Research Record*, 1286, TRB, National Research Council, Washington, DC, 123, 1990.
- [HEV98] G. Hevin, O Abraham, H.A. Pedersen, M. Campillo, *Characterisation of surface cracks with Rayleigh waves : a numerical model*, *NDT&E International*, Vol. 31, pp. 289 -297, 1998.
- [HIL02] G. Hildebrand, *Modeling of pavement response from a field test*, *TRB Annual Meeting*, August 2002.
- [HOG38] A.H.A. Hogg, *Equilibrium of a thin plate symmetrically loaded, resting on an elastic foundation of infinite depth*. *The London, Edimburg and Dublin Magazine and Journal of Sciences*, 1938.
- [HOL05] C. Holzschuher, B. Choubane, *Resilient Modulus of Boadbed Soils Facts & Figures (State of Florida)*, *Research Report FL/DOT/SMO/05-481*, State Materials Office. February 2005.
- [HOR15c] E. Horak, A. Hefer, S. Emery and J. Maina, *Flexible road pavement structural condition benchmark methodology incorporating structural condition indices derived from Falling Weight Deflectometer deflection bowls*.
- [HOR06] E. Horak, S. Emery, *Falling weight deflectometer bowl parameters as analysis tool for pavement structural evaluations*.
- [HOR07] E. Horak, *Surface moduli determined with the falling weight deflectometer used as benchmarking tool*, *Proceedings of the 26th Southern African Transport Conference*, 2007.
- [HOR08] E. Horak, J.M. Maina, A. Hartman,. *Correlation study with the light weight deflectometer in South Africa*. *27th Annual Southern African Transport Conference* 7 - 11 July 2008.

- [HOR14] E. Horak, A. Hefer, J. Maina and S. Emery, *Structural number determined with the falling weight deflectometer and used as benchmark methodology*, Conference Paper, December 2014.
- [HOR15a] E. Horak, S. Emery, J. Maina, *Review of Falling Weight Deflectometer Deflection Benchmark Analysis on Roads and Airfields. Conference on Asphalt Pavements in Southern Africa (CAPSA), At Suncity South Africa, Volume: Proceedings, 2015.*
- [HOR15b] E. Horak, A. Hefer and J. Maina, *Modified Structural Number determined from Falling Weight Deflectometer Deflection Bowl Parameters and Its Proposed Use in a Benchmark Methodology*, *Journal of Traffic and Transportation Engineering* 3, 2015.
- [HOR15c] P. Hornysh, *Effets de la temperature sur le dimensionnement des chaussées*, Séminaire de restitution CCLEAR, 2015.
- [HU93] H.Y. Huang, *Pavement analysis and design*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J. 1993.
- [HU16a] Z. Hu, *Field evaluation and analysis of road subgrade dynamic responses under heavy vehicle*, *International journal of pavement*, 2016.
- [HU16b] Z. Hu, *An analytical method for evaluating highway embankment responses with consideration of dynamic wheel-pavement interaction*, *Soil dynamic and Earthquake Engineering*, Vol 83, pp 135 : 147, 2016.
- [HUB65] Hubert J., Noret H., Donnat J., Morin A., et Parey Ch.. *Le déflectographe Lacroix, modèle 1964. Bulletin de liaison des Laboratoires Routiers Ponts et Chaussées*, Vol 11:1-1-1-28, Janvier-Février 1965.
- [IRW85] Irwin, L.H., Yang, W.S., and Studstad, R.N., 1989. *Deflection reading accuracy and layer thickness accuracy in backcalculation of pavement layer moduli*. In: A.J. Bush III and G.Y. Baladi, eds. *Nondestructive testing of pavements and backcalculation of moduli*. ASTM STP 1026 Philadelphia, PA: American Society of Testing and Materials, 229–244.
- [IRW92] L. H. Irwin, *Instructional guide for backcalculation and the use of Modcomp 3, version 3.6, Report 92-5, Cornell Local Roads Program, cornell University, 1992.*
- [JI06] Y. Ji, F. Wang, M. Luan, Z. Guo, *A Simplified Method for Dynamic Response of Flexible Pavement and Applications in Time domain Backcalculation*, *The Journal of American Science*, 2(2), 2006.
- [JIN04] B. Jin, *Dynamic displacements of an infinite beam on a poroelastic half space due to moving oscillating load*, *Archive of Applied Mechanics*, Vol 74, pp. 277 – 287, 2004.
- [JON98] Jones D.V., Le Houedec D., Peplow A.T. and M. Petyt., *Ground vibration in the vicinity of a moving harmonic rectangular load on a half-space*. *Eur. J. Mech. A/Solids*, 1998, vol 17(1), 153-166.
- [KAN98] Y.V. Kang. *Multifrequency back-calculation of pavement-layer moduli*. *Journal of Transportation Engineering*, 124(1) :73_81, 1998.
- [KAU82] E. Kausel and R. Peek. *Dynamic loads in the interior of a layered stratum : an explicit solution*. *Bulletin in the seismological society of america*, 72(5) :1459_1481, 1982.

- [KER64] A.D. Kerr, *Elastic and viscoelastic foundation models*. *Journal of Applied Mechanics*, Septembre 1964, vol 31 (3), pp. 491–498.
- [KHA07] Khazanovich, L., & Wang, Q. C. (2007). *Mlayer: High-Performance Layered Elastic Analysis Program*. *Transportation Research Record*, Vol. 2037, Pp.63-75.
- [KHA09] Khattak, M.J., G.Y. Baladi, and S. Xiaoduan. *Development of Index Based Pavement Performance Models for Pavement Management System (PMS) of LADOTD*. No. FHWA/LA. 08/460, 2009.
- [KHA15] L. Khazanovich, A. Booshehrian, *Dynamic Visco-Elastic Analysis of Falling Weight Deflectometer Deflections for Rigid and Flexible Pavements*, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2015.
- [KIM02] Y. R. Kim, *Use of Falling Weight Deflectometer Multi-Load data for pavement strength estimation*, *Final Report No. FHWA/NC/2002-006*, June 2002.
- [KIM07a] J. M. Kim, S. Mun, *Fast spectral analysis of an axisymmetric layered structure*. *Mechanics Research Communication* 35 : 222-228, 2008.
- [KIM07b] J. R. Kim, H. B. Kang, D. Kim, D. S. Park and W. J. Kim, *Evaluation of In Situ Modulus of Compacted Subgrades Using Portable Falling Weight Deflectometer and Plate-Bearing Load Test*. *J. Mater. Civ. Eng.* 19 : 492-499, 2007.
- [KOP10] W. Kongkitkul, T. Posribink, S. Youwai, P. Jongpradist, *Investigation of the dynamic plate loading test with the Light Weight Deflectometer using the boundary element method*. *ATRANS Research*, 2 (1), 2010.
- [KON10] W. Kongkitkul, K. Punthutaecha, S. Moryadee, P. Jongpradist, S. Moryadee, T. Posribink, *Evaluation of static-equivalent stiffness by a simple falling weight deflectometer*. *ATRANS Research*, (2):1, 2010.
- [KRA05] J. Krarup, S. Rasmussen, L. Aagaard, P. G Hjorth, *Output from the Greenwood traffic speed Deflectometer*, 2006.
- [KUO14] C. Kuo and T. Tsai, *Significance of subgrade damping on structural evaluation of pavements*. *Road Materials and Pavement Design*, 2014 Vol. 15, No. 2, 455–464.
- [KUT11] E. Kutay, K. Chatti and L. Lei, *Backcalculation of Dynamic Modulus Mastercurve from FWD surface deflections*, 2011.
- [LAC63] Lacroix J. et Durrieu J., *Défectographe pour l'auscultation rapide des chaussées*. *Bulletin de liaison des Laboratoires Routiers Ponts et Chaussées*, 3:191-1–191-16, Septembre - Octobre 1963.
- [LCP94] LCPC-SETRA, *Guide technique Conception et dimensionnement des structures de chaussées*, 1994
- [LEE16a] H.S. Lee, *Dynamic Backcalculation of Flexible Pavement Layer Parameters and Moving Load Simulation — White Paper: An Initial Study*. *Report of Applied Research Associates*, 2016.
- [LEE16b] H.S. Lee, D. Steele, *Dynamic backcalculation of asphalt pavement properties and simulation of pavement response under moving load*, 96th annual meeting of the transportation research board, 2016.

- [LEF99] Lefeuvre-Mesgouez G. and Le Houedec D., *Propagation d'ondes dans un massif soumis à des charges roulantes se déplaçant à vitesse élevée. In 14e Congrès Français de Mécanique, Toulouse, 1999.*
- [LEG69] Ph. Léger, Le déflectographe Lacroix, L.C.P. *Evolution du matériel et des procédés d'exploitation. Bulletin de liaison des Laboratoires Routiers Ponts et Chaussées, 1969, vol 40, pp.109–128.*
- [LEI17] F. Leiva-Villacorta, A. Vargas-Nordcbeck, D.H. Timm, *Non-destructive evaluation of sustainable pavement technologies using artificial neural networks International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 10, pp 139–147, 2017.*
- [LEP97a] Ph. Lepert, JM Simonin, R. Kobisch, *Le FWD : performance, utilisation en France et en Europe, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, pp. 19-26, 1997.*
- [LEPb97] Ph. Lepert, Aussedat G. et Simonin J.M., *Evaluation du curviamètre MT 15. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, 1997, vol 209, Mai-Juin pp. 3–11.*
- [LI17] M. Li, H. Wang, *Development of ANN-GA program for backcalculation of pavement moduli under FWD testing with viscoelastic and nonlinear parameters, International Journal of Pavement Engineering, 2017.*
- [LIA98] R. Y. Liang, J. X. Zhu, *Efficient computational algorithms for forward and backward analysis of a dynamic pavement system, Computers and Structures 69, 255 – 263, 1998.*
- [LOS02] M. Losa. *The influence of asphalt pavement layer properties on vibration transmission. International Journal of Pavement, 1(1) :67-76, 2002.*
- [LOU02] A. Loulizi, I.L. Al-Qadi, S. Lahouar, T.E. Freeman, *Measurement of Vertical Compressive Stress Pulse in Flexible Pavements. Transportation Research Record Vol. 1816, Paper No. 02-2376, 2002.*
- [LOU06] A. Loulizi, I.L. Al-Qadi, M. Elseifi, *Difference between In Situ Flexible Pavement Measured and Calculated Stresses and Strains, Journal of Transportation Engineering, Vol 132, pp 574-579, 2006.*
- [LU16] Z. Lu, Z. Hu, H. Yao, J. Liu, *Field evaluation and analysis of road subgrade dynamic responses under heavy duty vehicle. International Journal of Pavement Engineering, 2016.*
- [LYT86] Lytton R.L., Roberts F.L. and Stoffels S., *Determination of Asphaltic Concrete Pavement Structural Properties by Nondestructive Testing, Report NCHRP 10-27, Phase I, Texas Transportation Institute, Transportation Research Board, Washington, DC, 1986.*
- [MAD16] S.S. Madsen *Dynamic modeling of pavements with application to deflection measurements, DCAMM Special report No S210, Technical University of Denmark, July 2016.*
- [MAG90] A.H. Magnuson, R.L. Lytton, and R. Briggs. *Comparison of computer predictions and field data for dynamic analysis of falling weight deflectometer data. Transportation Research Record TRB-1293, National Research Council, Washington, D.C., 1990. pp. 61-71.*

- [MAM03] M.S. Mamlouk. *Use of dynamic analysis in predicting _eld multilayer pavement moduli. Transportation Research Record TRB-1043, National Research Council, Washington, D.C., 2003. pp. 113-121.*
- [MAU17] H. MAUREY, *les infrastructures routières et autoroutières : un réseau en danger, Rapport d'information du Sénat fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable, 8 mars 2017.*
- [MEI95] Meier R.W. and Rix G.J., *Backcalculation of flexible pavement moduli from dynamic deflection basins using artificial neural networks, Transport Res Rec 1473, 1995, pp. 72–81.*
- [MUR13] F. Murillo, U. Bejarano, *Correlation between deflections measurements on flexible pavement obtained under static and dynamic load techniques. Proceedings of the international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Paris, 2013.*
- [NCH01] NCHRP Web Document 35 (Project C1-38): *Contractor's Final Report. Rehabilitation Strategies for Highway Pavements. Prepared for National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council May, 2001.*
- [NEG16] A. Nega, H. Nikraz, I.L. Al-Qadi, *Dynamic analysis of falling weight deflectometer, Journal of traffic and transportation engineering, 2016.*
- [NEW59] Newmark M.N., *A method of computation for structural dynamics, Proc. American Society of Civil Engineers 85, EM3, 1959.*
- [NOR93] A.S. Noureldin, *New scenario for backacclulation of layer moduli of flexible pavements, Transport Research Record, 1384, 23-28, 1993.*
- [NOR03] A.S. Noureldin, K.Zhu, S.Li, D. Harris, *Network pavement evaluation using falling weight deflectometer and ground penetrating radar, TRB annual meeting 2003.*
- [NOU03] M. Norouzi, S. Nassiri, and A. Bayat, *Evaluation of Seasonal Variation in Mechanistic Responses of Flexible Pavements Through Use of Falling Weight Deflectometer. Data Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2369, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2013, pp. 30–37.*
- [ODE49] N. Odemark, *Undersökning av elasticitetegenskaperna hos olika jordarter samt teori för beräkning av belägningar enligt elasticitetsteorin. Statens Väginstitut, medellande 77, 1949.*
- [ODE15] H. Odeon, *Evolution de la deflexion en fonction des variations saisonnières, Séminaire de restitution CCLEAR, 2015.*
- [OLA03] Olard, F., Di Benedetto, H., *General _2s2p1s_ model and relation between the linear viscoelastic behaviors of bituminous binders and mixes. International Journal of Road Materials and Pavement Design 4, 185_224, 2003.*
- [ONG90] C.L. Ong, D.E. Newcomb, and R. Siddharthan. *Comparison of dynamic and static backcalculation moduli for three-layer pavements. Transportation Research Record TRB-1293, National Research Council, Washington, D.C., 1990. pp. 86-92.*
- [PAQ97] Paquet J., *Un nouvel appareil d'auscultation des chaussées : le Curviamètre. Extrait de la Revue Générale des Routes et des Aéroports, N°530, Avril 1977.*

- [PAR98] M. Parvini and D. F.E. Stolle, *Interpretation of pavement deflection measurement data using an elastodynamic stochastic approach*. *Can. J. Civ. Eng.* 25: 151-160 (1998)
- [PAR01] H. M. Park, *Use of falling weight deflectometer multi load level data for pavement strength estimation*, PhD thesis, North Carolina State University, 2001.
- [PAS54] P.L. Pasternak, *On a new method of analysis of an elastic foundation by means of two foundation constants*. Moscou, 1954.
- [QIN11] Y. Qin, J.E. Hiller, *Modeling temperature distribution in rigid pavement slabs: Impact of air temperature*, *Construction and Building Materials*, 25, pp. 3753–3761, 2011.
- [RED04] Reddy, M.A., Reddy, K.S., and Pandey, B.B. *Selection of genetic algorithm parameters for backcalculation of pavement moduli*. *International Journal of Pavement Engineering*, 5 (2), 81–90, 2004.
- [REP05] *Testing and Data Collection Transportation*. Research Illinois Department of Bureau of Materials and Physical, Research Report, PTA-T1 (Eff. 10/1996, Rev. 02/2005).
- [ROH94] Rohde, G.T. *Determining Pavement Structural Number from FWD Testing*. *Transportation Research Record*, No.1448, Washington, DC, 1994.
- [RYD04] N. Ryden, *Surface Wave Testing of Pavements*. PhD Thesis, Lund Institute of Technology, Lund University, 139 pages, 2004.
- [RYD09] N. Ryden, M.A. Mooney, *Analysis of surface waves from the light weight deflectometer*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 29, pp. 1134–1142, 2009.
- [RUT15] P. Ruta, B. Krawczyk, A. Szydło, *Identification of pavement elastic moduli by means of impact test*. *Engineering Structures*, 100, pp. 201–211, 2015.
- [SAH14] S.A Sahaf, D. Moazami, D. Moazami *Effect of stiffness modulus and dynamic loading on pavement subgrade*, *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, Vol 5(4), pp 30-34, 2014.
- [SAL99] M. Saltan, *Analytical Evaluation Of Flexible Pavements*, PhD Thesis, Suleyman Demirel University, 1999.
- [SAL06] M. Saltan and H. Sezgin, *Hybrid Neural Network and finite element modeling of sub-base layer material properties in flexible pavement*, *Material and Design*, 11 (1), pp. 38-42, 2006.
- [SAL07] Saltan M., Saltan S. and Sahiner A., 2007. *Fuzzy logic modeling of deflection behavior against dynamic loading in flexible pavements*, *Construction and Building Materials* 21(7): 1406–1414.
- [SAL08] M. Saltan, S. Terzi, *Modeling deflection basin using artificial neural networks with cross-validation technique in backcalculating flexible pavement layer moduli*. *Advances in Engineering Software* 39, pp. 588–592, 2008.
- [SAL11] M. Saltan, S. Terzi, E. U. Kucuksille, *Backcalculation of pavement layer moduli and Poisson's ratio using data mining*. *Expert Systems with Applications* 38, pp. 2600–2608, 2011.

- [SAL13a] F. Salour, S. Erlingsson, *Investigation of a pavement structural behaviour during spring thaw using falling weight deflectometer*. *Road Materials and Pavement Design*, 2013, Vol. 14, No. 1, 141–158.
- [SAL13b] F. Salour, S. Erlingsson, *Moisture-Sensitive and Stress-Dependent Behavior of Unbound Pavement Materials from In Situ Falling Weight Deflectometer Tests*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2335, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2013, pp. 121–129.
- [SAL15] F. Salour, S. Erlingsson, *Impact of groundwater level on the mechanical response of a flexible pavement structure*, VTI rapport 808A, 2015.
- [SAN14] A. Sangghaleh, E. Pan, R. Green, R. Wang, X. Liu & Y. Cai, *Backcalculation of pavement layer elastic modulus and thickness with measurement errors*, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 15, No. 6, 521–531, 2014.
- [SAN89] M. Sansalone and N.J. Carino. *Detecting Delaminations in Concrete Slabs with and without Overlays Using Impact-Echo Method*. *ACI Materials Journal*, 86(2), March 1989.
- [SAR15] P. Sarker, D. Mishra, E. Tutumluer, *Overlay Thickness Design for Low Volume Roads: A Mechanistic-Empirical Approach with Nondestructive Deflection Testing and Pavement Damage Models*. 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January 2015.
- [SAR16] P. Sarker, E. Tutumluer, S. Lackey, *Nondestructive Deflection Testing based Mechanistic - Empirical Overlay Thickness Design Approach for Low Volume Roads: Case Studies*, *Procedia Engineering*, Volume 143, 2016, Pages 945–953.
- [SET09] Setra, *Les renforcements de chaussées – Diagnostic – Guide technique*, 2009.
- [SEO09] Joo-Won Seo, Soo-Il Kim, Jun-Sung Choi, Dae-Wook Park, *Evaluation of layer properties of flexible pavement using a pseudo-static analysis procedure of Falling Weight Deflectometer*, *Construction and Building Materials* 23 (2009) 3206–3213.
- [SHO14] S.N. Shoukry, *Effect of FWD Testing Position on Modulus of Subgrade Reaction*, final report, 2014.
- [SIM05] J.M. Simonin. *Contribution à l'étude de l'auscultation des chaussées par méthode d'impact mécanique pour la détection et la caractérisation des défauts d'interface*. PhD thesis, Institut National de Sciences Appliquées - Rennes, 2005.
- [SIM15] JM. Simonin, JL Geffard, P. Horny, *Performance of deflection measurement equipment and data interpretation in France*. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE, September 15 - 17, 2015, Berlin, Germany)*.
- [SOL15] U.J. Solanki, P.J. Gundalia, M.D. Barasara, *A Review on Structural Evaluation of Flexible Pavements using Falling Weight Deflectometer*, *Trends in Transport Engineering and Applications*, Volume 2, Issue 1, 2014.
- [SOL17] U.J. Solanki, P. J. Gundaliya, M.D. Barasara, *A Study on FWD Deflection Bowl Parameters for Structural Evaluation of Flexible Pavement*, *Trends in Transport Engineering and Applications*, Vol. 4 (1), 2017.
- [STEE08] D. Steele, *Rolling Wheel Deflectometer (RWD) Demonstration for the Connecticut Department of Transportation (ConnDOT)*, Final report, February 25, 2007

- [STE07] B. Steven, D. Alabaster and J. de Pont, *Elastic Nonlinear Finite Element Analysis of a Flexible Pavement Subjected to Varying Falling Weight Deflectometer Loads*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2016, Transportation Research Board of the National Academies, pp. 31–38, 2007.
- [STO89] D. Stolle and D. Hein. *Parameter estimates of pavement structure layers and uniqueness of the solution*. *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli - Second Volume ASTM STP 1026*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989. pp. 313-322.
- [STO95] D. F.E. Stolle and G. Sedran, *Influence of inertia on falling deflectometer test response*, *Can. Geotech. J.* 32: 1044-1048 (1995).
- [STO96] D. F. E. Stolle, *Comparison of Simplified Elastostatic and Elastodynamic Models for Falling Weight Deflectometer Data Interpretation*, *Transportation Research Record*, 1540, 1996.
- [STO05] D. F.E. Stolle and P. Guo, *A practical approach to falling-weight deflectometer (FWD) data reduction*, NRC Research Press 2005.
- [SUL11] M.T. Suleiman, K. Gopalakrishnan, J.T. Kervern, *Structural Response of Pervious Concrete Pavement Systems Using Falling Weight Deflectometer Testing and Analysis*, *Journal of Transportation Engineering* 2011.
- [SUN01] L. Sun, *Computer simulation and field measurement of dynamic pavement loading*, Vol. 56, pp 297 – 313, 2001.
- [TAH13] M. R. Taha, S. Hardwiyono, N. Yusoff, M. Hainin, J. Wu and K. Nayan, *Study of the Effect of Temperature Changes on the Elastic Modulus of Flexible. Pavement Layers Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 5(5): 1661-1667, 2013.
- [TAN13] X. Tang, X. Yang, *Inverse Analysis of Pavement Structural Properties Based on Dynamic Finite Element Modeling and Genetic Algorithm*. *International Journal of Transportation Science and Technology*. Vol. 2 (1), pp. 15 – 30, 2013.
- [TAR14] R.A. Tarefder, M.U. Ahmed, *Modeling of the FWD deflection basin to evaluate airport pavements*. *International Journal of Geomechanics*, Volume 14(2) : 205-213, 2014.
- [TAU16] R. Tautou, *Modélisation dynamique de la thermo-viscoélasticité des matériaux bitumineux - Application aux essais FWD sur les structures de chaussées*, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2016.
- [TAU17] R. Tautou, B. Picoux, C. Petit, *Temperature influence in a dynamic viscoelastic modeling of a pavement structure*, *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, Vol. 143 (3), 2017.
- [TIL15] B. Tiliouine, K. Sandjak, *Influence of Nonlinear Resilient Models of Unbound Aggregates on Analysis and Performance of Road Pavements*. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 59(1), pp. 77–84, 2015.
- [TIR14] C. Tirado , M. Mazari, C. Carrasco, S. Nazarian, *A rapid algorithm for considering non-linear material response of flexible pavement layers for prediction of pavement distress*. *Transportation Research Board, 93th 42 Annual Meeting, Washington D.C.*, 2014.
- [UDD93] W. Uddin, *Simulation of falling Weight Deflectometer for in situ material. Characterisation of Highway and Airport pavement*.

- [ULL87] Ullidtz P., Battiato G., Larsen B.K. and Stubstad R.N., *Verification of the Analytical-Empirical Method of Pavement Evaluation Based on FWD Testing. Proceedings, Sixth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, The University of Michigan, Ann Arbor, MI, 1987, pp. 521-532.*
- [UZA88] J. Uzan, C.H. Paredes, M. and L. Lytton, *A microcomputer based procedure for backcalculating Layer moduli from FWD data. Research Report 113-1, Texas Transportation Institute, September 1988.*
- [UZA94a] J. Uzan. *Advanced backcalculation technique. Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli - Second Volume ASTM STP 1198, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994. pp. 3-37*
- [UZA94b] J. Uzan. *Dynamic linear back calculation of pavement material parameters. Journal of Transportation Engineering, 120(1) :109_126, 1994.*
- [VAR15] S. Varma, E. Kutay, *Backcalculation of viscoelastic and nonlinear flexible pavement layer properties from falling weight deflections, International Journal of Pavement Engineering, 388-402, 2015.*
- [VIA97] Vialletel H. et Simonin J.M., *Le déeflectrographe Flash. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, 1997, vol 208, Mars-Avril, pp.:49–52.*
- [WAN16] H. Wang, M. Li, *Comparative Study of Asphalt Pavement Responses under FWD and Moving Vehicular Loading, Journal of Transportation Engineering, 2016.*
- [WER89] S. Werkmeister and D. Alabaster, *Estimation of Remaining Pavement Life of Low-Volume Roads with Falling Weight Deflectometer Results: A Practical Method, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1989, Vol. 2, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 261–269, 2007.*
- [WES26] H.M. Westergaard. *Stresses in concrete pavements computed theoretical analysis. Public Roads, 7(2) :25_35, 1926.*
- [XU14] Q. Xu, J.A. Prozzi, *A finite – element and Newton – Raphson method for inverse computing multilayer moduli, Finite Elements in Analysis and Design 81 (2014) 57–68.*
- [XU15] Q. Xu, J.A. Prozzi, *A time – domain finite element method for dynamic viscoelastic solution of layered half space responses under loading pulses, Computers dans structures, 160, 20–39, 2015.*
- [XU16] Q. Xu, H. Zhu, *An inverse model and mathematical solution for inferring viscoelastic properties and dynamic deformations of heterogeneous structures. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 300 (2016) 798–833.*
- [YIN07] Yin H., Solaimanian M., Kumar T. and Stoffels S., *The effect of loading time on flexible pavement dynamic response: a finite element analysis Mech Time-Depend Mater, 2007, vol 11, pp. 265–288.*
- [YUS15] N.I. Yusoff, S. Hardwiyono, N.N. Ismail, M.R. Taha, *Measurements of the Elastic Modulus of Pavement Subgrade Layers Using the SASW and FWD Test Methods, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 10(2):174-181 · June 2015.*
- [ZAA14] I. Zaabar, K. Chatti, H. Suk Lee, N. Lajnef, *Backcalculation of Asphalt Concrete Modulus Master Curve from Field-Measured Falling Weight Deflectometer Data. Using a New Time Domain Viscoelastic Dynamic. Solution and Genetic Algorithm Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,*

No. 2457, *Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2014, pp. 80–92.*

- [ZHA03] Z. Zhang, G. Claros, L. Manuel, I. Damjanovic, *Evaluation of the pavement structural condition at network level using falling weight deflectometer data, 82nd Annual meeting of the TRB, 2003.*
- [ZHE10] Y. Zheng, H. Kang, Y. Cai, Y. Zhang, *Effect of temperature on the dynamic properties of asphalt mixtures. 25 (3), 534 – 537, 2010.*
- [ZHO92] Zhou H., Hicks R.G., Bell C.A. *Development of a backcalculation program and its verification. In: Proceedings of the seventh international conference on asphalt pavements, vol. 1. UK; 1992, pp. 391–400.*