



HAL
open science

Nouvelles utilisations des mesures de bassins de déflexion pour caractériser l'état structurel des chaussées

Vinciane Le Boursicaud

► **To cite this version:**

Vinciane Le Boursicaud. Nouvelles utilisations des mesures de bassins de déflexion pour caractériser l'état structurel des chaussées. Génie civil. École centrale de Nantes, 2018. Français. NNT : 2018ECDN0036 . tel-01963303

HAL Id: tel-01963303

<https://theses.hal.science/tel-01963303>

Submitted on 21 Dec 2018

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

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

Thèse de doctorat de

L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES
Comue **Université Bretagne Loire**

ECOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : Génie Civil

Par

« Vinciane LE BOURSICAUD »

« Nouvelles utilisations des mesures de bassins de déflexion pour caractériser l'état structurel des chaussées »

Thèse présentée et soutenue à l'IFSTTAR de Nantes, le 8 novembre 2018

Unité de recherche : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)

Rapporteurs avant soutenance :

| | |
|-------------------|--|
| Mahdia HATTAB | Professeur des Universités Université de Lorraine |
| Cyrille CHAZALLON | Professeur des Universités INSA Strasbourg |

Composition du Jury :

Président :

| | |
|------------------|--|
| Frédéric GRONDIN | Professeur des Universités Ecole Centrale de Nantes |
|------------------|--|

Membre du jury :

| | |
|---------------------|--|
| Michaël BROUTIN | Docteur, STAC |
| Cyrille CHAZALLON | Professeur des Universités INSA Strasbourg |
| Mahdia HATTAB | Professeur des Universités Université de Lorraine |
| Juan MARTINEZ | Professeur des Universités INSA Rennes |
| Carl VAN GEEM | Chercheur, CRR |
| Pierre HORNYCH | IDTPE (H.D.R), IFSTTAR |
| Jean-Michel SIMONIN | Chercheur, IFSTTAR |

Remerciements

C'est avec une grande émotion et avec un léger pincement au cœur que j'écris ces remerciements, synonyme de la fin de cette belle aventure du doctorat. Au-delà des recherches scientifiques, j'ai eu l'occasion de rencontrer de nombreuses personnes, qui par leur savoir et leur bienveillance ont largement contribué à l'élaboration de cette thèse.

Cette thèse a été effectuée au Laboratoire Auscultation, Modélisation, Expérimentation des infraStructures de transport (LAMES) de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) situé à Nantes. J'aimerais exprimer en avant-propos les remerciements adressés à L'IFSTTAR et à la Région Pays de la Loire pour le financement et à l'ensemble des personnes ayant contribué à l'aboutissement de ce travail de thèse.

Je tiens à remercier les professeurs Mahdia HATTAB et Cyrille CHAZALLON d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse et du temps qu'ils ont consacré à lire et commenter ce manuscrit. Toute ma gratitude s'adresse également à Mr Michael BROUTIN, Mr Frédéric GRONDIN, Mr Juan MARTINEZ, Mr Carl VAN GEEM qui m'ont fait l'honneur d'être membres de mon jury de thèse.

Je souhaite remercier Pierre HORNYCH, mon directeur de thèse ainsi que Jean-Michel SIMONIN, mon encadrant de thèse. Je remercie également Jean-Michel PIAU pour son aide précieuse au cours de ces travaux de thèse. Je les remercie chaleureusement tous les trois pour leur confiance, leur encadrement, leurs conseils, leur écoute, leur soutien et leur gentillesse. Je tiens également à les remercier pour leur lecture attentive de ce manuscrit de thèse.

Je remercie également mes deux collègues de bureau Maïssa et Son pour leur sympathie et leur gentillesse, qui, au fil de ces années de doctorat, sont devenus de réels amis.

J'adresse également tous mes remerciements à mes collègues de l'IFSTTAR pour les nombreux échanges et discussions fructueuses et en particulier Jean-Luc, Jacques, Nadège, Gilles, Anthony, Julien, Benjamin, Octavio, Denis, Mai Lan, Isabelle, Armelle, Olivier, Franck,...

Je remercie le personnel du CRR et du STAC pour leur accueil, les échanges fructueux ainsi que pour toutes les informations communiquées.

Je remercie mon conjoint Johan d'avoir toujours été là pour moi, d'avoir su m'encouragée, me réconfortée, et m'aider. Je remercie également mes parents Thierry et Véronique, mon frère Valentin pour leur soutien indéfectible et leur présence.

Enfin, je dédie cette thèse à mon grand-père Papi Jojo qui a toujours cru en moi.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Remerciements | 3 |
| Table des matières | 5 |
| Résumé | 9 |
| Table des Figures..... | 11 |
| Table des Tableaux..... | 19 |
| Introduction générale..... | 25 |
| I Chapitre I : Recherche bibliographique | 31 |
| I.1 Introduction | 32 |
| I.2 Les chaussées | 32 |
| I.2.1 Généralités sur les chaussées..... | 32 |
| I.2.2 Les matériaux de chaussée | 33 |
| I.2.3 Les différents types de structures de chaussées | 34 |
| I.2.4 Comportement mécanique des chaussées | 36 |
| I.2.5 Modélisation du comportement mécanique des chaussées | 38 |
| I.2.6 Méthodes d’auscultation des chaussées | 44 |
| I.2.7 Conclusion de la première partie..... | 49 |
| I.3 Mesure et interprétation de la déflexion..... | 49 |
| I.3.1 Appareils de mesure de la déflexion | 50 |
| I.3.2 Paramètres influents sur la mesure de déflexion | 65 |
| I.3.3 Exploitation des mesures de déflexion..... | 72 |
| I.3.4 Conclusion de la deuxième partie | 88 |
| I.4 Conclusion..... | 89 |
| II Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d’une procédure de correction des mesures de déflexion..... | 91 |
| II.1 Introduction | 92 |
| II.2 Etude théorique du fonctionnement des appareils..... | 92 |
| II.2.1 Choix des structures de chaussées..... | 92 |
| II.2.2 Etude du principe de mesure du curviamètre et des déflectographes..... | 93 |
| II.2.3 Modélisation de la déflexion mesurée par les appareils avec ALIZE..... | 97 |
| II.2.4 Evaluation des biais de mesure pour différents cas de structures de chaussées..... | 102 |

Table des matières

| | | |
|------------|---|------------|
| II.2.5 | Bilan de l'étude théorique du fonctionnement des appareils | 109 |
| II.3 | Proposition d'une procédure de correction des mesures du curviamètre et du déflectographe Flash..... | 110 |
| II.3.1 | Choix de la fonction décrivant le bassin de déflexion..... | 111 |
| II.3.2 | Procédure de correction du bassin de déflexion..... | 115 |
| II.4 | Conclusion..... | 124 |
| III | Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion.... | 127 |
| III.1 | Introduction | 128 |
| III.2 | Calculs par éléments finis 3D pour la simulation des déflexions | 129 |
| III.2.1 | Définition des structures de chaussée..... | 129 |
| III.2.2 | Caractéristique du maillage | 129 |
| III.2.3 | Validation du modèle CESAR | 130 |
| III.2.4 | Modélisation des interfaces glissantes | 131 |
| III.2.5 | Simulation de l'avancement des appareils | 134 |
| III.3 | Etude de l'influence des défauts sur les indicateurs classiques de déflexion..... | 136 |
| III.3.1 | Détermination des valeurs de référence des indicateurs classiques de la mesure de déflexion..... | 136 |
| III.3.2 | Sensibilité des indicateurs à une interface glissante localisée..... | 138 |
| III.3.3 | Sensibilité des indicateurs à d'autres types de défauts..... | 144 |
| III.3.4 | Conclusion de la première partie..... | 146 |
| III.4 | Création d'indicateurs optimisés à grand rendement spécifiques d'un type de défaut donné... .. | 147 |
| III.4.1 | Mise en place d'indicateurs optimisés | 147 |
| III.4.2 | Etude du comportement des indicateurs sur des bassins de déflexion théoriques. | 159 |
| III.4.3 | Conclusion de la partie 2 | 174 |
| III.5 | Conclusion générale du chapitre | 175 |
| IV | Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites | 177 |
| IV.1 | Introduction | 178 |
| IV.2 | Principe de validation des procédures mises en place..... | 178 |
| IV.3 | Présentation des sites de mesure | 179 |
| IV.3.1 | Site de mesure du STAC | 180 |

Table des matières

| | | |
|----------|--|------------|
| IV.3.2 | Site de mesure de GAP..... | 187 |
| IV.4 | Evaluation de la procédure de correction des mesures du curviamètre | 190 |
| IV.4.1 | Résultats pour le Site du STAC..... | 190 |
| IV.4.2 | Résultats pour le site de GAP..... | 195 |
| IV.4.3 | Conclusions sur la procédure de correction des mesures du curviamètre..... | 198 |
| IV.5 | Evaluation des indicateurs optimisés du bassin de déflexion sur les deux sites expérimentaux | 199 |
| IV.5.1 | Résultats pour le site du STAC | 200 |
| IV.5.2 | Résultats pour le site de GAP..... | 201 |
| IV.6 | Bilan des procédures développées pour l'amélioration de l'interprétation des mesures du curviamètre..... | 208 |
| IV.7 | Application de la méthode des indicateurs à un site test présentant des défauts d'interfaces..... | 209 |
| IV.7.1 | Description du site du manège de fatigue | 209 |
| IV.7.2 | Réalisation et analyse préliminaire des mesures | 210 |
| IV.7.3 | Modélisation de la structure de chaussée | 212 |
| IV.7.4 | Comparaison des mesures réelles et des simulations numériques. | 217 |
| IV.7.5 | Calcul des indicateurs pour la détection des défauts dans la structure de chaussée..... | 220 |
| IV.7.6 | Bilan de l'évaluation des indicateurs pour la détection de défauts | 230 |
| IV.8 | Conclusion..... | 231 |
| V | Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire..... | 233 |
| V.1 | Introduction | 234 |
| V.2 | Description des sites et sélection des mesures | 234 |
| V.2.1 | Présentation des mesures de déflexion..... | 235 |
| V.3 | Détermination des structures de chaussée de référence | 236 |
| V.3.1 | Définition de la structure de référence pour la section 1..... | 238 |
| V.3.2 | Définition de la structure de référence pour la section 2..... | 239 |
| V.4 | Application de la procédure de correction des mesures du curviamètre..... | 241 |
| V.4.1 | Comparaison des niveaux de déflexion maximale..... | 241 |
| V.4.2 | Découpage en zones homogènes des itinéraires | 242 |
| V.4.3 | Bilan de la procédure de correction des déflexions..... | 243 |

Table des matières

| | | |
|-------------|--|------------|
| V.5 | Application des indicateurs optimisés pour la détection de défauts..... | 244 |
| V.5.1 | Mise en place des indicateurs..... | 244 |
| V.5.2 | Calcul des indicateurs pour les bassins de déflexion proches du bassin moyen..... | 250 |
| V.5.3 | Analyse des indicateurs pour différents niveaux de déflexion maximale, représentatifs de l'itinéraire..... | 254 |
| V.5.4 | Calcul des indicateurs sur l'ensemble de l'itinéraire..... | 257 |
| V.5.5 | Comparaison des indicateurs optimisés avec les indicateurs MLI et LLI..... | 260 |
| V.5.6 | Procédure de calcul inverse pour différents niveaux de <i>INSOL</i> | 261 |
| V.6 | Conclusion..... | 263 |
| VI | Conclusion générale | 267 |
| VII | Perspectives..... | 271 |
| VIII | Annexes | 273 |
| IX | Références bibliographiques | 301 |

Résumé

L'évaluation des caractéristiques structurelles des chaussées permet d'optimiser leur maintenance. La mesure de déflexion est une mesure de base de cette évaluation. Aujourd'hui, seuls la déflexion maximale et le rayon de courbure sont analysés. Pourtant, le curviamètre et le deflectographe relèvent le bassin de déflexion complet dont l'analyse permettrait d'extraire des paramètres plus sensibles à l'endommagement des chaussées. Actuellement, l'interprétation des mesures est seulement qualitative et aucun calcul inverse de l'état de dommage de la structure n'est réalisé. La thèse vise à améliorer l'interprétation des mesures de déflexion. Le fonctionnement des appareils a montré que leurs hypothèses de mesure conduisent à des biais de mesure. Pour pallier ce problème, une procédure de correction des mesures a été mise en place. La comparaison avec des bassins théoriques a montré que la méthode de correction était satisfaisante. Ensuite, une étude numérique visant à déterminer la sensibilité du bassin de déflexion à la présence de différents défauts a été conduite. Celle-ci a montré que les indicateurs classiques de la mesure de déflexion étaient peu sensibles à un endommagement dans la chaussée. Une méthodologie a donc été développée pour la création d'indicateurs optimisés à un type de défauts spécifiques. L'étude sur cas théoriques a conduit à l'obtention de résultats concluants. L'ensemble de ces travaux a ensuite été validé sur sites expérimentaux pour des mesures de répétabilité, mais également sur site avec la présence avérée de défauts. Finalement, la thèse a envisagé l'utilisation des travaux précédents sur des mesures réelles recueillies sur itinéraire.

Mots clés : Auscultation des chaussées, Essai non destructif, Bassins de déflexion, Correction des mesures de déflexion, indicateurs optimisés.

Table des Figures

| | |
|--|----|
| Figure I-1 : Structure de chaussée. | 33 |
| Figure I-2 : Sollicitations produites par le trafic dans la chaussée, à la verticale de la charge. | 37 |
| Figure I-3 : Effet de la température sur une structure de chaussée (Di Benedetto & Corte, 2005). | 38 |
| Figure I-4: Principe du modèle de BOUSSINESQ. | 38 |
| Figure I-5 : Diffusion des contraintes selon le modèle de Westergaard (Thiaw, 2006). | 39 |
| Figure I-6 : Diffusion des contraintes selon le modèle de Hogg (Thiaw, 2006). | 40 |
| Figure I-7 : Modèle multicouche de BURMISTER (Quijano Murillas, 2010). | 41 |
| Figure I-8 : Exemple de représentation de dégradations sur schéma itinéraire sur chaussée mixte (SETRA, 2009). | 46 |
| Figure I-9: Vue générale d'un FWD (Braber & Henia, 2008). | 50 |
| Figure I-10 : Principe de mesure du FWD (Wurckler, 2010). | 51 |
| Figure I-11: Poutre de Benkelman. | 51 |
| Figure I-12: Principe de mesure de la poutre Benkelman. | 52 |
| Figure I-13 : Défectographe Flash. | 53 |
| Figure I-14 : Géométrie de la poutre des défectographes (début de mesure) (Keymanesh, 2001). | 54 |
| Figure I-15: Principe de fonctionnement du défectographe Lacroix (Braber & Henia, 2008) (Autret, 1972). | 55 |
| Figure I-16 : Vue globale d'un curviamètre. | 56 |
| Figure I-17: Principe de mesure du curviamètre (Paquet, 1977). | 56 |
| Figure I-18 : Vue générale du TSD (Baltzer, et al., 2010). | 57 |
| Figure I-19: Vue générale du système du RWD (Elseifi, et al., 2012). | 57 |
| Figure I-20 : Méthode de triangulation (Elseifi, et al., 2012). | 58 |
| Figure I-21 : Raptor (Dynatest, 2018). | 59 |
| Figure I-22 : Comparaison des valeurs de déflexions maximales mesurées par les différents appareils avec la déflexion de référence obtenue par le capteur ancré, pour des déflexions inférieures à 50 mm/100 (Simonin, et al., 2015). | 63 |
| Figure I-23 : Comparaison des déflexions maximales mesurées par le FWD et par le Raptor (RWD) sous la charge (Dynatest, 2018). | 65 |
| Figure I-24 : Bassins de déflexions simulés avec ABAQUS pour une charge dynamique pour une chaussée avec et sans fissure (Uddin, 1994). | 68 |

Table des Figures

| | |
|---|-----|
| Figure I-25 : Description de la structure semi-rigide avec la position des défauts (Simonin, et al., 2015)..... | 69 |
| Figure I-26 : Influence de la distance entre la charge et une fissure verticale sur la mesure de déflexion (Simonin, et al., 2015)..... | 69 |
| Figure I-27 : Influence de la largeur de la fissure transversale et de la position de la mesure sur le bassin de déflexion. (Qiu, et al., 2014)..... | 70 |
| Figure I-28 : Influence de la largeur de la fissure longitudinale sur la mesure de déflexion (Qiu, et al., 2014). | 70 |
| Figure I-29 : Evolution des bassins de déflexions pour différentes longueurs d’interface glissante (Chea & Martinez, 2005). | 71 |
| Figure I-30 : Evolution du rayon de courbure en présence d’un défaut d’interface (Chea & Martinez, 2008), (Simonin, et al., 2015). | 71 |
| Figure I-31 : Courbes de la dérivée première des bassins de déflexions au voisinage d’un défaut d’interface de longueur a (Chea, 2006)..... | 72 |
| Figure I-32: Déflexion et rayon de courbure de la déformée sous une charge roulante (SETRA, 2009)..... | 74 |
| Figure I-33 : Découpage du bassin de déflexion (Horak & Emery, 2009). | 76 |
| Figure I-34 : Allure de la variation du module de surface en fonction de la distance à la charge (Ullidtz, 1987). | 77 |
| Figure I-35: Algorithme de détermination de l’indicateur SSI ; (Flora, et al., 2010) | 84 |
| Figure I-36 : Superposition des méthodes de découpage CRR, LCPC et COST 336..... | 88 |
| Figure II-1 : Fonctionnement de la poutre du déflectographe non modifié (De Boissoudy, et al., 1984)..... | 95 |
| Figure II-2 : Calcul de la déflexion mesurée (De Boissoudy, et al., 1984)..... | 95 |
| Figure II-3: Capture écran Alizé (Balay, 2013) - Visualisation du cas de chargement du Déflectographe Flash..... | 97 |
| Figure II-4 : Signal de déformation enregistré à la base de la chaussée lors du passage d’une roue à vitesse constante (Baaj, 2002). | 98 |
| Figure II-5: Influence de la fréquence sur un bassin de déflexion sous jumelage de référence - Structure bitumineuse..... | 99 |
| Figure II-6 : Bassins de déflexion absolus sous l’appareil calculés avec ALIZE. (1) Déflectographe Flash – (2) Curviamètre – Structure bitumineuse..... | 100 |
| Figure II-7 : Simulation des bassins de déflexion mesurés par les appareils avec ALIZE - (1) Déflectographe Flash – (2) Curviamètre - Structure bitumineuse. | 101 |
| Figure II-8 : Simulations des bassins de déflexion absolus sous l’appareil, mesurés par les appareils et de référence sous jumelage de standard ; (1) Déflectographe Flash – (2) Curviamètre – Structure bitumineuse..... | 102 |

Table des Figures

| | |
|---|-----|
| Figure II-9: Ecart maximum de justesse de la mesure de déflexion pour différents appareils - Structure bitumineuse..... | 103 |
| Figure II-10 : Ecart maximum de justesse des différents appareils, pour différentes portances de plateforme - Structure bitumineuse. | 106 |
| Figure II-11 : Ecart maximum de justesse des différents appareils, pour différentes épaisseurs de plateforme - structure bitumineuse..... | 108 |
| Figure II-12 : Modèle bicouche de Hogg (1944). | 112 |
| Figure II-13 : Comparaison des trois modèles pour le cas d'une roue isolée - Structure bitumineuse. | 114 |
| Figure II-14 : Algorithme du processus de correction des mesures de bassins de déflexion en utilisant le modèle de Jouve&Martinez..... | 115 |
| Figure II-15 : Comparaison entre les bassins de déflexion mesurés par les appareils, avec et sans correction sous un jumelage de référence - (1) Défectographe Flash – (2) Curviamètre - Structure bitumineuse..... | 121 |
| Figure II-16 : Capture écran ALIZE - module « rétro-calcul » - comparaison du bassin de déflexion issu du rétrocalcul (sans correction) avec le bassin mesuré par le curviamètre, structure bitumineuse. | 123 |
| Figure II-17 : Capture écran ALIZE - module « rétro-calcul » - Comparaison du bassin de déflexion issu du rétrocalcul (après correction) avec le bassin mesuré par le curviamètre - Structure bitumineuse..... | 124 |
| Figure III-1 : Maillage utilisé pour simuler l'avancement des appareils le long d'un itinéraire – (1) Sans déformée – (2) Avec déformée. | 130 |
| Figure III-2 : Comparaison des bassins de déflexion sous jumelage de référence simulés avec ALIZE et CESAR – défaut généralisé à 6cm de profondeur - Chaussée bitumineuse. | 133 |
| Figure III-3: Bassins de déflexion sous camion complet pour des chaussées sans défaut ou avec décollement localisé à 6cm de profondeur – Chaussée bitumineuse (1) Curviamètre – (2) Défectographe Flash..... | 134 |
| Figure III-4 : Vue du dessus des positions de charges du curviamètre en fonction de son avancement avec présence d'un défaut localisé (cas d'une interface glissante). | 135 |
| Figure III-5 : Vue du dessus des positions de charges du défectographe Flash en fonction de son avancement avec présence d'un défaut localisé (cas d'une interface glissante)..... | 135 |
| Figure III-6 : Simulation des bassins de déflexion mesurés le long de l'itinéraire dont l'interface glissante est localisée et se situe à 6cm de profondeur – Chaussée bitumineuse – (1) Curviamètre – (2) Défectographe Flash..... | 139 |
| Figure III-7 : Comparaison des pentes pour différentes positions de mesure – Chaussée bitumineuse – (1) Curviamètre – (2) Défectographe Flash..... | 140 |
| Figure III-8 : Evolution des indicateurs classiques à l'approche d'un décollement localisé – Curviamètre..... | 141 |

Table des Figures

| | |
|---|-----|
| Figure III-9 : Bassins de déflexion avec décollement localisé à 6cm de profondeur (1) - décollement localisé à 14cm de profondeur (2) - Chaussée bitumineuse. | 143 |
| Figure III-10 : Structure multicouche sans défaut composée de N couches de modules $E_{i0}, i = 1, \dots, n$ ou $E_{ibloqué}, i = 1, \dots, N - n$ appelée aussi structure de référence. | 148 |
| Figure III-11 : Structure multicouche avec défaut composée de n couches de modules $E_i = E_{i0} + \Delta E_i(x, y)$ | 149 |
| Figure III-12 : Structure multicouche avec défaut composée de n couches de modules $E_i = E_{i0} + \Delta E_i(x, y)$ | 149 |
| Figure III-13 : Visualisation de l'indicateur normalisé I_{NJ} en fonction de l'indicateur I_j | 154 |
| Figure III-14: Exemple de variations de IN_j en fonction de E_j (Calcul effectué pour $IN_{jwcal} \bullet, E_{10}, \dots, E_j - 10, E_j, E_j + 10, \dots, E_{n0}$ chaussée bitumineuse..... | 155 |
| Figure III-15 : Structure multicouche de référence au voisinage d'un jeu de paramètres $E_{j0}, E_{jbloqué}, kint j_0$ | 158 |
| Figure III-16 : Fonctions de pondération créées pour les variations de module des couches – (1) Curviamètre – (2) Défectographe Flash. | 160 |
| Figure III-17 : Comparaison des fonctions de pondération $P_P(x)$ calculées sur chaussée bitumineuse, souple et mixte – Curviamètre (1) – Défectographe Flash (2). | 161 |
| Figure III-18 : Comparaison des indicateurs normalisés calculés avec les deux appareils pour la chaussée bitumineuse – I_{NB} (1) – I_{NP} (2) | 162 |
| Figure III-19 : Evolution de (1) - l'indicateur I_B en fonction d'une modification du module de la couche bitumineuse pour différents modules de la plateforme et de (2) - l'indicateur I_P en fonction d'une modification de la plateforme pour différents modules de la couche bitumineuse- Chaussée bitumineuse | 163 |
| Figure III-20 : Sensibilité des indicateurs normalisés à un changement de modules des couches de la chaussée bitumineuse étudiée. | 164 |
| Figure III-21 : Comparaison des variations des indicateurs classiques avec les indicateurs optimisés calculés pour le curviamètre et le défectographe Flash – (1) Comparaison pour un changement de module de la couche bitumineuse – (2) Comparaison pour un changement de module de la plateforme. | 165 |
| Figure III-22 : Hypothèses d'évolution des modules des couches de la couche bitumineuse (1) et de la plateforme (2) – Structure bitumineuse. | 165 |
| Figure III-23 : Variation de l'indicateur en fonction de l'évolution du module – (1) I_B – (2) I_P - Structure bitumineuse. | 167 |
| Figure III-24 : Variation de l'indicateur normalisé en fonction de l'évolution du module – (1) I_{NB} – (2) I_{NP} – Défectographe Flash - Structure bitumineuse..... | 168 |
| Figure III-25 : Fonctions de pondération créées pour les défauts d'interfaces – (1) Curviamètre – (2) Défectographe Flash. | 170 |

Table des Figures

| | |
|---|-----|
| Figure III-26 : Comparaison des fonctions de pondération $P_{INT D1}$ pour les trois structures étudiées – (1) Curviamètre – (2) Défectographe Flash (2)..... | 170 |
| Figure III-27 : Variation de l'indicateur caractérisant un décollement d'interface en fonction de la profondeur – Curviamètre – Structure bitumineuse. | 171 |
| Figure III-28 : Evolution de (1) l'indicateur $ININT j$ en fonction d'une modification du module des couches de chaussée. (1) Couche de surface, couche bitumineuse n°2, couche bitumineuse n°3 (2) Plateforme – Curviamètre..... | 173 |
| Figure III-29 : Evaluation de la sensibilité des indicateurs classiques et optimisés à la présence de défauts d'interface. | 174 |
| Figure IV-1 : Méthode suivie dans ce chapitre pour la validation des procédures de correction et d'analyse des mesures du curviamètre. | 179 |
| Figure IV-2 : Appareils de mesure de déflexion étudiés durant les essais croisés du STAC. | 180 |
| Figure IV-3 : Dimensions de la planche instrumentée du STAC..... | 181 |
| Figure IV-4 : Réalisation des mesures du curviamètre sur la planche instrumentée du STAC. | 182 |
| Figure IV-5: Bassins de déflexion mesurés par le curviamètre – Mesures au point B. | 183 |
| Figure IV-6: Algorithme pour la détermination des modules de la structure de référence.... | 185 |
| Figure IV-7 : Comparaison entre les bassins de déflexion mesurés par le curviamètre et le bassin de déflexion simulé, sur la structure de référence – Point B. | 186 |
| Figure IV-8: Bassins de déflexion mesurés par le curviamètre - (1) Section 3– (2) Section 4. | 188 |
| Figure IV-9: Structures des chaussées du site de Gap - (1) Section 3 - (2) Section 4..... | 189 |
| Figure IV-10 : Comparaison du bassin moyen mesuré et du bassin du modèle simulé par ALIZE et mesuré par le curviamètre – (1) Section 3 – (2) Section 4. | 190 |
| Figure IV-11 : Comparaison entre le bassin de référence sous jumelage de référence, et les bassins mesurés par le curviamètre avec et sans correction– Point B..... | 191 |
| Figure IV-12 : Comparaison entre le bassin de référence et ceux déduits du calcul inverse de la moyenne des modules rétrocalculés pour les mesures corrigées et non corrigées. | 194 |
| Figure IV-13 : Comparaison, pour chaque section, du bassin de référence sous jumelage standard, du premier bassin mesuré et du bassin corrigé déduit de cette mesure– Section 3 (1) – Section 4 (2). | 195 |
| Figure IV-14: Comparaison entre le bassin de référence et ceux déduits du calcul inverse des modules sur mesures corrigées ou non..... | 198 |
| Figure IV-15 : Comparaison des indicateurs normalisés optimisés pour les trois passages – Point B..... | 201 |
| Figure IV-16 : Evolution des indicateurs I_{Nj} pour les différents passages du curviamètre – (1) Section 3 – (2) Section 4. | 204 |

Table des Figures

| | |
|---|-----|
| Figure IV-17 : Evolution des indicateurs I_{Nj} pour les différents passages du curviamètre – (1) Section 3 - (2) Section 4. | 207 |
| Figure IV-18 : manège de fatigue – (1) : vue des défauts avant la pose de la couche de roulement (2) : Représentation graphique de la position des différents défauts sur la piste du manège (2) (Simonin, et al., 2016). | 210 |
| Figure IV-19 : Déflexions mesurées par chaque géophone du FWD le long de la section d’essai. | 211 |
| Figure IV-20 : Bassins de déflexion moyens mesurés par le FWD au-dessus des différents défauts. | 212 |
| Figure IV-21 : Comparaison de bassins simulés avec ALIZE avec interface « ½ collée » et prise en compte d’une couche mince de 2 mm et de module 41 MPa. | 214 |
| Figure IV-22 : Récapitulatif les dimensions du modèle de calcul, de la localisation des défauts d’interface et des positions extrêmes de mesure du FWD. | 215 |
| Figure IV-23 : Vue du maillage initial de la structure (1) et du maillage déformé (2) pour la première position de la charge. | 216 |
| Figure IV-24 : Comparaison des bassins de déflexion sous le chargement du FWD obtenus avec une charge rectangulaire ou circulaire. | 217 |
| Figure IV-25: Comparaison entre les bassins mesurés par le FWD et simulés avec CESAR et ALIZE - (1) Sans défaut – (2) Centre du défaut sable – (3) Centre du défaut textile – (4) Centre du défaut « sans couche d’accrochage ». | 218 |
| Figure IV-26 : Comparaison des déflexions maximales (D_0) mesurées par le géophone du FWD et calculées avec ALIZE et CESAR, le long de la section de chaussée étudiée. | 220 |
| Figure IV-27 : Comparaison entre le bassin mesuré et le bassin interpolé défini par 37 points. | 221 |
| Figure IV-28 : Etude de sensibilité des indicateurs à une variation de module des couches – (1) Couche de matériau bitumineux – (2) GNT – (3) Sol. | 224 |
| Figure IV-29 : Evolution des indicateurs relatifs aux modules, calculés à partir des mesures réelles et des bassins simulés avec CESAR, le long de la section d’essai– (1) – I_{NMBk} (2) – I_{NGNTk} - (3) I_{NSOLk} | 226 |
| Figure IV-30 : Evolution de l’indicateur $I_{NS/Tk}$ caractérisant l’état de l’interface, déterminé à partir des mesures réelles ou des bassins simulés, le long de la section d’essai. | 230 |
| Figure V-1 : Représentation de la déflexion maximale en fonction du rayon de courbure pour les deux structures et les deux sens de circulation. | 236 |
| Figure V-2 : Bassins moyens déterminés pour chaque série de mesure. | 238 |
| Figure V-3 : Comparaison entre les bassins moyens mesurés pour les deux sens de circulation et le bassin simulé avec ALIZE pour le curviamètre. | 239 |

Table des Figures

| | |
|--|-----|
| Figure V-4 : Comparaison entre le bassin moyen et la simulation du bassin mesuré par le curviamètre sur la structure de référence – Section 2 - Sens 1 (1) - Sens 2 (2). | 240 |
| Figure V-5 : Comparaison entre les valeurs de déflexion maximale issues de la procédure de correction et les valeurs mesurées par le curviamètre, pour les 4 séries de mesures. | 242 |
| Figure V-6 : Découpage en zones homogènes de la déflexion caractéristique - Sens 1 - Section 1 (1) – Section 2 (2)..... | 243 |
| Figure V-7 : Comparaison entre les bassins moyens mesurés pour les deux sens de circulation et le bassin simulé avec la structure de référence..... | 247 |
| Figure V-8 : Evaluation de la sensibilité des indicateurs à un changement de modules de couche ou d'état d'interface (1) Module de la couche de surface – (2) Module de la couche bitumineuse – (3) Module du sol – (4) Etat d'interface entre la couche de surface et la couche bitumineuse. | 249 |
| Figure V-9 : Evolutions des indicateurs normalisés pour les bassins proches du bassin de déflexion moyen — Section 1 (1) – Section 2 (2) – sens 2..... | 252 |
| Figure V-10 : Comparaison entre les bassins de déflexions simulés pour les structures de référence et les bassins mesurés, pour les points de mesure où les valeurs des indicateurs sont les plus importantes – Section 1 (1) – Section 2 (2)..... | 253 |
| Figure V-11 : Evolution des indicateurs I_{NBDR} , I_{NMB} , I_{NINT} et I_{NSOL} selon le niveau de déflexion de l'intervalle. | 255 |
| Figure V-12 : Comparaison des indicateurs et de la déflexion maximale sur tout l'itinéraire – Section 1 (1)(2)(3)- Section 2 (4)(5)(6)..... | 259 |
| Figure V-13 : Etude de l'allure de MLI en fonction de I_{NMB} , I_{NINT} (1) et de LLI en fonction de I_{NSOL} (2)..... | 261 |
| Figure V-14 : Comparaison de bassins ayant le même niveau de déflexion mais un seuil de valeurs de INSOL différent ou un même seuil de valeurs de INSOL mais une déflexion différente –Section 1 (1) – Section 2 (2). | 262 |

Table des Tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau I-1 : Structures des différents types de chaussée..... | 35 |
| Tableau I-2 : Classement en zones en fonction du pourcentage de fissures/faïençage (SETRA, 2009)..... | 45 |
| Tableau I-3 : Classement des déformations permanentes : orniérage dans les bandes de roulement et affaissements de rive (SETRA, 2009)..... | 45 |
| Tableau I-4 : Classement en zones homogènes en fonction du nombre par 100 m de fissures transversales pour les chaussées inverses, à assise traitée aux liants hydrauliques et mixtes (SETRA, 2009)..... | 46 |
| Tableau I-5 : Caractéristiques géométriques des différents déflectographes (Keymanesh, 2001)..... | 54 |
| Tableau I-6 : Ecart maximum en justesse et répétabilité pour la mesure de déflexion et de courbure pour chaque classe d'appareil (Simonin, 1997)..... | 59 |
| Tableau I-7 : Estimation des intervalles de mesure pour les différents appareils d'auscultation. | 63 |
| Tableau I-8 : Lois de correction de la déflexion maximale avec la température, pour les chaussées bitumineuses. | 68 |
| Tableau I-9 : Classes de déflexion caractéristique (SETRA, 2009)..... | 73 |
| Tableau I-10 : Classes de rayons de courbure..... | 75 |
| Tableau I-11 : Modules déterminés par calcul inverse pour le curviamètre et le FWD. (Van Geem, 2017)..... | 82 |
| Tableau I-12 : Etat structurel d'une chaussée selon le système RAG (Horak & Emery, 2009). | 83 |
| Tableau I-13: Classes de déflexion. | 87 |
| Tableau II-1 : Structures de chaussées étudiées. | 93 |
| Tableau II-2 : Fréquences de sollicitation en fonction de la vitesse de roulement (Baaj, 2002). | 98 |
| Tableau II-3 : Ecart relatif entre la déflexion maximale de référence sous le jumelage standard et celle de la mesure des appareils pour différentes structures de chaussées et différentes températures. | 104 |
| Tableau II-4 : Classification des écarts relatifs entre la déflexion maximale sous le jumelage de référence et celle de la mesure des appareils..... | 105 |
| Tableau II-5 : Ecart relatif entre la déflexion maximale sous le jumelage de référence et celle de la mesure des appareils pour différents niveaux de portance de la plateforme..... | 107 |

Table des Tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau II-6 : Influence de l'épaisseur de la plateforme sur la déflexion maximale, pour différents appareils, pour une structure bitumineuse..... | 109 |
| Tableau II-7 : Méthode de construction du bassin simulé J&M pour le déflectographe Flash. | 116 |
| Tableau II-8 : Méthode de construction du bassin simulé J&M pour le Curviamètre. | 117 |
| Tableau II-9 : Intervalles de variation des paramètres d , λ et n pour la construction des abaques. | 118 |
| Tableau II-10: Méthode de construction du bassin de déflexion sous jumelage standard. | 119 |
| Tableau II-11 : Gain de justesse en déflexion maximale après correction pour le curviamètre et le déflectographe Flash..... | 122 |
| Tableau II-12 : Ecart relatif entre le module d'Young original et les modules déterminés par calcul inverse avec et sans correction – Structure bitumineuse. | 123 |
| Tableau II-13 : Ecart maximum entre le module d'Young d'origine et le module rétro-calculés pour le curviamètre et le déflectographe Flash sur les cinq structures de l'étude..... | 124 |
| Tableau III-1 : Structures de chaussée étudiées. | 129 |
| Tableau III-2 : Dimension du modèle de chaussée. | 130 |
| Tableau III-3 : Comparaison des caractéristiques des charges utilisées dans les modèles ALIZE et CESAR-LCPC. | 131 |
| Tableau III-4 : Positions possibles de l'interface glissante dans les chaussées étudiées | 133 |
| Tableau III-5 : Valeurs des indicateurs classiques de la mesure de déflexion pour les chaussées étudiées (sans défaut), et valeurs correspondantes de justesse et de répétabilité de la déflexion maximale et de la courbure. | 137 |
| Tableau III-6 : Indicateurs classiques déterminés suite à la procédure de correction sur les bassins de déflexion des structures de chaussées de référence. | 138 |
| Tableau III-7 : Comparaison des valeurs des indicateurs classiques obtenues pour différents cas de décollement local, pour le curviamètre et le déflectographe Flash, le long de l'itinéraire. | 142 |
| Tableau III-8 : Indicateurs classiques normalisés déterminés à partir des bassins corrigés sous jumelage standard pour des décollements localisés. | 144 |
| Tableau III-9 : Indicateurs classiques pertinents à la détection d'un type de défauts..... | 146 |
| Tableau III-10 : Structures de chaussée étudiées, avec plans de glissement d'interface en rouge..... | 169 |
| Tableau III-11 : Indicateurs ININT j calculés pour un défaut localisé pour les trois structures et pour les différentes profondeurs de défauts..... | 172 |
| Tableau III-12 : Variation de l'indicateur normalisé en fonction de l'évolution du module – Structure bitumineuse..... | 173 |

Table des Tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau IV-1 : Caractéristiques des couches de chaussée. | 181 |
| Tableau IV-2 : Analyse de la dispersion des mesures du curviamètre..... | 184 |
| Tableau IV-3 : Modules de référence des couches de chaussée pour chaque point de mesure. | 187 |
| Tableau IV-4 : Analyse de la dispersion des mesures du curviamètre..... | 188 |
| Tableau IV-5 : Calage des modules des couches de chaussées du site de GAP. | 189 |
| Tableau IV-6 : Comparaison de la déflexion maximale mesurée par le curviamètre avec et sans correction et des paramètres optimisés issus de la procédure de correction – Site du STAC..... | 192 |
| Tableau IV-7: Ecarts relatifs entre les modules d'Young de référence et les modules déterminés par calcul inverse – Site du STAC..... | 193 |
| Tableau IV-8 : Comparaisons des indices ICI pour les quatre points de mesure – Site du STAC..... | 195 |
| Tableau IV-9 : Comparaison de la déflexion maximale mesurée par le curviamètre avec et sans correction et des paramètres optimisés issus de la procédure de correction – Site de Gap. | 196 |
| Tableau IV-10 : Comparaison entre les modules de référence et les modules d'Young estimés par calcul inverse à partir des mesures du curviamètre, avec et sans correction - entre parenthèses, l'écart relatif avec la valeur de référence..... | 197 |
| Tableau IV-11 : Comparaison des indices ICI PC pour les deux sections de chaussées – Site de GAP. | 198 |
| Tableau IV-12 : Comparaison des moyennes et des intervalles de variation des différents indicateurs normalisés, portant sur les modules des couches de chaussées, pour les quatre points de mesure..... | 201 |
| Tableau IV-13 : Comparaison des indices ISimAC caractérisant l'écart entre le bassin simulé par ALIZE pour la structure de référence, et pour les variantes, où le module d'une couche a été modifié – Section 3 et Section 4. | 205 |
| Tableau IV-14 : Structure de chaussée obtenue pour la section 3, après regroupement des deux couches d'assise bitumineuses. | 206 |
| Tableau IV-15 : Comparaison des indices ISimAC caractérisant l'écart entre les bassins simulés avec ALIZE pour la structure de référence et pour les variantes, où le module d'une couche a été modifié – Section 3..... | 207 |
| Tableau IV-16 : Comparaison des moyennes et des intervalles de variation des différents indicateurs normalisés, portant sur les modules des couches de chaussées - Sections 3 et 4. | 208 |
| Tableau IV-17 : Structure de la chaussée du manège de fatigue..... | 209 |
| Tableau IV-18 : Caractéristiques des trois défauts choisis pour l'analyse des indicateurs (Simonin, et al., 2013; Simonin, et al., 2013). | 210 |

Table des Tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau IV-19 : Etendue de variation de l'indice Imoybassin qui caractérise l'écart entre le bassin moyen et les différents bassins mesurés..... | 212 |
| Tableau IV-20 : Modules obtenus par calcul inverse pour les bassins sans défaut (1) –et avec le défaut sable ou textile (2). | 213 |
| Tableau IV-21 : Caractéristiques du chargement du FWD selon la géométrie de la plaque . | 216 |
| Tableau IV-22 : valeurs de l'indice ISimMmoy , caractérisant l'écart entre les bassins moyens mesurés et les bassins simulés avec ALIZE et CESAR..... | 219 |
| Tableau IV-23 : Valeurs des indices ISimCC caractérisant l'écart obtenu sur le bassin de déflexion lorsqu'on fait varier le module d'une des couches de la structure d'un facteur 2.. | 222 |
| Tableau IV-24 : structure de chaussée utilisée pour la construction des indicateurs relatifs aux modules des couches. | 222 |
| Tableau IV-25 : Valeurs des indices ISimCc caractérisant l'écart obtenu entre le bassin de déflexion de la structure sans défaut, et avec défaut d'interface..... | 228 |
| Tableau IV-26 : Structure de la chaussée utilisée pour la construction des indicateurs d'état des interfaces. | 229 |
| Tableau V-1 : Structures de chaussées fournies par le gestionnaire pour les 2 itinéraires routiers..... | 235 |
| Tableau V-2 : Comparaison de paramètres de la mesure de déflexion obtenus pour les deux sections expérimentales..... | 235 |
| Tableau V-3 : Intervalles de valeurs utilisés pour le choix des bassins de déflexion « moyens ». | 237 |
| Tableau V-4 : Nombre de bassins retenus pour le calcul du bassin moyen, suivant les critères de sélection et la série de mesure. | 237 |
| Tableau V-5: Analyse de la dispersion des mesures du curviamètre pour les bassins représentatifs des bassins moyens. | 237 |
| Tableau V-6 : Structure de chaussée de référence de la section 1 | 238 |
| Tableau V-7 : Structures de chaussées de référence obtenues pour la section 2, pour les deux sens de circulation. | 240 |
| Tableau V-8 : Seuils des indicateurs décrivant l'état des couches étudiées..... | 246 |
| Tableau V-9 : Calcul de l'indice ISimAC caractérisant l'écart obtenu sur le bassin de déflexion lorsque le module d'une couche est modifié..... | 246 |
| Tableau V-10 : Section 1 – structure de chaussée de référence modifiée..... | 247 |
| Tableau V-11 : Calcul de l'indice ISimAC caractérisant l'écart obtenu sur le bassin de déflexion lorsque le module d'une couche est modifié..... | 250 |
| Tableau V-12 : Comparaison des étendues, moyennes et nombre d'indicateurs hors limites pour les deux sections étudiées et dans les deux sens de circulation. | 254 |

| | |
|--|-----|
| Tableau V-13 : Intervalles de déflexions maximales considérées pour la prise en compte des bassins. | 254 |
| Tableau V-14 : Détermination du nombre d'indicateurs mentionnant un état sain, partiellement dégradé ou totalement endommagé de la couche ou de l'interface étudiée selon l'intervalle de déflexion maximale – Section 1 –Section 2..... | 256 |
| Tableau V-15 : Comparaison des modules déterminés par calcul inverse à partir des bassins de déflexion corrigés avec les niveaux des indicateurs optimisés. | 263 |

Introduction générale

La France dispose d'un patrimoine routier de plus d'un million de kilomètres estimé en valeur à neuf à 2000 milliards d'euros. Actuellement, il assure 85 % du transport de personnes et de marchandises et ce chiffre continue de croître. La conservation de ce réseau routier est essentielle et impacte l'économie. Cependant, les restrictions budgétaires actuelles nécessitent une optimisation des crédits d'entretien et une planification pluriannuelle des travaux. Ainsi, les gestionnaires routiers cherchent à définir et à optimiser les ressources financières à mettre en place pour maintenir l'état de leur réseau.

La construction ou le renforcement du réseau routier ont été principalement effectués entre les années 1970 et 2000. Les structures de chaussées ont été dimensionnées pour une période d'environ 20 ans, même si, en raison du faible risque pris, les structures peuvent résister quelques années supplémentaires. À présent, les gestionnaires routiers cherchent à optimiser la maintenance de leur réseau, en visant souvent à prolonger la durée de vie de l'infrastructure. Cette optimisation peut s'effectuer par l'intermédiaire d'évaluations périodiques de leur réseau, qui peuvent se décomposer en une évaluation des caractéristiques de surface (sécurité, adhérence, confort et bruit) et une évaluation des caractéristiques de structure. Cette thèse s'intéresse plus particulièrement à la structure qui représente la part la plus importante du patrimoine en cas de reconstruction. L'enjeu de ce travail de thèse est de répondre aux besoins actuels des gestionnaires de chaussée en matière d'auscultation routière.

L'évaluation structurelle des chaussées est basée principalement sur trois types d'informations :

- La fissuration observable en surface qui vient de l'endommagement mécanique (le trafic) pour les couches bitumineuses et également de la fissuration thermique et de retrait pour les chaussées à structure en matériaux traités aux liants hydraulique ;
- Les déformations permanentes mesurables en surface, liées principalement aux déformations permanentes des couches non traitées sous l'action du trafic pour les structures appelées souples.
- La mesure de déflexion, déformation sous l'action d'une charge lourde, qui permet d'évaluer la rigidité de la chaussée. La déflexion permet d'estimer (par des méthodes de calcul inverse) les modules d'Young des différentes couches de chaussée, et de s'en servir pour estimer la durée de vie résiduelle de la chaussée. La thèse s'intéresse à cette mesure qui permet d'évaluer les caractéristiques mécaniques de la chaussée.

La mesure de déflexion est historiquement une mesure de base de l'évaluation structurelle. Elle donne une image de la rigidité globale de la structure. Actuellement, les mesures de déflexion sont utilisées à l'échelle locale, pour estimer la durée de vie résiduelle d'une chaussée ou à l'échelle d'un itinéraire, pour détecter des zones homogènes ou dégradées. Cependant, leur utilisation est de moins en moins répandue en raison du coût financier de ces mesures, effectuées par des appareils circulant à faible vitesse d'une part, et de l'interprétation

Introduction générale

limitée des résultats d'autre part. En effet, aujourd'hui, seuls la déflexion maximale et éventuellement le rayon de courbure sont exploités pour l'évaluation structurelle. Pourtant, les appareils d'auscultation tels que le déflectographe et le curviamètre permettent de relever un bassin de déflexion complet. Il semble donc possible de mieux exploiter ces bassins de déflexion complets, afin de mieux caractériser l'état de la structure de chaussée, en s'inspirant de ce qui est fait pour le FWD (calcul inverse des modules, ou calcul de différents indicateurs). Cependant, si on compare les mesures de ces appareils à grand rendement avec des mesures de référence, réalisées avec un capteur de déplacement ancré par exemple, on se rend compte que ces appareils présentent des biais de mesure significatifs, liés à leur principe de fonctionnement. Ces biais de mesure rendent souvent les résultats des calculs inverses peu satisfaisants.

L'objectif principal de la thèse repose donc sur l'amélioration de l'interprétation des mesures de bassins de déflexion du déflectographe et du curviamètre. Pour cela, on s'intéressera à l'analyse des mesures à l'échelle locale, puis à l'échelle d'un itinéraire. Nous chercherons dans un premier temps à mettre en place une procédure de correction des mesures de déflexion de ces appareils d'auscultation afin de réduire les biais de mesure et d'améliorer les résultats de calcul inverse des modules des couches de chaussée. Dans un second temps, on cherchera à exploiter les bassins de déflexion, en vue de d'identifier différents types de dégradations, tels que des baisses de module d'une couche de chaussée, ou des décollements d'interfaces. Par la pondération de la forme des bassins de déflexion, des indicateurs structurels sensibles à un type de défaut donné seront mis en place. Ces travaux seront d'abord validés théoriquement puis expérimentalement à l'échelle locale puis à l'échelle d'un itinéraire. Ces travaux visent ainsi à optimiser l'utilisation des appareils de mesure de déflexion (déflectographes et curviamètre), pour le diagnostic des structures de chaussées, pour l'estimation de leur durée de vie et pour le choix de solutions d'entretien appropriées.

Ce mémoire de thèse se décompose en cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique. Après une présentation générale des principales caractéristiques des chaussées, il s'intéresse aux différentes méthodes d'auscultation des chaussées, utilisées pour mesurer leurs caractéristiques de surface et leurs caractéristiques structurelles. Cette thèse s'intéresse aux caractéristiques structurelles, qui sont les plus importantes pour la durabilité des chaussées. Parmi les méthodes d'évaluation structurelle, la mesure de la déformation sous charge, encore appelée mesure de déflexion, est la plus utilisée. Elle permet de déterminer les caractéristiques mécaniques de la chaussée.

La deuxième partie de ce premier chapitre est consacrée aux méthodes de mesure de la déflexion. Dans un premier temps, les différents appareils de mesure de déflexion sont présentés. Ils se différencient par leur fonctionnement, leur principe de mesure ou encore leurs performances métrologiques. Ensuite, les paramètres influant sur la mesure sont abordés. Pour les chaussées bitumineuses, la température et la fréquence de chargement ont une grande influence, en raison du comportement visco-élastique, et sensible à la température des enrobés bitumineux. Enfin, les défauts de chaussée ont une influence importante sur la mesure

Introduction générale

puisqu'ils font varier la déflexion maximale, et également la forme du bassin. Ce chapitre se termine par la présentation de différentes méthodes d'exploitation de la mesure de déflexion. A l'échelle locale, les mesures sont utilisées pour estimer la durée de vie résiduelle à l'aide du calcul inverse des modules des couches de chaussées. A l'échelle d'un réseau, elles sont utilisées pour déterminer des zones dégradées. Différents indicateurs calculés à partir du bassin de déflexion sont employés à ces deux niveaux.

Le second chapitre s'intéresse tout d'abord à l'évaluation théorique du fonctionnement du curviamètre et des déflectographes. Après avoir analysé les principes de mesures de ces appareils, leurs mesures sont comparées avec des bassins de déflexion de référence, calculés avec le logiciel ALIZE, sous un essieu de référence (essieu à roues jumelées, chargé à 130 kN). Cette étude montre que ces appareils sous-estiment la déflexion réelle, et modifient également la forme réelle des bassins de déflexion. En raison de ces biais de mesure, l'utilisation des mesures des déflectographe et du curviamètre pour le calcul inverse des modules des couches de chaussées conduit à des résultats peu satisfaisants. Pour pallier ce problème, des procédures originales de correction des mesures de déflexion ont été développées pour le curviamètre et le déflectographe Flash. Leur principe consiste à prendre en compte l'effet de l'ensemble des essieux du camion de mesure sur la déflexion, et le principe de fonctionnement des appareils, pour corriger le bassin de déflexion mesuré. Ces procédures de correction ont ensuite été validées, en comparant les bassins corrigés avec des bassins de déflexions théoriques calculés sous un essieu de 130 kN, pour différents types de structures de chaussées. Ces comparaisons ont montré que la méthode de correction donne des résultats satisfaisants pour les chaussées bitumineuses ou souples. Le niveau de déflexion maximale et la forme du bassin sont beaucoup plus proches de ceux du bassin de référence. Une procédure de calcul inverse a ensuite été appliquée aux mesures corrigées. Les écarts entre les modules de référence des couches de chaussée et ceux calculés à partir des bassins de déflexion corrigés sont réduits à moins de 30 %, ce qui est satisfaisant.

Le troisième chapitre s'intéresse à l'influence de la présence de différents défauts de la chaussée sur le bassin de déflexion, et à l'utilisation de la mesure de déflexion pour détecter ces défauts. Pour cela, des modélisations par éléments finis ont été réalisées pour étudier, de façon théorique, l'influence d'un décollement des interfaces entre couches de chaussée, et d'une variation des modules des matériaux sur les mesures de déflexion du curviamètre et du déflectographe Flash. Plusieurs indicateurs issus de la bibliographie, utilisés pour l'analyse des mesures de déflexion, ont été calculés pour caractériser l'effet de ces défauts. En prenant en compte la justesse des appareils, les variations de mesures observées sur la déflexion maximale ne sont pas toujours suffisamment significatives pour permettre la détection de ces défauts. Des indicateurs optimisés, conçus pour identifier un type de défaut donné, ont alors été mis en place. Ces indicateurs sont définis par une intégrale du produit de la déflexion par une fonction de pondération, dont l'expression dépend du type de défaut considéré. Ces indicateurs sont à la fois fortement sensibles à la présence du type de défaut recherché et très peu sensibles à la présence d'autres défauts. Une validation théorique de cette approche a d'abord été réalisée, pour le cas d'une variation de module d'une couche de la chaussée. Pour ce type de défaut, très difficile à détecter par les indicateurs traditionnels, on a montré que les

Introduction générale

variations du nouvel indicateur optimisé sont fortement corrélées aux variations de module de la couche bitumineuse, le long de la section de chaussée simulée. De même, pour un décollement d'interface, l'indicateur proposé présente de fortes variations au niveau de ce défaut, et apparaît bien plus sensible à ce type de défaut que les indicateurs usuels.

Le quatrième chapitre porte sur la validation, pour des structures de chaussées réelles, des procédures développées pour la correction des bassins de déflexion et pour la détection des défauts. La première partie du chapitre concerne la procédure de correction du bassin de déflexion, dans le cas du curviamètre. Des mesures réalisées sur deux sites instrumentés, de caractéristiques connues, sont analysées. Les mesures brutes et corrigées du curviamètre sont comparées avec des mesures de référence, réalisées avec un capteur de déplacement ancré implanté dans la chaussée. Les résultats obtenus confirment que la procédure de correction permet d'obtenir une déflexion maximale, et une forme de bassin de déflexion beaucoup plus réalistes que la mesure directe. Enfin, des calculs inverses des modules des couches de chaussée à partir des mesures corrigées viennent confirmer les bonnes performances de cette méthode de correction. Les écarts avec les modules de référence des matériaux sont toujours inférieurs à 25 %, ce qui est satisfaisant pour ce type de calcul.

La deuxième partie du chapitre concerne l'évaluation des indicateurs optimisés pour la détection des défauts. Des mesures de déflexion au curviamètre effectuées sur une chaussée expérimentale sont utilisées pour définir les conditions d'application de ces indicateurs et évaluer la dispersion des valeurs obtenues. Des classes de valeurs d'indicateurs sont définies pour diagnostiquer une chaussée saine ou endommagée.

Enfin, la dernière partie de ce chapitre est consacrée à l'analyse de mesures au FWD réalisées sur une chaussée présentant des décollements d'interfaces. Les résultats obtenus montrent que l'indicateur proposé est très sensible à la présence de défauts d'interfaces et permet de localiser ces défauts et d'évaluer leur gravité.

Le cinquième chapitre applique l'ensemble des travaux précédents à des mesures du curviamètre recueillies sur deux itinéraires routiers, de plusieurs kilomètres de longueur, afin d'évaluer l'apport des nouvelles méthodes d'analyse des bassins de déflexion développées dans la thèse à l'échelle d'un réseau. La première étape consiste à appliquer la procédure de correction sur l'ensemble des bassins de déflexion mesurés, et à découper les itinéraires en zones homogènes suivant la déflexion maximale corrigée. Les découpages obtenus avec les mesures brutes et corrigées sont très semblables. Toutefois, les mesures corrigées conduisent à des niveaux de déflexion sensiblement plus élevés, et plus réalistes. Ensuite, les indicateurs optimisés sont calculés sur chaque itinéraire. Pour un même niveau de déflexion maximale, ils permettent d'évaluer si la chaussée est saine ou si certaines couches sont endommagées. Enfin, une procédure de calcul inverse est appliquée pour calculer les modules des couches de chaussées à partir des bassins de déflexion types. L'identification préalable des différents défauts permet d'améliorer la fiabilité des calculs inverses. L'ensemble permet de proposer une nouvelle démarche d'exploitation des mesures de déflexion à l'échelle de l'itinéraire pour

Introduction générale

définir des zones homogènes d'une part, puis identifier la nature de l'endommagement des zones les plus faibles.

La partie **Conclusions Générales et perspectives** dresse un bilan général de l'ensemble des travaux de thèse portant sur l'amélioration de l'interprétation des mesures de bassins de déflexions du curviamètre et des déflectographes. Elle ouvre également la voie à des perspectives en lien avec la création des indicateurs optimisés ou avec l'évolution des techniques d'auscultation.

Chapitre I : Recherche bibliographique

| | | |
|----------|--|-----------|
| I | Chapitre I : Recherche bibliographique | 31 |
| I.1 | Introduction | 32 |
| I.2 | Les chaussées | 32 |
| I.2.1 | Généralités sur les chaussées..... | 32 |
| I.2.2 | Les matériaux de chaussée | 33 |
| I.2.3 | Les différents types de structures de chaussées | 34 |
| I.2.4 | Comportement mécanique des chaussées | 36 |
| I.2.5 | Modélisation du comportement mécanique des chaussées | 38 |
| I.2.6 | Méthodes d'auscultation des chaussées | 44 |
| I.2.7 | Conclusion de la première partie..... | 49 |
| I.3 | Mesure et interprétation de la déflexion..... | 49 |
| I.3.1 | Appareils de mesure de la déflexion | 50 |
| I.3.2 | Paramètres influents sur la mesure de déflexion | 65 |
| I.3.3 | Exploitation des mesures de déflexion..... | 72 |
| I.3.4 | Conclusion de la deuxième partie | 88 |
| I.4 | Conclusion..... | 89 |

I.1 Introduction

Ce premier chapitre dresse un état de l'art des recherches et servira de socle lors du développement de cette thèse. Il est scindé en deux grandes sous-parties.

La première concerne les structures de chaussée. Avant d'introduire les types de structures traditionnellement rencontrées en France, les couches de chaussées ainsi que les matériaux qui les composent sont décrits. L'étude du comportement mécanique des chaussées porte d'une part sur les contraintes liées au trafic et d'autre part sur celles dues aux conditions climatiques. On présente ensuite les modèles mécaniques de chaussées, et en particulier le modèle de Burmister et les méthodes de calcul par éléments finis, utilisés dans cette thèse. La fin de cette première partie est consacrée aux méthodes d'auscultation de chaussées, avec une distinction entre les approches de surface et de structure.

La seconde partie se concentre sur la mesure et l'interprétation de la déflexion. Après une étude sur le fonctionnement et l'évaluation des appareils de mesure, les paramètres influents sur la déflexion sont détaillés. Ceux-ci peuvent venir de la mesure de l'appareil, des conditions extérieures ou de l'état de la structure. Enfin, le dernier paragraphe se focalise sur l'exploitation des mesures au niveau local ou à l'échelle d'un itinéraire.

I.2 Les chaussées

Cette première partie se concentre sur le comportement mécanique des chaussées. Après avoir rappelé la composition générale d'une chaussée et ses différents matériaux, les structures types françaises sont décrites. Le comportement mécanique des chaussées, et les méthodes de calcul de structure de chaussées sont ensuite abordés. Enfin, les principales méthodes d'auscultation de chaussée sont présentées.

I.2.1 Généralités sur les chaussées

Une chaussée est composée d'une superposition de couches différentes en matériaux et en épaisseurs. Celles-ci transmettent les sollicitations engendrées par le trafic jusqu'au sol support. La Figure I-1 représente une structure de chaussée (LCPC & SETRA, 1994).

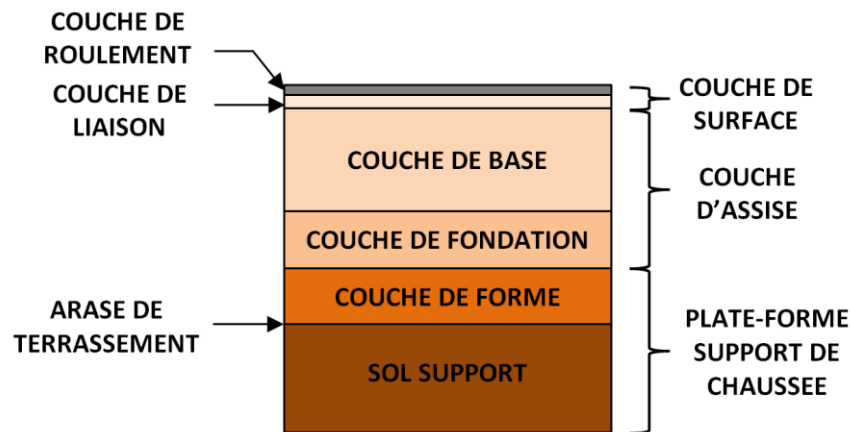


Figure I-1 : Structure de chaussée.

Chaque couche de matériaux possède un rôle bien précis dans le fonctionnement d'une chaussée (du sol à la surface) (LCPC & SETRA, 1994):

Le **sol support**, généralement surmonté d'une **couche de forme**, constitue la plate-forme support de chaussée. La couche de forme a une double fonction. Pendant les travaux, elle assure la protection du sol-support, permet la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins. En service, elle permet d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le sol ou le remblai, et d'améliorer la portance à long terme.

Les couches d'assise assurent la transmission et la répartition des efforts induits par le trafic pour la rendre compatible avec la capacité de portance du sol support.

La couche de surface est composée d'une couche de roulement qui assure le contact avec les pneumatiques des véhicules et éventuellement, d'une couche de liaison. Elle subit directement et doit supporter les agressions engendrées par le trafic et par les conditions météorologiques sans se dégrader.

1.2.2 Les matériaux de chaussée

Les matériaux de chaussée doivent répondre à certaines propriétés mécaniques leur permettant de résister aux sollicitations mécaniques et climatiques. Des normes européennes encadrent leurs caractéristiques. Quatre catégories distinctes de matériaux sont utilisées dans les chaussées :

- Les matériaux non traités
- Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés
- Les matériaux traités aux liants hydrauliques
- Les bétons de ciment

Les **matériaux non traités** répondent à la norme européenne NF EN 13285 (AFNOR, 2000) sous l'appellation de Graves Non Traitées (GNT). Leur principale utilisation est pour la réalisation des assises de chaussées à faible trafic. Ces matériaux ont un comportement

élastique non linéaire (Hornych, et al., 2007) (Hornych, 2008). Leur modélisation peut prendre la forme d'une superposition de couches linéaires. Ils sont sensibles à l'eau et peuvent conduire à des affaissements de rive ou à des fissurations de retrait hydrique de la chaussée. Sous l'effet d'un trafic cumulé, des déformations permanentes sont susceptibles d'apparaître (phénomène d'orniérage).

Les **matériaux traités aux liants hydrocarbonés** regroupent ceux traités aux liants hydrocarbonés à chaud (généralement appelés matériaux bitumineux), décrits par (AFNOR, 2017) et les matériaux traités à l'émulsion de bitume (aussi appelés matériaux bitumineux à froid) décrits par la norme NF P 98-121 (AFNOR, 2014). Ils ont un comportement viscoélastique, bien représenté par le modèle de Huet et Sayegh (Huet, 1965) (Sayegh, 1966). Cette propriété se traduit par la dépendance du module complexe à la fréquence d'application de la charge (la norme du module augmente avec la fréquence de chargement). La température influe également sur ce type de matériaux avec une diminution de la norme du module lorsque la température augmente. Sous l'effet du trafic, ces matériaux subissent des phénomènes de fatigue avec l'apparition de fissures longitudinales et d'orniérage.

Les méthodologies d'études des **matériaux traités aux liants hydrauliques** sont décrites dans les normes NF EN 14227-1 à NF EN 14227-5 (AFNOR, 2013) et NF P 98-170 (AFNOR, 2006) pour les **bétons de ciment**. Considérés comme élastiques linéaires isotropes, ces matériaux voient leurs propriétés mécaniques définies en fonction du type de liant hydraulique et de granulats utilisés (Sedran & De Larrard, 2000). Leur rigidité élevée en fait des matériaux particulièrement sensibles à la fissuration transversale et à la fissuration par retrait hydraulique.

1.2.3 Les différents types de structures de chaussées

Une chaussée est dimensionnée et construite pour garantir la sécurité et le confort des usagers de la route. Elle est généralement conçue pour une période de 20 à 30 ans. Pour ce faire, elle doit respecter des critères de qualité structurelle et de surface. Suivant la nature des matériaux utilisés dans les couches de chaussées, six principaux types de structures sont définis (Tableau I-1) (LCPC & SETRA, 1998):

Tableau I-1 : Structures des différents types de chaussée.

| | | |
|--------------------------------|------------------------------|---|
| | | |
| Chaussée souple traditionnelle | Chaussée bitumineuse épaisse | Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques |
| | | |
| Chaussée à structure mixte | Chaussée à structure inverse | Chaussée en béton |

I.2.3.1 Chaussée souple traditionnelle

Cette structure est retenue pour les chaussées à faible et très faible trafic. Par sa forte présence sur le territoire français, elle représente la majorité des réseaux routiers secondaires (routes départementales et communales). Elle est composée d'une couverture bitumineuse mince disposée au-dessus d'une ou plusieurs couches de matériaux non traités (de 20 à 50 cm). La faible épaisseur de matériaux conduit à transmettre des contraintes relativement élevées au sol support.

I.2.3.2 Chaussée bitumineuse épaisse

Composée d'une couche de roulement bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrocarbonés (base et fondation), cette structure est présente sur tout type de chaussées, y compris les autoroutes. Elle présente une forte rigidité et une forte résistance en traction des couches d'assise, ce qui permet de diffuser, avec une importante atténuation, les contraintes verticales générées par la circulation et transmises au sol support.

I.2.3.3 Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques

Egalement appelée chaussée « semi-rigide », cette structure comporte une couche de roulement bitumineuse posée sur une assise de chaussée en matériaux traités aux liants hydrauliques (base et fondation). Elle est capable de supporter de très forts trafics. Grâce à la grande rigidité de leurs couches d'assises, ces structures atténuent fortement les contraintes verticales transmises au sol support.

1.2.3.4 Chaussée à structure mixte

Cette chaussée est composée d'une couche de roulement et d'une couche de base en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, et d'une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux sur l'épaisseur totale de chaussée soit de l'ordre de 50 %. L'avantage de ces chaussées est qu'elles sont moins sensibles aux phénomènes de fissuration que les chaussées semi-rigides, du fait de l'épaisseur importante de la couverture bitumineuse.

1.2.3.5 Chaussée à structure inverse

Une chaussée à structure inverse est une chaussée à structure mixte avec interposition d'une couche de matériaux granulaires non traités entre la couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques et la couche de base bitumineuse. L'ajout d'une couche de grave non traitée crée une « barrière » à la propagation de fissures des matériaux traités aux liants hydrauliques vers les couches supérieures de matériaux bitumineux. Ce type de structure est très peu utilisé aujourd'hui.

1.2.3.6 Chaussée en béton de ciment

Ce type de structure se compose d'une couche de béton de ciment, éventuellement recouverte par une couche de roulement. Elle repose soit sur une couche de fondation ou directement sur le sol support de chaussée avec dans ce cas interposition fréquente d'une couche bitumineuse. Pour cette chaussée, les sollicitations induites par le trafic sont principalement reprises en flexion par la couche de béton du fait du module d'élasticité élevé du béton de ciment.

1.2.4 Comportement mécanique des chaussées

Les structures de chaussées sont soumises à des sollicitations complexes. Les deux principales sont induites par les contraintes liées au trafic et par les contraintes environnementales.

1.2.4.1 Contraintes liées au trafic

Lorsqu'un véhicule circule, sa charge est transmise à la chaussée par l'intermédiaire des pneumatiques, qui appliquent à la chaussée une pression verticale, souvent supposée uniforme. Le trafic routier se traduit par la répétition d'un grand nombre de chargements, qui conduisent à des dégradations de type usure, fluage et rupture par fatigue. Sous l'effet des charges, les couches de chaussée sont soumises à des sollicitations de flexion, qui se traduisent par le développement de contraintes horizontales de traction à la base de la structure, et de compression en partie supérieure de la structure, comme représenté sur la Figure I-2. Si les couches sont collées, il y a continuité des sollicitations entre les couches, et la diffusion des efforts induits par le trafic dans le sol support est maximale (Di Benedetto & Corte, 2005).

Les charges roulantes induisent dans la structure de chaussée des sollicitations complexes, qui conduisent à des dégradations spécifiques. Les sollicitations de traction répétées à la base des couches conduisent à des phénomènes de fatigue des matériaux qui engendrent une fissuration croissante. En parallèle, la répétition des contraintes de compression verticales sous le passage des charges se traduit par des déformations permanentes verticales (orniérage).

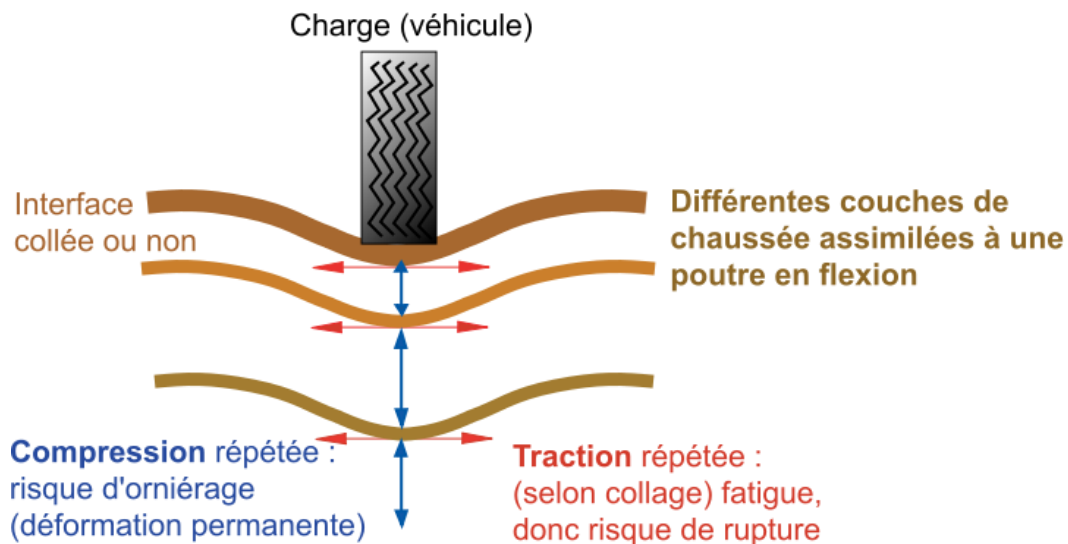


Figure I-2 : Sollicitations produites par le trafic dans la chaussée, à la verticale de la charge.

1.2.4.2 Effets des conditions climatiques

Les champs de contraintes et déformations sont fortement liés à la température (Di Benedetto & Corte, 2005). Ce paramètre joue un rôle prépondérant dans le comportement des matériaux bitumineux. A basse température, le bitume possède un comportement fragile. Les sollicitations du trafic cumulées aux conditions climatiques sont des facteurs aggravant la fissuration de l'enrobé. A température élevée, les matériaux bitumineux perdent de leur rigidité et des problèmes d'orniérage peuvent apparaître. Il est donc indispensable que les matériaux bitumineux présentent des propriétés telles que:

- La flexibilité, ou l'aptitude à résister à la fissuration à basse température ;
- La stabilité, ou la résistance aux déformations permanentes, qui augmentent à haute température.

De plus, lors des changements de température, des phénomènes de dilatations/contractions thermiques se produisent et entraînent des phénomènes de fissuration thermique, comme présenté en Figure I-3.

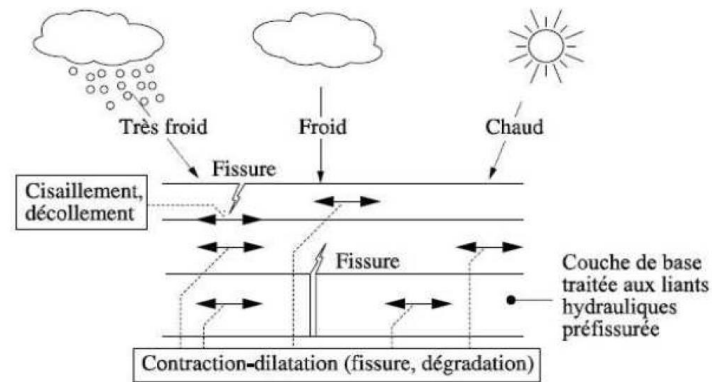


Figure I-3 : Effet de la température sur une structure de chaussée (Di Benedetto & Corte, 2005).

1.2.5 Modélisation du comportement mécanique des chaussées

Les chaussées sont des structures composées de plusieurs couches de matériaux aux propriétés différentes. Les premiers modèles de calcul de structures de chaussées, développés à la fin du XIX^{ème} siècle et au XX^{ème} siècle sont des modèles analytiques, en élasticité linéaire. Aujourd'hui, les méthodes de calcul par éléments finis sont de plus en plus utilisées pour le calcul des structures de chaussées. Elles présentent l'avantage de pouvoir prendre en compte d'autres lois de comportement que l'élasticité linéaire, et également des géométries complexes.

1.2.5.1 Modèle de Boussinesq (Boussinesq, 1885)

Elaboré en 1885, le modèle de Boussinesq est créé et utilisé initialement en mécanique des sols. Il est appliqué à un massif homogène élastique semi-infini qui permet de diffuser les charges.

Dans le modèle de Boussinesq, la structure est constituée d'un massif semi-infini. Celui-ci est soumis à l'action d'une charge statique verticale, appliquée sur une surface circulaire. La Figure I-4 présente le principe du modèle.

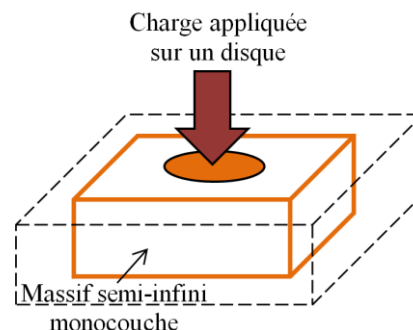


Figure I-4: Principe du modèle de BOUSSINESQ.

Ce modèle ne permet pas modéliser les structures multicouches et son utilisation se limite à des corps de chaussée dont la rigidité est proche de celle du sol support. Les discontinuités

dans une couche ou à l'interface entre deux couches ne sont pas prises en compte dans ce modèle.

1.2.5.2 *Modèle bicouche de Westergaard (Westergaard, 1926)*

Le modèle bicouche de Westergaard (1926) est considéré comme le premier modèle de calcul consacré aux chaussées en béton. Il permet d'exprimer les contraintes sous forme d'équations explicites simples. Il donne les contraintes et déformations d'un système constitué d'une plaque mince de dimensions infinies dans le plan reposant sur un sol assimilé à un ensemble de ressorts verticaux sans connexions horizontales, communément appelé fondation de Winkler. Le déplacement vertical V en un point est proportionnel à la pression verticale en ce point soit $V = Kw$ comme montré dans la Figure I-5.

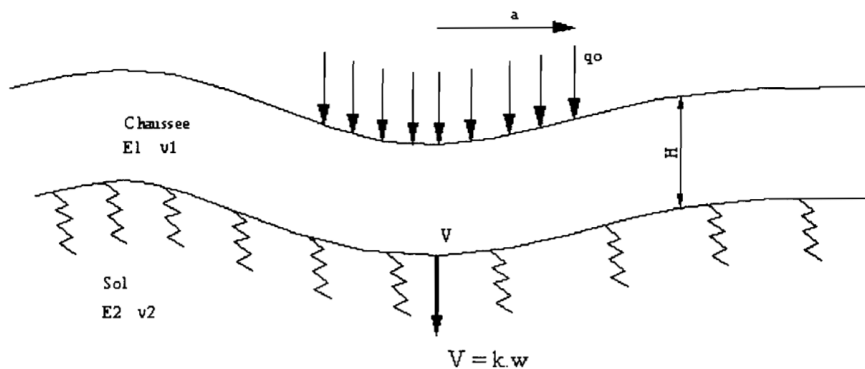


Figure I-5 : Diffusion des contraintes selon le modèle de Westergaard (Thiaw, 2006).

La Figure I-5 présente le modèle bicouche proposé par Westergaard. La base de la couche de chaussée travaille en traction par flexion. La contrainte de traction est donnée par :

$$\sigma_t = \frac{P}{H^2} C\left(\frac{I}{a}\right) \tag{I-1}$$

Avec:

I le rayon de rigidité de la chaussée tel que :

$$I = \sqrt[4]{\frac{D}{k}} = \sqrt[4]{\frac{E_1 H^3}{p(1 - \nu_1)k}} \tag{I-2}$$

P la charge par roue ;

C la fonction croissante de I qui dépend de la position de la charge ;

a le rayon du chargement circulaire appliqué sur le massif ;

D le facteur de rigidité ;

K le module de réaction du sol support ;

E_1 le module élastique de la chaussée ;

ν_1 le coefficient de Poisson ;

H l'épaisseur de la chaussée.

1.2.5.3 *Modèle bicouche de Hogg (Hogg, 1938)*

Le modèle de Hogg permet de déterminer les contraintes et déformations d'une plaque mince de dimensions infinies glissant parfaitement sur un massif élastique semi-infini de type Boussinesq (E_2, μ_2). La Figure I-6 présente la diffusion des contraintes selon le modèle de Hogg.

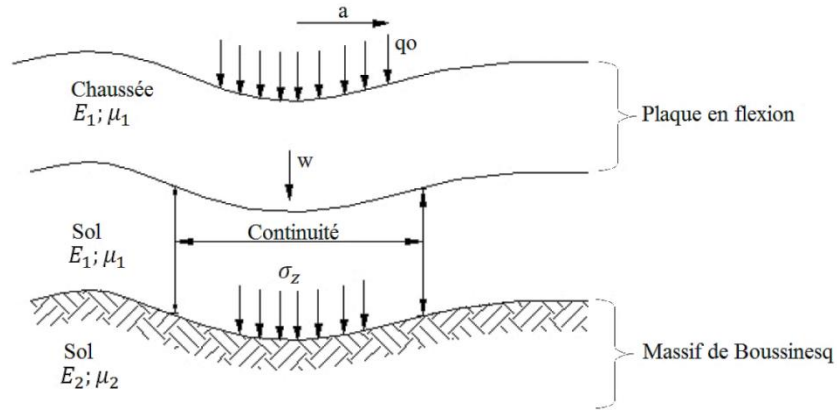


Figure I-6 : Diffusion des contraintes selon le modèle de Hogg (Thiaw, 2006).

La plaque mince respecte la théorie de l'élasticité et les hypothèses de Navier. Son déplacement vertical est assimilable à celui du massif. La contrainte de traction est donnée par :

$$\sigma_t = \frac{P}{H^2} \frac{1 + \nu}{2\pi} \Phi \left(\frac{E_1 H^3}{E_2 a^3} \right) \quad (I-3)$$

Avec:

$P = \pi a^2 q_0$ la charge de la roue ;

$\frac{1+\nu}{2\pi} \Phi \left(\frac{E_1 H^3}{E_2 a^3} \right)$ le facteur de rigidité ;

$\frac{E_1 H^3}{E_2 a^3}$; le facteur de rigidité relative ;

a le rayon du chargement circulaire appliqué sur le massif.

Les limites de ce modèle sont :

- L'hypothèse de glissement parfait entre la plaque et le massif influence fortement les résultats.
- Une seule couche ou plaque est modélisée.
- Aucune discontinuité verticale ne peut être modélisée.

1.2.5.4 *Modèle de Burmister (Burmister, 1943)*

Le modèle de Burmister traite le problème général d'une structure à n couches reposant sur un massif élastique semi-infini, sur laquelle s'applique une charge circulaire (Figure I-7).

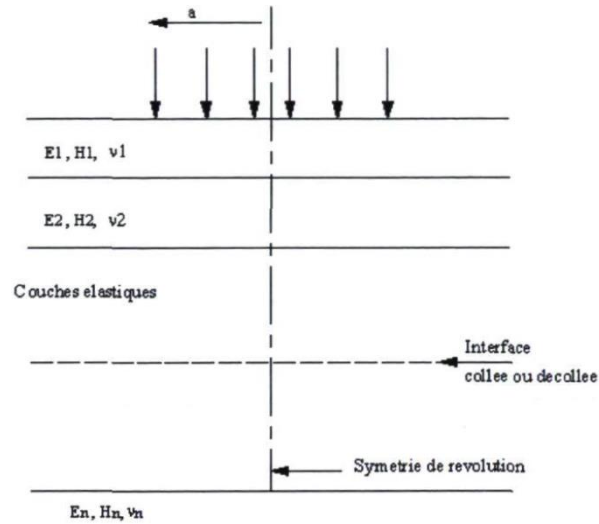


Figure I-7 : Modèle multicouche de BURMISTER (Quijano Murillas, 2010).

Les différentes couches de la structure sont assimilables à des solides homogènes élastiques et isotropes. Les interfaces entre couches sont collées ou décollées indiquant si le collage est parfait (déplacement identique des deux couches au niveau de l'interface) ou si le glissement des couches est total (déplacement libre d'une couche par rapport à l'autre). Les cas des charges multiples sont traités par superposition des effets des charges élémentaires.

Les autres caractéristiques du modèle sont les suivantes :

- La charge est décrite par une pression uniforme ;
- Les couches sont considérées comme infinies en plan.

Dans ce modèle, chaque couche de chaussée est décrite par son épaisseur h , son module d'Young E et son coefficient de Poisson ν .

Cette méthode permet de déterminer les contraintes et les déformations à partir de l'équation suivante (Van Cauwelaert, 1995):

$$\varphi_i = \rho a \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr) * J_1(ma)}{m} [A_i e^{-mz} - B_i e^{-mz} + zC_i e^{-mz} - zD_i e^{-mz}] dm \quad (I-4)$$

Avec :

φ_i : Fonction de contrainte ;

a : Rayon de la surface de charge ;

ρ : Pression de chargement uniformément répartie ;

Chapitre I : Recherche bibliographique

r : Distance radiale en coordonnée cylindrique ;

z : Profondeur ;

A_i, B_i, C_i, D_i : Paramètres inconnus déterminés par les conditions aux limites ;

J_0, J_1 : Fonctions de Bessel de première espèce respectivement d'ordre 1 et 2 ;

m : Paramètre d'intégration.

Les couches sont supposées infinies en plan et ne peuvent pas intégrer de discontinuités verticales. Ce modèle impose le calcul avec des charges de forme circulaire, différentes des charges réelles d'une roue de camion (de forme plutôt rectangulaire).

Le logiciel Alizé-LCPC, conçu par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), se base sur le modèle de Burmister. Par la mise en œuvre d'une méthode rationnelle, sa principale fonctionnalité est le dimensionnement des chaussées neuves. Celui-ci s'adresse à tous types de chaussées. La démarche de dimensionnement consiste à comparer les sollicitations dans la chaussée (contraintes et déformations), avec des valeurs maximales admissibles, en différents points de la structure. Ces valeurs admissibles sont fonction du trafic et des matériaux utilisées pour la conception de la structure de chaussée.

Le logiciel propose une bibliothèque de matériaux et de structures de chaussées types, qui correspondent au catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (LCPC & SETRA, 1998).

Le module « Alizé-Rétro-calcul », permet, par calcul inverse, d'évaluer les modules des différentes couches de chaussées à partir du relevé de bassins de déflexion de la chaussée, sous une charge de référence.

1.2.5.5 *Modèle de Jeuffroy (Jeuffroy, 1955)*

Le modèle de Jeuffroy repose sur la combinaison de ceux de Hogg (Hogg, 1938) et Burmister (Burmister, 1943). Il est constitué d'une plaque mince posée sans frottement sur une couche élastique de Burmister parfaitement collée au sol. Son élaboration a permis la mise en place d'un système complet d'abaques.

Cependant, ce modèle présente les limites suivantes :

- La charge considérée est circulaire ;
- Pas de prise en compte du cisaillement dans les deux premières couches
- Impossibilité d'introduire des discontinuités verticales

1.2.5.6 *Méthodes de calcul aux éléments finis*

Le modèle de Burmister, utilisé dans la plupart des logiciels de dimensionnement comme ALIZE, présente l'avantage d'une grande rapidité de calcul et d'une utilisation simple pour le dimensionnement d'une chaussée neuve et sans fissure. Cependant, il ne considère que des structures de géométrie simple (couches d'extension infinie dans le plan) et ne permet pas

de prendre en compte les discontinuités (fissures ou décollements), ni des comportements plus complexes que l'élasticité linéaire (visco-élasticité, plasticité).

Pour prendre en compte des structures de géométrie plus complexe, ou des discontinuités, il est nécessaire de passer à des méthodes de calcul par éléments finis. Les principales étapes de la construction d'un modèle aux éléments finis sont (Oudin, 2011):

- La discrétisation du milieu continu en sous domaines;
- La construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- Le calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème;
- L'assemblage des matrices élémentaires ;
- La prise en compte des conditions aux limites ;
- La résolution du système d'équations.

Cette approche permet notamment de traiter les cas suivants :

- Le caractère tridimensionnel de la structure en raison de géométries non infinies en plan ;
- La non linéarité ou l'évolution des conditions de contact ;
- Le comportement viscoélastique des matériaux sous charges roulantes ;
- Les phénomènes mécaniques complexes se produisant dans les chaussées (conditions d'interfaces, fissurations, etc.).

Le logiciel CESAR-LCPC (CESAR, 2016), conçu dans les années 1980, sera utilisé pour la réalisation de calculs aux éléments finis dans ce travail de thèse.

I.2.5.6.1 Modélisation des chaussées fissurées

La modélisation des chaussées fissurées est généralement conduite en utilisant la méthode aux éléments finis. Cette méthode est inscrite dans la majorité des codes. L'introduction des fissures peut se faire par des éléments de contact en imposant un relâchement des nœuds du maillage. Les modèles 3D permettent de décrire de façon réaliste la géométrie de la structure de chaussée, et le calcul les sollicitations dans les trois directions. La précision des résultats dépend de la finesse du maillage choisi, et un calcul 3D nécessite un grand nombre d'éléments, ce qui est très consommateur en temps de calcul et en mémoire. De nombreuses études sur ce sujet ont été réalisées par (Salasca, 1998), (Li, 1999), (Vanelstraete, et al., 2000), (Romanoshi & Li, 2002), (Cho, et al., 2003), (Shoukry, et al., 2004), (Nesnas & Nunn, 2004),...

I.2.5.6.2 Modélisation des interfaces

Comme pour la modélisation des fissures, de nombreuses études ont été menées sur la modélisation des défauts de liaison aux interfaces (Elseifi, et al., 2006), (Yoo, 2006), (Yoo & Al-Qadi, 2007), (Chea & Martinez, 2008), (Hu, et al., 2009),... Les interfaces peuvent être

modélisées par deux approches. La première consiste à représenter l'interface par une couche mince, possédant une loi de comportement spécifique (par exemple une couche élastique de faible module) (Desai, et al., 1984). La seconde approche consiste à utiliser des éléments de contact. Dans ce cas l'interface n'a pas d'épaisseur, et elle est décrite par une loi de contact, reliant en général, les efforts et les déplacements relatifs à l'interface (loi de frottement par exemple). Cette modélisation requiert une condition de non-interpénétration des éléments adjacents avec continuité des contraintes normales et possibilité de glissement éventuel (Chea & Martinez, 2005).

1.2.6 Méthodes d'auscultation des chaussées

L'auscultation des chaussées vise à déterminer les caractéristiques de surface et les caractéristiques structurelles des chaussées, en utilisant différentes méthodes de mesure, généralement non destructives. Son objectif est de caractériser l'état de dégradation de la chaussée, et de fournir les éléments d'information nécessaires aux décisions à prendre en matière d'entretien.

L'auscultation est composée de trois phases (SETRA, 2009):

- Phase 1 : Recueil des informations globales ou à caractère continu sur l'itinéraire ;
- Phase 2 : Découpage de l'itinéraire étudié en zones homogènes ;
- Phase 3 : Recherche sur le comportement des zones homogènes par des analyses plus fines sur des sections témoins extraites des zones homogènes

1.2.6.1 Caractéristiques de surface

L'état de la surface de la chaussée est un paramètre essentiel à la sécurité et au confort des usagers de la route. Il peut traduire un désordre superficiel mais également interne à la chaussée.

1.2.6.1.1 Relevé des dégradations de surface

Le relevé de dégradations de surface consiste à identifier et quantifier visuellement les dégradations de surface des chaussées dans le cadre d'études routières. Il est considéré comme un des indicateurs de base pour l'appréciation de l'état des chaussées. Son principe repose sur la localisation des dégradations, en précisant leur type, leur gravité et l'extension de chaussée concernée. Le relevé des dégradations considère également les réparations qui traduisent l'existence de dommages antérieurs.

Le relevé visuel des dégradations est réalisé en France suivant la méthode d'essai LPC 38-2 (Bertrand & Lepert, 1997). Les différents types de dégradations sont détaillés dans le « catalogue des dégradations de surface des chaussées » - méthode d'essai LCPC n°52 (Bertrand, et al., 1998) qui est un complément à la méthode d'essai n°38-2. La méthode est composée de sept modes opératoires (de M1 à M7) qui diffèrent selon l'objectif, les conditions d'exploitation et le type de chaussée.

Chapitre I : Recherche bibliographique

A partir de ce relevé, un découpage de l'itinéraire en zones homogènes est réalisé sur la base des dégradations structurelles.

I.2.6.1.1.1 *Chaussées souples et bitumineuses épaisses*

Sur ces structures, les dégradations couramment rencontrées sont :

- les dégradations traduisant une fatigue du corps de chaussée :
 - orniérage à grand rayon;
 - fissuration longitudinale dans les bandes de roulement;
 - faïençage dans les bandes de roulement;
- les affaissements de rive (défauts de drainage, stabilité de rive ...);
- les dégradations par fluage des couches bitumineuses ;
- les dégradations de surface de la couche de roulement :
 - arrachements, nids de poule ;
 - fissures longitudinales ou faïençage non spécifique aux bandes de roulement ;
 - remontées d'eau.

Suite au relevé, le Tableau I-2 et le Tableau I-3 précisent les classes de fissuration/faïençage, d'orniérage et d'affaissement en fonction de la longueur cumulée. Les réparations jouent également un rôle puisqu'une majoration de classe est appliquée si les réparations sont supérieures à 10 % du linéaire.

Tableau I-2 : Classement en zones en fonction du pourcentage de fissures/faïençage (SETRA, 2009).

| Localisation des fissures/faïençage | Niveau de gravité | Classe de fissuration/faïençage | | | | |
|--|-------------------|---------------------------------|-------------|----------|-----------|--------|
| | | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
| Dans les bandes de roulement Σ % de (FL + Faï) | Significatives | < 5 % | < 5 % | 5 à 10 % | 10 à 30 % | > 30 % |
| | Graves | < 2 % | < 2 % | 2 à 5 % | 5 à 10 % | > 10 % |
| Non spécifique aux bandes de roulement Σ % de (FL + Faï) | Graves | < 20 % | \geq 20 % | | | |

Tableau I-3 : Classement des déformations permanentes : orniérage dans les bandes de roulement et affaissements de rive (SETRA, 2009).

| Classes d'orniérage | | Déformation en mm | | |
|---------------------|-------------|-------------------|---------|------|
| | | < 10 | 10 à 20 | > 20 |
| Extension en % | \leq 10 % | O1 | O2 | O4 |
| | > 10 % | | O3 | |

| Classes de l'affaissement | | Affaissement en mm | | |
|---------------------------|-------------|--------------------|---------|------|
| | | < 30 | 30 à 60 | > 60 |
| Extension en % | \leq 10 % | A1 | A2 | A4 |
| | > 10 % | | A3 | |

I.2.6.1.1.2 *Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques et mixtes*

Les dégradations rencontrées sur ce type de chaussée comprennent généralement :

- les fissures transversales détaillées en 4 niveaux de gravités :

Chapitre I : Recherche bibliographique

- les fissures franches, colmatées ou non ;
 - les fissures dédoublées ;
 - les fissures dégradées (début de faïençage) qualifiées de graves ;
 - les fissures dégradées et affaissées qualifiées de très graves.
- les fissures longitudinales en axe de voie, hors ou dans la bande de roulement ;
 - les faïençages dans les bandes de roulement;
 - les remontées de laitance et d'eau ;
 - l'orniérage par fluage ;
 - les dégradations de surface des couches de roulement.

Les classes des fissures transversales, issues du relevé, en nombre moyen par pas de 100 m, sont répertoriées dans le Tableau I-4.

Tableau I-4 : Classement en zones homogènes en fonction du nombre par 100 m de fissures transversales pour les chaussées inverses, à assise traitée aux liants hydrauliques et mixtes (SETRA, 2009).

| Classes fissures transversales | | FT 1 | FT 2 | FT 3 |
|--|-------------|----------|----------|-------|
| Nombre de Fissures transversales / 100 m | Graves | ≤ 2 | > 2 | |
| | Très graves | 0 | ≤ 2 | > 2 |

La présence de fissuration longitudinale et/ou de faïençage dans les bandes de roulement conduit à l'utilisation du Tableau I-2 et l'orniérage est décrite par le Tableau I-3.

La Figure I-8 montre une représentation de dégradations sur un schéma itinéraire. La présence de défauts est matérialisée par des traits de couleurs différentes en fonction de la gravité du dommages. Cette reproduction permet l'identification rapide des zones endommagées et de leur niveau de dégradation.

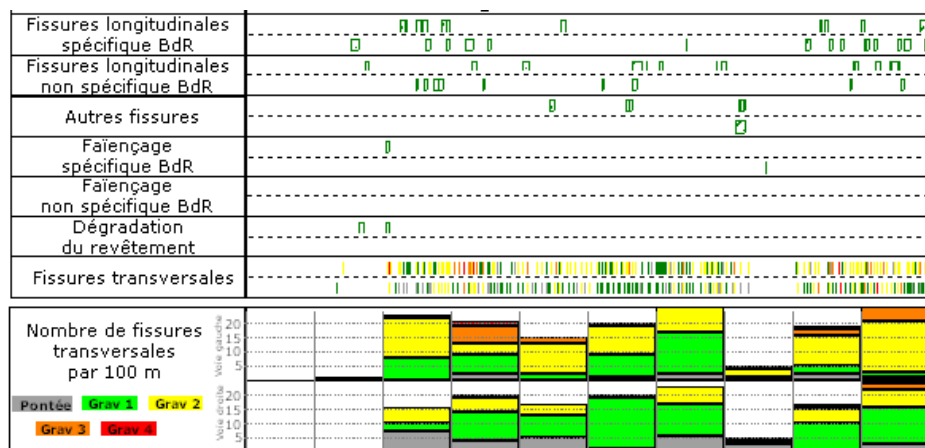


Figure I-8 : Exemple de représentation de dégradations sur schéma itinéraire sur chaussée mixte (SETRA, 2009).

I.2.6.1.2 Uni longitudinal

L'ensemble des irrégularités géométriques de surface de la chaussée constitue l'uni longitudinal. Ces défauts d'uni perturbent le comportement dynamique des véhicules jouant

sur la sécurité et le confort des usagers de la route (SETRA, 2009). Sa mesure est généralement réalisée avec des appareils tels que l'analyseur de profil en long (APL) (Robert, et al., 2009). Les défauts d'uni sont le plus souvent dus à une mauvaise mise en œuvre lors de la construction ou de l'entretien. L'analyse de chaque profil relevé traduit son état par le calcul d'indices d'uni:

- Petites ondes : vibrations dans l'habitacle, nids de poule, fissures transversales affaissées,...
- Moyennes ondes : tassements de remblai occasionnant un flottement de la suspension du véhicule.
- Grandes ondes : flottement de la suspension du véhicule.

La mesure de l'uni longitudinal est également considérée comme une méthode d'auscultation structurelle.

I.2.6.1.3 Uni transversal

La mesure d'uni transversal permet de déterminer les affaissements de rive ainsi que l'orniérage de chaussées. Elle est un indicateur fort dans la détermination de la qualité d'usage des chaussées ainsi que de l'état structurel (SETRA, 2009). La méthode d'essai n°49 (Lepert, et al., 2001) permet de définir la mesure et l'interprétation du profil en travers.

I.2.6.2 *Etat de la structure*

L'auscultation de la structure de chaussée permet de contrôler les caractéristiques des couches en déterminant leurs épaisseurs ou leurs propriétés mécaniques.

I.2.6.2.1 Carottage

Le carottage est une technique d'auscultation destructive des chaussées. Son principe consiste à découper et extraire d'une chaussée un échantillon cylindrique, communément appelé carotte. Les carottages ont pour but de déterminer les caractéristiques générales des couches liées (nature, état et épaisseurs des matériaux, interfaces, performances mécaniques) ; d'identifier l'origine de la propagation des fissures (montante ou descendante) et d'expliquer les défauts des points singuliers. La Méthode d'essai LPC n°43 (Lepert, 1996) donne des indications quant à l'exécution et l'exploitation des carottages de chaussées.

I.2.6.2.2 Radar

Les mesures radar, catégorisées dans les essais non destructifs, sont réalisées en utilisant un géoradar (Ground Penetrating Radar – GPR), basé sur la propagation et la réflexion d'ondes électromagnétiques haute fréquence (20 MHz à 2 GHz). Cet instrument est sensible aux variations des propriétés électromagnétiques du milieu (permittivité, conductivité et susceptibilité magnétique) (Bertrand, et al., 1996). La méthode radar a été utilisée à maintes reprises et a prouvé son utilité dans :

- La détermination des épaisseurs des couches de chaussées (Fernando, et al., 1994), (Maser & Scullion, 1992), (Roddis, et al., 1992), (Grégoire & Van Geem, 2013). (Loken, 2007);
- L'estimation de la densité des matériaux bitumineux (Saarenketo & Scullion, 1996);
- La détermination du taux d'humidité des matériaux de base (Maser & Scullion, 1992);
- L'identification des zones de décapage dans les couches bitumineuses (Rmeili & Scullion, 1997), (Saarenketo & Scullion, 1994) ;
- La détection de cavités remplies d'air et remplies d'eau (Alongi, et al., 1982);
- La localisation de fissures verticales non visibles en surface (Diamanti & Redman, 2012), (Fernandes & Pais, 2017);
- La localisation de défauts d'interface (Simonin, et al., 2013);
- L'identification d'anomalies enterrées (Bowders & Koerner, 1982).

I.2.6.2.3 Mesure de déflexion

La mesure de déformabilité de surface ou mesure de déflexion est une mesure historique de l'évaluation structurelle. Elle est définie comme suit dans la méthode d'essai LPC n°39 :

« Une charge mobile induit à la surface d'une chaussée un **bassin de déflexion**. La surface de cette zone et sa profondeur (amplitude) sont fonction du type et de l'état de la structure ainsi que de la valeur de la charge. La mesure de déformabilité de surface consiste à fixer ou à poser, au point de la chaussée où l'on veut faire l'essai, un capteur permettant de mesurer le déplacement vertical. On approche progressivement une charge roulante, qui, à un moment donné, passe sur celui-ci, puis s'en éloigne. Les variations de la déformation verticale de la chaussée en fonction de la distance qui sépare le point de mesure et le point d'application de la charge constituent **la ligne d'influence** qui est mesurée par le capteur. On en déduit les valeurs caractéristiques suivantes :

-la déflexion maximale correspond au déplacement vertical maximal du point de mesure (exprimée en mm/100) ;

-la courbure C correspond à la courbure de la ligne d'influence au moment où le déplacement vertical du point de mesure est maximal (exprimée en m^{-1}). »

Les systèmes de mesures les plus développés enregistrent le bassin de déflexion défini en plusieurs points, fournissant une description plus complète et précise de la déflexion de la chaussée.

En négligeant les variations saisonnières de la déflexion et pour une chaussée bitumineuse souple, des études ont montré que durant les premières années de service, elle ne varie que très peu et devient constante. Dans certains cas, une diminution de sa valeur est même constatée. Cependant, après une longue période d'exploitation, la déflexion maximale augmente et indique la fin de vie structurelle de la chaussée.

La mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante est définie par la Norme Déflexion NF P98 200-1 (AFNOR, 1991).

1.2.7 Conclusion de la première partie

Les chaussées sont composées d'une superposition de couches, servant à la transmission des efforts au sol support. Chaque couche possède une fonction bien précise dans la chaussée. Les matériaux qui les composent sont classés en quatre grandes familles. Les matériaux non traités sont majoritairement utilisés dans le corps des chaussées à faible trafic. Leurs principales dégradations sont les affaissements de rive, les fissurations de retrait hydrique ou encore les déformations permanents. Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés ont un comportement viscoélastique. Ils sont sensibles au phénomène de fatigue avec l'apparition de fissures longitudinales et d'orniérage. Les matériaux traités aux liants hydrauliques et les bétons de ciment ont un comportement élastique linéaire jusqu'à un certain niveau de contraintes, associé à une rupture fragile. Ils subissent de la fissuration transversale, due aux phénomènes de retrait hydraulique et de retrait thermique, et également de la fissuration par fatigue

Le comportement mécanique des chaussées dépend de deux types de sollicitations. La première liée au trafic est générée par les répétitions de passage des véhicules. La chaussée est sujette à l'apparition de micro-dégradation par traction ou de déformations permanentes par compression. Les conditions climatiques impactent les matériaux en générant des déformations permanentes pour les matériaux bitumineux à haute température ou de la fissuration thermique à basse température.

Depuis celui de Boussineq en 1885, de nombreux modèles du comportement mécanique des chaussées ont été élaborés. En 1943, Burmister publie une solution multicouche élastique. Ce modèle est implémenté dans de nombreux logiciels de dimensionnement de chaussées à l'instar d'ALIZE. Malgré sa rapidité et sa simplicité, ce modèle ne permet pas l'introduction de discontinuités dans la chaussée. La méthode aux éléments finis peut être utilisée pour introduire des défauts de type fissure ou décollement d'interface.

Les méthodes d'auscultation des chaussées peuvent être classées suivant leur champ d'action. Certaines mesurent les caractéristiques de surface tandis que d'autres évaluent la structure de chaussée. La thèse s'intéresse plus particulièrement à cette dernière, qui constitue la partie la plus importante en cas de reconstruction. La mesure de déflexion constitue la principale méthode, non destructive, d'évaluation structurelle. Elle permet de déterminer les caractéristiques mécaniques des couches de chaussées.

Dans la suite de ce chapitre, la mesure et l'interprétation de la déflexion sont détaillées.

1.3 Mesure et interprétation de la déflexion

Cette seconde partie est consacrée à la mesure de déflexion et à son interprétation. Dans un premier temps, les différents appareils relevant cette mesure sont décrits et évalués.

Par la suite, les paramètres influents sur la mesure de déflexion sont expliqués. Enfin, la dernière partie se concentre sur l'exploitation de la mesure, à l'échelle locale ou d'un itinéraire.

1.3.1 Appareils de mesure de la déflexion

Il existe de nombreux appareils de mesure de la déflexion. Leurs géométries et leurs principes de mesure différents leur confèrent des performances métrologiques diverses.

1.3.1.1 *Falling Weight Deflectometer (FWD)*

Le Falling Weight Deflectometer (FWD), présenté en Figure I-9, est un appareil de mesure de déflexion non destructif. Dérivé du déflectomètre à boulet (Keryell & Benoist, 1972), ce dispositif est utilisé internationalement. En 1976, il obtient une reconnaissance officielle et devient un moyen d'auscultation des chaussées reconnu. (Braber & Henia, 2008).



Figure I-9: Vue générale d'un FWD (Braber & Henia, 2008).

Ce système de mesure est composé :

- D'une remorque tractée transportant les éléments de mise en charge ainsi que les capteurs de déplacement.
- D'un système de pilotage automatique, d'acquisition et traitement de l'information embarqué dans un véhicule tracteur.

Le principe du FWD repose sur l'application d'un choc vertical bref sur la chaussée. Une chute contrôlée d'un poids provoque l'application d'une charge choisie comprise entre 40 et 120 kN sur la chaussée et jusqu'à 240 kN pour le Heavy Weight Deflectometer (HWD) (Broutin, 2010). La hauteur de chute est réglée entre 2 et 40 cm en fonction de la nature de la structure à tester. La force est appliquée par l'intermédiaire d'une plaque circulaire de 15 cm de rayon. Un bloc de caoutchouc permet le ralentissement de l'application de la charge afin de simuler au mieux le chargement progressif d'un poids lourds circulant à 70 km/h (chargement à environ 30 Hz). La transmission de la charge se fait par un ressort dont la constante de

Chapitre I : Recherche bibliographique

raideur permet de définir la durée du chargement. Les capteurs sont répartis sur une distance d'environ 2.4 m à partir de l'emplacement de la charge, le premier reposant au droit de la charge. La déflexion est alors relevée et enregistrée par l'intermédiaire de géophones (entre 9 et 15). La Figure I-10 montre le principe de mesure du FWD.

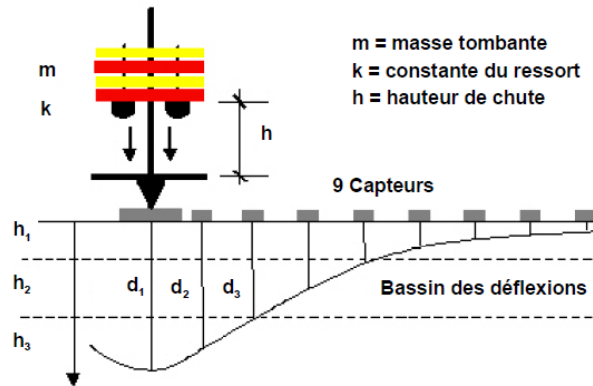


Figure I-10 : Principe de mesure du FWD (Wurckler, 2010).

Le FWD permet d'obtenir la déflexion maximale en chaque point de mesure. L'exploitation des courbes décrit en un certain nombre de points, (correspondant au nombre de géophones), le demi-bassin de déflexion sous une sollicitation connue qui doit représenter le passage d'un essieu arrière de poids lourd. La déflexion maximale se situe sous le point d'application de la charge et la valeur minimale au point le plus éloigné de la charge.

1.3.1.2 Poutre Benkelman

Mis au point par la Western Association of State Highway Organizations (WASHO) en 1952, ce système simple repose sur le principe du bras de levier pour mesurer la déflexion au passage d'une roue chargée. Il est considéré comme la référence historique pour la mesure de déflexion (Figure I-11). Cet appareil de mesure est régi par la Norme Déflexion NF P98 200-2 (AFNOR, 1992).



Figure I-11: Poutre de Benkelman.

Chapitre I : Recherche bibliographique

L'essai de déflexion à la poutre de BENKELMAN a pour objectif de mesurer la déflexion de la couche de chaussée sous l'effet de la charge de l'essieu arrière jumelé de référence (130 kN). Une fois le système positionné et calibré, le véhicule recule et la mesure est relevée. Le comparateur ou le capteur de déplacement placé sur la poutre permet de lire la demi-déflexion de la couche de chaussée qui fléchit sous la charge. Cette valeur est multipliée par deux pour retrouver la déflexion (Autret, 1969). La Figure I-12 représente le principe de mesure de la poutre BENKELMAN.

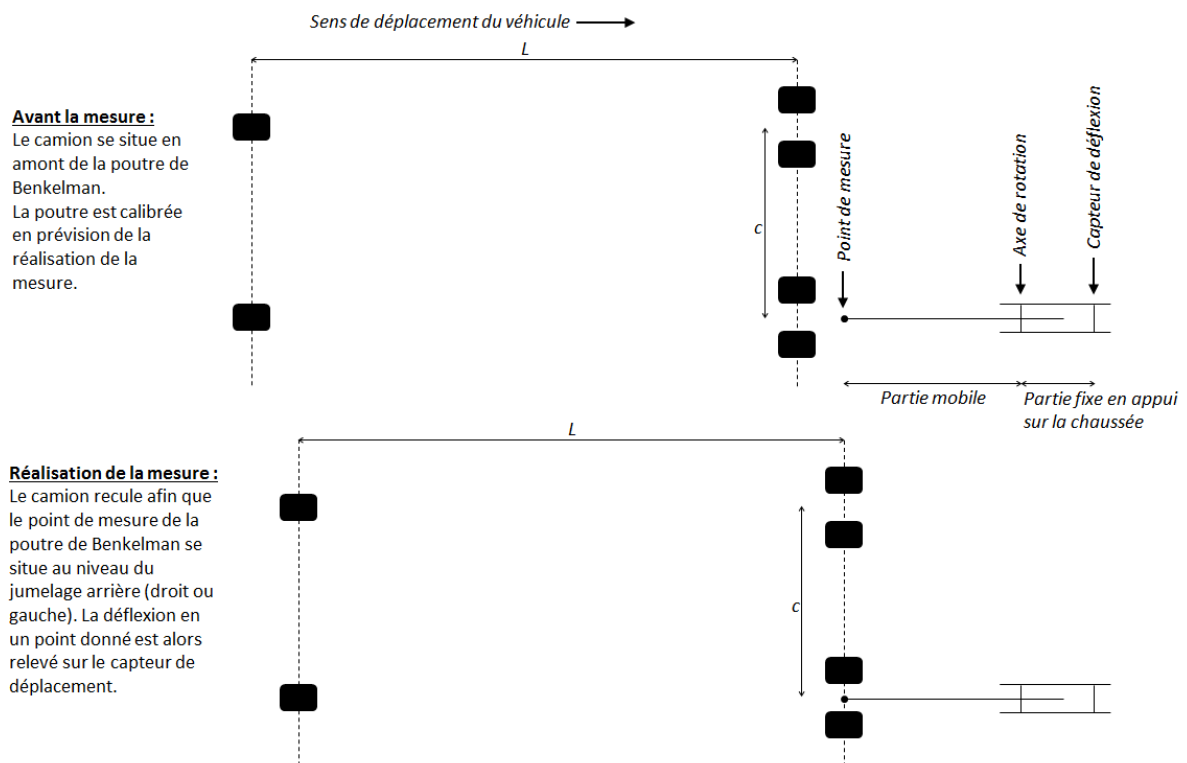


Figure I-12: Principe de mesure de la poutre Benkelman.

La prise de mesure avec ce dispositif représente un faible coût financier. Il peut également servir à l'essai de plaque (qui permet de mesurer le module de déformation d'une couche de sol et l'efficacité du compactage) (Indian Roads Congress, 1997). Cependant, la prise de mesure est longue (entre 10 et 20 mesures par heure), ponctuelle et ne fournit pas un bassin de déflexion mais seulement une valeur de déflexion maximale.

1.3.1.3 Déflexographes

Les années 1960 ont marqué le début du développement des déflexographes, systèmes d'auscultation non destructif à grand rendement, avec une mesure quasi-continue. Ils sont conçus pour mesurer la déflexion sous un jumelage standard. La construction ou le renforcement de chaussées, de plus en plus rigides, qu'elles soient bitumineuses ou à assise traitée aux liants hydrauliques, a amené à la mise en œuvre de différentes versions d'appareils. L'évolution des performances s'est progressivement réalisée comme suit :

Chapitre I : Recherche bibliographique

Modèle 02, à partir de 1970 : Inversion de la position des bras de la poutre de mesure pour pouvoir déterminer le rayon de courbure du bassin de déflexion. Il est régi par la Norme Déflexion NF P98 200-3 (AFNOR, 1993);

Modèle 03, en 1972 : Allongement du châssis afin de mesurer les déflexions et les rayons de courbure pour les faibles valeurs de déflexion. Il est régi par la Norme Déflexion NF P98 200-4 (AFNOR, 1993); (Autret, 1972)

Modèle 04 en 1984 : Allongement de la poutre et modification de la géométrie de la poutre, afin d'améliorer encore la mesure des faibles déflexions. Il est régi par la Norme Déflexion NF P98 200-5 (AFNOR, 1993);

Nouvel appareil MLPC FLASH (Figure I-13): Nouvelle conception d'ensemble de la poutre, de ses systèmes de guidage et du tracteur, afin de pouvoir porter la vitesse de mesure à 7 km/h sans dégrader la précision des appareils les plus longs de type 04 (De Boissoudy, et al., 1984). L'élaboration du déflectographe Flash a permis l'auscultation d'itinéraires plus sinueux grâce à sa conception. Il repose sur un principe de mesure similaire aux autres déflectographes. Toutes ces évolutions ont permis l'augmentation de la précision de mesure afin que l'appareil soit rendu utilisable sur tous types de chaussées. Le déflectographe FLASH relève le bassin de déflexion en 91 points sur une distance de 1.5 m (axe et rive) et enregistre aussi la température de surface de la chaussée (à 1 °C près). La mesure de déflexion maximale se fait en temps réel (à 0,01 mm près). Le pas de mesure, lui, reste suffisamment dense (10 m à 7 km/h, 5 m à 3.5 km/h).



Figure I-13 : Déflectographe Flash.

Les caractéristiques géométriques de ces quatre principaux appareils sont recensées dans la Figure I-14 et le Tableau I-5.

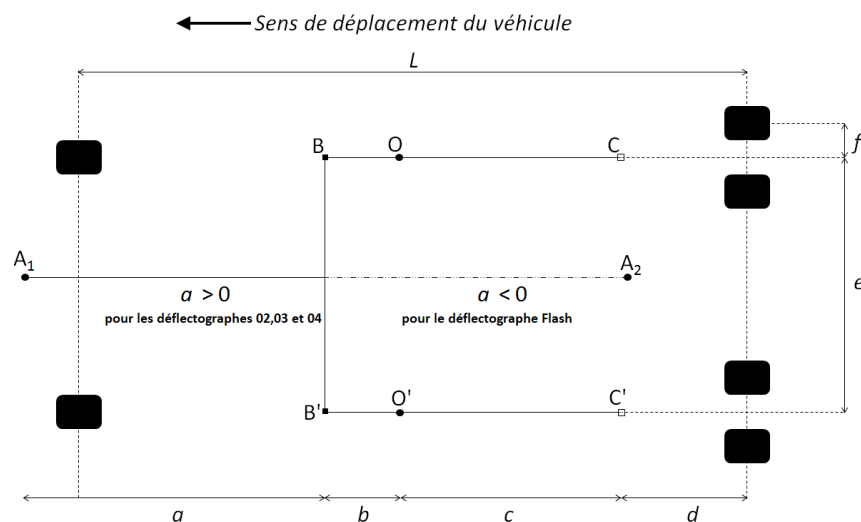


Figure I-14 : Géométrie de la poutre des déflectographes (début de mesure) (Keymanesh, 2001).

Tableau I-5 : Caractéristiques géométriques des différents déflectographes (Keymanesh, 2001).

| | D02 | D03 | D04 | Flash |
|---|---------|---------|---------|---------|
| L : Distance entre l'essieu arrière et l'essieu avant (m) | 4.8 | 6.75 | 6.75 | 4.8 |
| e : Distance entre les centres des deux jumelages (m) | 1.83 | 1.86 | 1.86 | 1.793 |
| f : Distance entre le centre d'un jumelage et le centre de l'une des deux roues du jumelage (m) | 0.1875 | 0.1875 | 0.1875 | 0.1875 |
| c : Longueur du bras palpeur OC (m) | 1.25 | 2.15 | 2.15 | 1.616 |
| b : Distance entre le patin B et l'axe de rotation O (m) | 0.135 | 0 | 0.4 | 0 |
| a : Distance entre le patin A et l'axe BB' (m) | 1.375 | 2.15 | 4.25 | -3.75 |
| d : Position du patin C par rapport au centre du jumelage en début de mesure (m) | 1.15 | 1.45 | 1.45 | 1.5 |
| Poids de l'essieu avant (N) | 54.180 | 45.300 | 45.300 | 54.180 |
| Poids de l'essieu arrière (N) | 128.050 | 128.050 | 128.050 | 128.050 |

Le dispositif se présente sous la forme d'un camion porteur d'un système de mesure placé sous le châssis. Une mesure de déflexion est effectuée entre chaque jumelage de l'essieu arrière du véhicule, par des bras palpeurs et articulés sur une poutre de référence. Cette dernière, reposant sur la chaussée, est dissociée du véhicule à intervalle régulier pour effectuer deux mesures en parallèle (en axe et en rive). La déflexion est alors enregistrée jusqu'à ce que les jumelages viennent légèrement en avant des patins palpeurs (D02, D03 et D04). La poutre est alors prise en charge par un système de traction entièrement piloté depuis la cabine du camion par les opérateurs, ramenée vers l'avant dans sa position initiale, pour un nouveau cycle au point de mesure suivant. La vitesse du porteur est constante et réglée sur le pas de mesure désiré (De Boissoudy, et al., 1984). La Figure I-15 présente le principe de fonctionnement du déflectographe au cours d'une mesure.

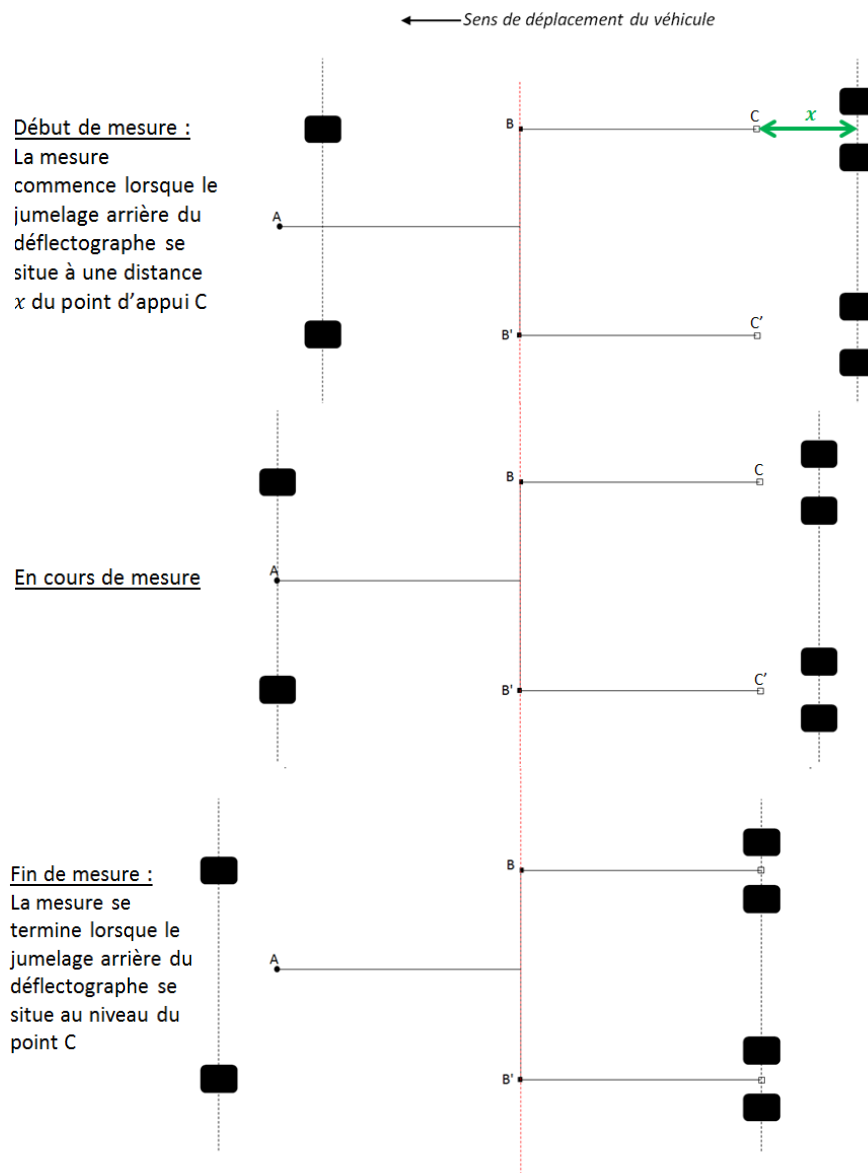


Figure I-15: Principe de fonctionnement du déflectographe Lacroix (Braber & Henia, 2008) (Autret, 1972).

I.3.1.4 Curviamètre

Le curviamètre (Figure I-16) est un appareil d'auscultation non destructive des chaussées à grand rendement régi par la Norme Déflexion NF P98 200-7 (AFNOR, 1997). Il permet de réaliser des mesures quasi-continues. Le nom « curviamètre » vient de la méthode d'analyse des mesures, qui consiste à déterminer la déflexion et le rayon de courbure du bassin (Paquet, 1977). Il est conçu pour déterminer la déflexion sous un jumelage standard. Ce dispositif donne une vue d'ensemble du réseau ausculté. Il permet l'auscultation d'environ 65 km par jour sur autoroute (Van Buylaere, 2016). Son principe repose sur la mesure de déflexion de la chaussée au passage d'un essieu français standard (13 tonnes) à une vitesse de 18 km/h (5 m/s) avec une précision de 0.02 mm. Tous les 5 m, un géophone, posé sur la surface de la route au moyen d'une chaîne déroulante, mesure la vitesse de déplacement vertical lors du passage de l'essieu arrière. Une fonction de transfert est ensuite utilisée pour en déduire la déflexion. Le bassin relevé est décrit en cent points (Van Buylaere, 2016).



Figure I-16 : Vue globale d'un curviamètre.

La Figure I-17 présente le principe de fonctionnement du curviamètre. Au moyen d'une chaîne (système à chenille) portée par le véhicule de chargement, un géophone est déposé sur la chaussée tous les 5 m. Celui-ci mesure la vitesse de déplacement vertical de la chaussée au passage de l'essieu arrière du poids lourd. La réponse ne donne pas instantanément la déflexion mais l'accélération verticale en ce point de la chaussée, qui au moyen d'une double intégration en temps réel permet de calculer la déflexion (Paquet, 1977).

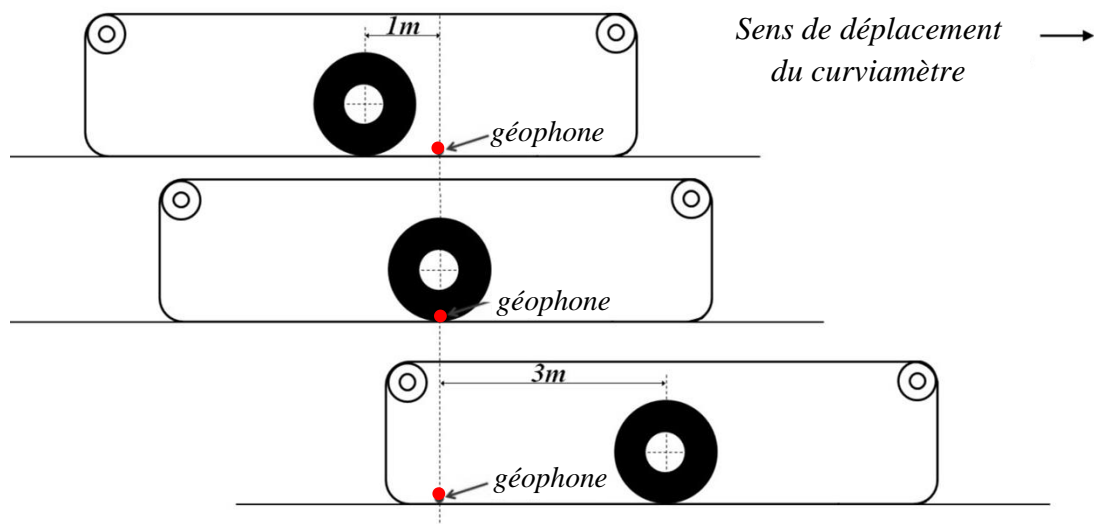


Figure I-17: Principe de mesure du curviamètre (Paquet, 1977).

1.3.1.5 Appareils de mesure de déflexion à grande vitesse

Depuis la fin des années 1990, des appareils d'auscultation à grande vitesse relevant la mesure de déflexion ont vu le jour. Ceux-ci sont conçus pour s'insérer parfaitement dans le trafic.

1.3.1.5.1 Traffic speed deflectometer (TSD)

Le premier prototype du TSD fut développé dans les années 2000 au Danemark par Greenwood Engineering. Il s'agit d'un système d'auscultation des chaussées non destructif à

Chapitre I : Recherche bibliographique

grand rendement. Les évaluations de chaussées avec le TSD (Figure I-18) ont pour objectif de mesurer la déflexion de chaussée sous l'effet d'une charge de l'essieu arrière jumelé de référence danois (10 T). Ces mesures permettent de déterminer la portance et la fatigue de la chaussée (Krarup, et al., 2006), (Langdale, et al., 2009). Sa vitesse varie entre 30 km/h et 90 km/h avec des pas de mesures ajustables (0.1 m, 1 m ou 10 m).

Selon le type de TSD, quatre à dix lasers Doppler, fixés sur une poutre à l'intérieur de la remorque, mesurent la vitesse verticale du bassin de déflexion en différents points. Pour déterminer le déplacement vertical, une intégration en continu des valeurs est réalisée.

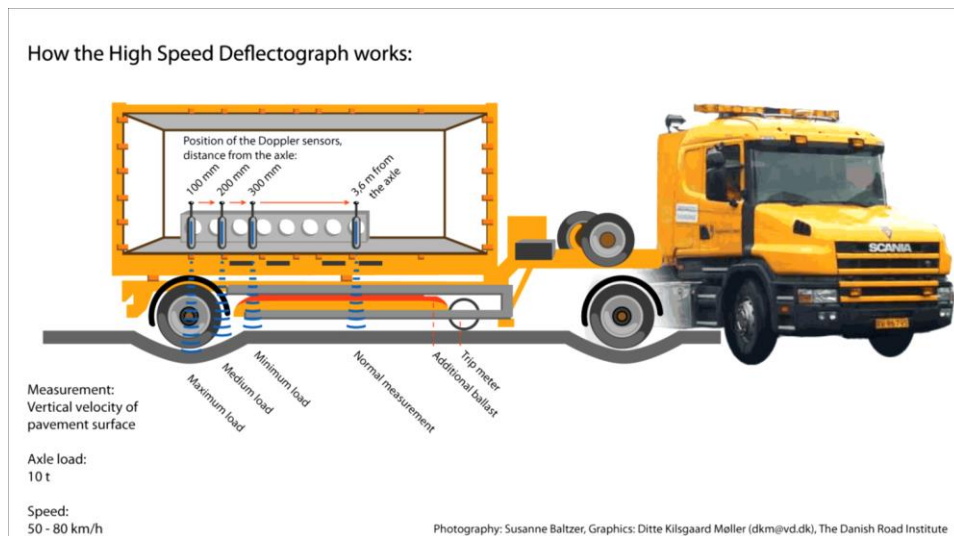


Figure I-18 : Vue générale du TSD (Baltzer, et al., 2010).

I.3.1.5.2 Rolling Weight Deflectometer (RWD)

Cet appareil de mesure, dont le premier prototype est né à la fin des années 1990, a été développé par l'Applied Research Association (ARA), inc. La Figure I-19 présente une vue générale du RWD. Du fait de son intégration dans la circulation, il permet de déterminer la déflexion d'une chaussée sans causer d'interruptions ou de gênes dans le trafic. En circulant entre 65 km/h et 95 km/h, il est capable d'ausculter entre 320 et 480 km de chaussées par jour.



Figure I-19: Vue générale du système du RWD (Elseifi, et al., 2012).

Chapitre I : Recherche bibliographique

Le principe du RWD repose sur l'utilisation de quatre lasers de haute précision (Figure I-20). Disposés sur une poutre en aluminium de 7.8 m, ils utilisent la méthode de triangulation, à intervalle de 2.45 m dont un est situé dans l'axe de la roue arrière. Ce dispositif est placé sur le côté droit du camion qui représente l'emplacement le plus endommagé de la chaussée. En comparant le profil de surface avant, pendant et après le passage de la charge, il est possible de déterminer la déflexion maximale de la chaussée.

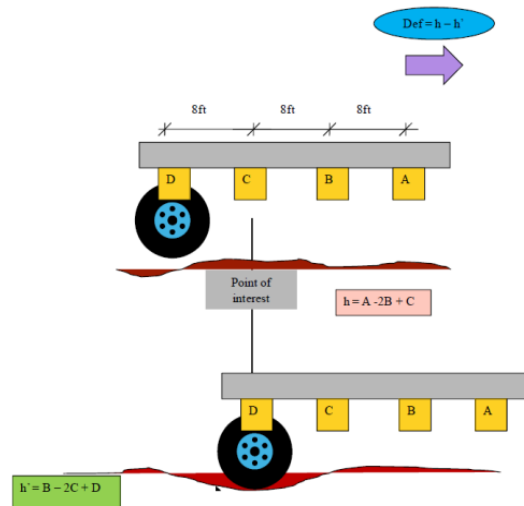


Figure I-20 : Méthode de triangulation (Elseifi, et al., 2012).

Ces mesures relatives donnent la capacité structurelle de la chaussée ainsi que les épaisseurs des différentes couches. Elles permettent de renseigner sur les caractéristiques de la chaussée et ainsi de planifier des auscultations plus précises avec le FWD.- (Elseifi, et al., 2012) (Steele, et al., 2009).

I.3.1.5.3 Rapid Pavement Tester (Raptor)

Le RAPTOR est un appareil d'auscultation non destructif pour l'évaluation de la surface et de la structure de chaussée. Cet appareil, de la famille des RWD, roule entre 2 et 100 km/h. Il s'intègre parfaitement dans le trafic et offre une collecte de données en continu (Dynatest, 2018).



Figure I-21 : Raptor (Dynatest, 2018).

Cet appareil détermine la déflexion de la chaussée à l'aide de 9 à 24 lasers disposés entre 3.6 m avant la charge et 1.5 m après son passage. En utilisant la corrélation croisée normalisée sur les images collectées à partir des lasers, il est capable de déterminer la déflexion. La technique de calibration des lasers du Raptor est très précise et ne nécessite que quelques minutes.

I.3.1.6 Performances métrologiques et limites de ces appareils

I.3.1.6.1 Classes des appareils

La classe de justesse et de répétabilité de l'appareil d'auscultation utilisé est déterminée en comparant la mesure de l'appareil (déflexion ou courbure) avec une valeur conventionnellement vraie, qui est la mesure d'un capteur de déplacement ancré. La méthode d'essai LPC n°39 (Simonin, 1997) définit, au sens de la norme ISO 5725 (NORME ISO 5725-1, 1994), les spécifications concernant l'écart maximal de justesse E_{MJ} et la répétabilité r . Le Tableau I-6 présente les spécifications en déflexion et courbure.

Tableau I-6 : Ecart maximum en justesse et répétabilité pour la mesure de déflexion et de courbure pour chaque classe d'appareil (Simonin, 1997).

| Spécifications | Classe 1 | | Classe 2 | |
|----------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| | Déflexion | Courbure | Déflexion | Courbure |
| Justesse | $E_{MJ}(d) \leq 0.21d + 0.12$ | $E_{MJ}(c) \leq 0.15c + 0.0015$ | $E_{MJ}(d) \leq 0.07d + 0.12$ | $E_{MJ}(c) \leq 0.15c + 0.0015$ |
| Répétabilité | $r(d) \leq 0.283d + 0.085$ | $r(c) \leq 0.7c$ | $r(d) \leq 0.2d + 0.085$ | $r(c) \leq 0.35c$ |

d et c correspondent respectivement à la déflexion et à la courbure de référence.

I.3.1.6.2 FWD

Une évaluation du FWD a été menée en 1997 pour contrôler sa répétabilité, sa justesse et sa reproductibilité (Lepert, et al., 1997).

Chapitre I : Recherche bibliographique

Pour évaluer la justesse, des comparaisons avec une valeur de déflexion de référence (capteur ancré à 6 m de profondeur) ont été réalisées. Ces mesures ont été conduites pour l'ensemble des géophones.

L'évaluation de la répétabilité se fait par la répétition (deux ou trois fois) de mesures réalisées sur plus de 150 points.

Enfin l'estimation de la reproductibilité est conduite par comparaison des mesures d'appareils de technologies différentes.

Ces études ont permis de dégager les conclusions suivantes :

- Très bonnes performances métrologiques ;
- Bonne justesse relative (Ecart de déflexion maximale avec le capteur ancré inférieur à 15 %) ;
- Bonne répétabilité ;
- Déflectomètre de classe 2 ;
- Appareil de mesure très précis ;
- Etendue de mesure pour la déflexion entre 0.2 mm/100 et 220 mm/100 ;
- Reproductibilité faible (Ecart entre les mesures de $\pm 25\%$ à $\pm 50\%$).

La reproductibilité est mauvaise surtout en présence d'appareils FWD de technologie différente. Le respect des procédures d'étalonnage est très contraignant.

Le FWD est un dispositif d'auscultation des chaussées adapté à un suivi très précis et juste de sections témoins, des essais de recherches ou encore dans le cadre d'études d'entretien de sections relativement courtes. Il peut être utilisé sur tout type de structure routière (souple, semi-rigide et rigide). Avec une mesure toutes les minutes, son rendement journalier moyen sur autoroute est de 15 km à 20 km avec une mesure tous les 100 m (Van Buylaere, 2017). Cependant, du fait de ses mesures ponctuelles, il est difficilement utilisable à l'échelle d'un réseau et on lui préfère des appareils roulants.

1.3.1.6.3 Déflectographes

Des études ont été menées afin d'évaluer les performances de chaque type de déflectographe en justesse et répétabilité (Simonin & Riouall, 1997) (Vialletel & Simonin, 1997). Une évaluation des déflectographes 02, 03 et 04 et du déflectographe Flash réalisées en 1997 permet d'estimer la justesse et la répétabilité des mesures de déflexion et de courbure de ces appareils.

Déflectographes 02, 03 et 04

Pour cette évaluation, des essais ont été effectués sur huit sections de structures différentes. La justesse des déflectographes se détermine par le calcul de la moyenne des valeurs absolues des écarts entre la mesure de l'appareil et la valeur de référence, mesurée par le capteur ancré.

Chapitre I : Recherche bibliographique

Sur chaussée souple, les écarts entre la mesure et la référence sont inférieurs à 30 % pour le D02 et 12 % pour le D03. Cependant sur d'autres sections plus rigides, les mesures sont nettement moins justes avec des écarts allant de 4 % à presque 120 %. Pour l'ensemble des structures, ces appareils sous-estiment la déflexion de référence.

Les mesures du déflectographe D04 sont plus justes avec un écart relatif de moins de 30 % pour les chaussées souples et bitumineuses. Il mesure de façon satisfaisante la déflexion sur les chaussées rigides. (De Boissoudy, et al., 1984).

De par l'interprétation et l'analyse de ces essais et en se rapportant au Tableau I-6, les classes des appareils ont pu être définies pour la justesse de la mesure de déflexion. Ainsi, il s'avère que pour les chaussées souples, le déflectographe 02 est de classe 1 et le déflectographe 03 est de classe 2. Le déflectographe 04 est lui considéré de classe 2 pour tous types de chaussées.

Défectographe FLASH

L'évaluation du déflectographe FLASH à Nancy en 1995 (Vialletel & Simonin, 1997) a mené aux conclusions suivantes :

- Justesse et répétabilité en déflexion :
 - Ecart relatif entre la déflexion maximale mesurée et la déflexion de référence inférieurs à 7 % sur chaussées souples (niveau de déflexion maximale de l'ordre de 60 mm/100) ;
 - Ecart relatif entre la déflexion maximale mesurée et la déflexion de référence inférieurs à 57 % sur chaussées rigides (niveau de déflexion maximale de l'ordre de 20 mm/100) ;
 - Les mesures de répétabilité en déflexion ne dépassent jamais la limite de classe 2 imposée par la méthode LPC n°39.
 - Plus la chaussée est souple, plus l'appareil est juste.
- Justesse et répétabilité en courbure :
 - Les écarts relatifs entre la courbure de référence et celle mesurée se situent entre 6 % et 200 %.
 - Les mesures de répétabilité en courbure ne dépassent que rarement la limite de classe 2 imposée par la méthode LPC n°39.

Sur l'ensemble des quatre sections, le déflectographe Flash est considéré de classe 2 en déflexion et en courbure. Il présente les meilleures performances métrologiques des déflectographes.

1.3.1.6.4 Curviamètre

Une évaluation du curviamètre a été menée en 1997 (Lepert, et al., 1997). L'obligation de maintenir une vitesse de mesure constante et les difficultés à réaliser des mesures en virages ou sur une courte distance sont des limitations à la mesure de déflexion par le curviamètre.

I.3.1.6.4.1 *Justesse et répétabilité en déflexion*

Dans l'évaluation réalisée en 1997, les écarts relatifs entre la mesure de référence et celle du curviamètre varient entre 3 % et 22 % sur structure souple et bitumineuse. Pour un faible niveau de déflexion sur structure rigide, la justesse en déflexion est moins bonne puisque l'écart est de l'ordre de 40 %. Pour l'ensemble des sections, la mesure du curviamètre sous-estime la déflexion.

La valeur moyenne de la répétabilité des mesures de déflexion maximale vérifie la relation :

$$r_d = 0.16 * d_{max} + 0.023 \quad (I-5)$$

Avec
 r et d_{max} en mm.

I.3.1.6.4.2 *Justesse et répétabilité en courbure*

Pour les trois sections, l'écart relatif entre la mesure de référence et la mesure du curviamètre varie entre 40 % et 75 %. La mesure du curviamètre sous-estime la courbure.

La valeur moyenne de la répétabilité des mesures de courbure peut s'exprimer par :

$$r_c = 0.35 * c \quad (I-6)$$

Avec r_c et c en m^{-1} .

D'après les résultats obtenus en termes de justesse et de répétabilité, en se rapportant au Tableau I-6, le curviamètre présente une précision de classe 2 pour la mesure de déflexion, pour tous types de chaussées. Pour les structures rigides, la mesure du rayon de courbure est par contre peu précise.

I.3.1.6.5 *Comparaison du FWD, du curviamètre et des déflectographes Flash et 04*

Simonin et al. réalisent en 2015 une évaluation métrologique de la mesure de déflexion de certains appareils d'auscultation (Simonin, et al., 2015). Les travaux se penchent sur le curviamètre, le FWD et les déflectographes 04 et Flash. La justesse des appareils est évaluée par comparaison à la mesure d'un capteur ancré, considéré comme référence.

La Figure I-22 présente les résultats obtenus lors de cette campagne d'essais. Le FWD et le curviamètre sont les deux appareils les plus justes. Pour un faible niveau de déflexion, les erreurs sont très fortes pour les déflectographes alors qu'elles sont de l'ordre de 3 mm/100 pour le FWD et le curviamètre. De même, pour une déflexion comprise entre 20 mm/100 et 50 mm/100, la justesse du curviamètre et celle du FWD sont satisfaisantes avec des écarts

Chapitre I : Recherche bibliographique

avec la déflexion de référence de 5 mm/100 alors que ces écarts sont proches de 15 mm/100 pour les déflectographes. Le FWD est l'appareil le plus précis de cette campagne d'essai.

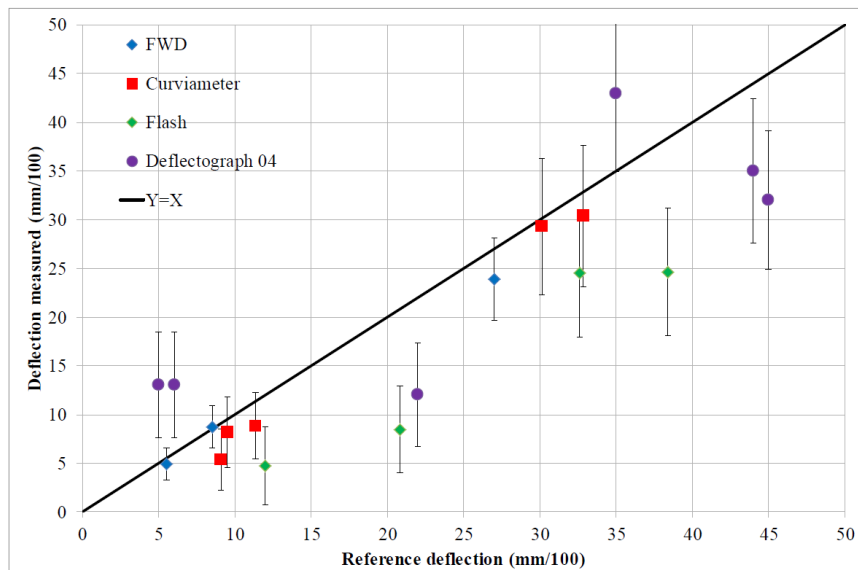


Figure I-22 : Comparaison des valeurs de déflexions maximales mesurées par les différents appareils avec la déflexion de référence obtenue par le capteur ancré, pour des déflexions inférieures à 50 mm/100 (Simonin, et al., 2015).

Le Tableau I-7 récapitule les données de la Figure I-22 et les auteurs tirent les conclusions suivantes :

Tableau I-7 : Estimation des intervalles de mesure pour les différents appareils d'auscultation.

| Appareils de mesure | de | Niveau de déflexion mesuré par les appareils | | | |
|----------------------|----|--|-----------|-----------|-----------|
| | | 10 mm/100 | 20 mm/100 | 30 mm/100 | 50 mm/100 |
| Déflectographe 04 | de | [12 ; 22] | [5 ; 15] | [29 ; 43] | [33 ; 47] |
| Déflectographe Flash | | [1 ; 9] | [5 ; 14] | [16 ; 30] | [26 ; 50] |
| Curviamètre | | [5 ; 11] | [16 ; 22] | [23 ; 37] | [41 ; 55] |
| FWD | | [8 ; 12] | [18 ; 22] | [25 ; 33] | [45 ; 53] |

- La mesure des déflectographes est souvent imprécise puisque ces appareils sous-estiment la déflexion de référence.
- La mesure du curviamètre, plus précise, sous-estime plus légèrement la déflexion de référence. Le caractère roulant de cet appareil lui procure un avantage de taille pour une évaluation des réseaux.
- Cependant, le curviamètre et les déflectographes ne permettent pas toujours d'obtenir des résultats satisfaisants avec le calcul inverse des modules de chaussées.
- Le FWD est l'appareil le plus précis et également le plus répétable. Son utilisation sur de petites sections est fortement recommandée et fournit par calcul inverse des modules des résultats satisfaisants.

I.3.1.6.6 Traffic Speed Deflectometer (TSD)

Des évaluations du TSD (Baltzer, et al., 2010) ont montré que cet appareil possède :

- Une bonne répétabilité pour la mesure du bassin de déflexion ;
- Une bonne corrélation avec les mesures du FWD et du déflectographe et davantage avec ce dernier ;
- Une bonne reproductibilité mais avec des variations de niveau de déflexion.

D'après une autre évaluation (Ferne, et al., 2009) menée sur des chaussées bitumineuses épaisses, les mesures de bassin de déflexion sont influencées par la vitesse des appareils, du fait du comportement viscoélastique des matériaux de chaussée.

I.3.1.6.7 RWD

Une évaluation du RWD a été réalisée en Louisiane sur 16 sites différents. Il a été étudié la répétabilité, la vitesse de mesure et une comparaison avec le FWD (Elseifi, et al., 2012).

Ces essais ont permis de déterminer:

- Une répétabilité acceptable de 15 % pour n'importe quelle vitesse ;
- Une bonne corrélation entre les appareils de mesure ;
- Une très faible sensibilité à la vitesse de collecte.

I.3.1.6.8 RAPTOR

Une campagne d'essai a comparé les mesures du Raptor à celles d'un FWD. Cette étude montre une bonne correspondance entre les mesures du FWD et celles du Raptor. La Figure I-23 montre également que cet appareil est répétable. Cependant, les niveaux de déflexion mesurés dans l'étude sont élevés (entre 20 mm/100 et 160 mm/100) (Dynatest, 2018).

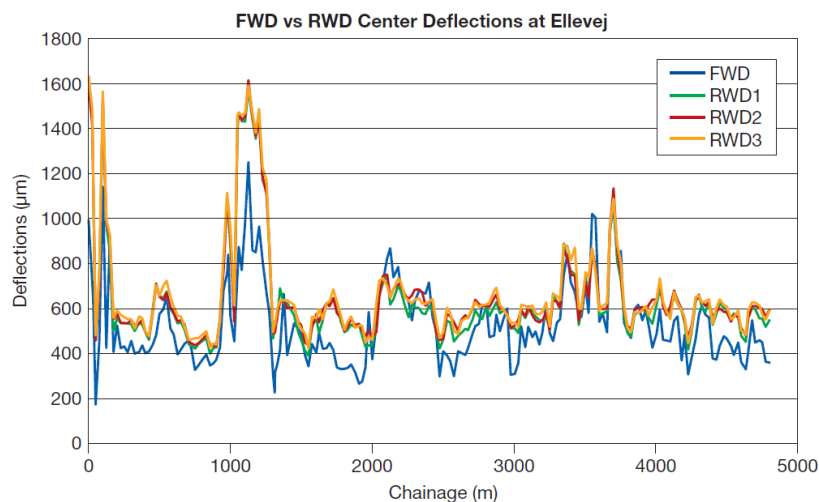


Figure I-23 : Comparaison des déflexions maximales mesurées par le FWD et par le Raptor (RWD) sous la charge (Dynatest, 2018).

Les campagnes d'essais des appareils à grande vitesse sont généralement réalisées sur des chaussées avec un fort niveau de déflexion. De plus, le FWD ou le deflectographe, utilisés pour la comparaison des mesures, ne peuvent pas être considérés comme appareils de référence. Des études sur des chaussées plus rigides et des comparaisons des mesures avec celles d'un capteur ancré seraient utiles pour compléter ces résultats.

1.3.2 Paramètres influents sur la mesure de déflexion

La mesure de déflexion est influencée par plusieurs facteurs. Le premier est directement lié au principe de fonctionnement des appareils. Ceux-ci engendrent des biais, liés à leur principe de mesure. Les températures et fréquences de sollicitation influencent également le niveau de déflexion, tout comme les défauts présents dans les structures de chaussées, qui génèrent de fortes variations de déflexion.

1.3.2.1 Effets liés aux appareils de mesure

En relevant la déflexion, les appareils, par leur chargement et par leur principe de mesure, introduisent des erreurs dans le bassin mesuré.

1.3.2.1.1 Effet de la déflexion initiale

En début de mesure de déflexion, le capteur de mesure se situe à une distance x_{max} du jumelage arrière qui constitue la charge de référence. En ce point, la déflexion initiale est, par hypothèse, considérée comme nulle. De la même façon, le rayon de courbure à une valeur initiale considérée comme nulle en début de mesure (Keymanesh, 2001). Ces hypothèses sont généralement inexactes, car la distance entre le point de mesure et l'essieu arrière étant limitée (1.5 m seulement dans le cas des deflectographes, par exemple), le point de mesure initial se situe dans la zone d'influence de la charge, et donc la chaussée présente une déformation non nulle en ce point, qui est d'autant plus grande que la chaussée est rigide.

I.3.2.1.2 Effet des charges multiples

Autre hypothèse simplificatrice, l'interprétation de la mesure de déflexion est généralement faite en considérant que le bassin de déflexion représente la déformée de la chaussée sous un essieu unique (essieu standard à roues jumelées, chargé à 130 kN). Cependant, l'influence des autres essieux du poids lourd de mesure a un impact sur la déformée de la chaussée. La déflexion effectivement mesurée correspond donc à la déflexion produite par le système à charges multiples du camion de mesure (Keymanesh, 2001).

I.3.2.1.3 Effet du déplacement de la base de référence

Cette erreur de mesure apparaît exclusivement pour la poutre BENKELMAN et les deflectographes. En cours d'essai, la poutre de mesure est affectée par un mouvement vertical, lorsque celle-ci se situe dans la zone où la chaussée se déforme sous l'influence des charges des essieux du véhicule de mesure. Ce déplacement de la poutre induit une sous-estimation de la déflexion réelle.

Cette erreur de mesure peut être réduite en adaptant les appareils de mesure (en allongeant la poutre de mesure, en particulier), ou par un post-traitement des mesures permettant de tenir compte du déplacement du point d'appui de la poutre.

I.3.2.2 *Effets liés à la température et à la fréquence de sollicitation*

Le comportement des matériaux bitumineux est fortement sensible à la température et la fréquence de sollicitation, et ces paramètres influent fortement sur la déflexion. Sur les chaussées bitumineuses, la déflexion augmente lorsque la température augmente et diminue lorsque la fréquence de chargement augmente.

I.3.2.2.1 Chaussées bitumineuses

Des études de sensibilité, visant à évaluer l'influence de la température et de la fréquence de chargement sur la mesure de déflexion des chaussées bitumineuses ont été conduites à l'aide du logiciel de calcul de structures de chaussées ALIZE (Simonin, et al., 2015). Ces études ont montré que pour une variation de température de ± 5 °C, autour de 20 °C, la variation de déflexion est de l'ordre de 1.7 mm/100 à 3 mm/100. Pour cette même température de 20 °C, la déflexion varie de 4 mm/100 environ lorsque la fréquence varie de 0.5 Hz à 10 Hz. Plus la température est élevée, plus le niveau de déflexion augmente, et plus l'effet de la température devient difficile à corriger. Pour cette raison, il est préconisé de ne pas réaliser de mesures de déflexion à des températures supérieures à 25 °C.

Pour pallier ces effets de la température, des règles de corrections des mesures avec la température ont été proposées. Ces approches reposent généralement sur des relations empiriques, basées sur la température de surface, ou sur la température à mi-hauteur de la structure de chaussée. Elles permettent seulement de corriger la déflexion maximale. Plusieurs relations, utilisées par différents pays, sont données dans le Tableau I-8 (SETRA, 2009). Ces

Chapitre I : Recherche bibliographique

corrections de température sont utilisées uniquement pour les chaussées bitumineuses. Les chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques sont moins sensibles à la température et à la fréquence de chargement.

Chapitre I : Recherche bibliographique

Tableau I-8 : Lois de correction de la déflexion maximale avec la température, pour les chaussées bitumineuses.

| Méthode française | Méthode espagnole | Méthode belge |
|--|------------------------------------|--|
| $d_{15} = \frac{d_T}{1 + K * \frac{T - 15}{15}}$ | $d_{20} = \frac{200d_T}{3T + 140}$ | $d_{20} = k(T)d_T$ <p>Avec</p> $k(T) = 0.00026008T^2 - 0.025892789T + 1.4111835$ |
| <p>d_T : déflexion à la température T d_{15} : déflexion à 15 °C d_{20} : déflexion à 20 °C k: coefficient dépendant du type de structure T : température de surface (ou température de milieu de couche en France)</p> | | |

1.3.2.3 Effets liés aux défauts structurels des chaussées

La présence de défauts dans les couches de chaussées a une influence très néfaste sur leur durée de vie. A partir de mesures réelles ou de simulations numériques de la mesure de déflexion, de nombreuses études ont été menées pour analyser l'effet de différents défauts (fissures, décollements de couches, etc..) sur les déflexions mesurées et proposer des approches permettant de détecter la présence de ces défauts.

1.3.2.3.1 Fissuration

En 1994, (Uddin, 1994) présente des travaux réalisés à partir de modélisations de la réponse du FWD avec le logiciel ABAQUS (Dassault Système, 2011). La Figure I-24 montre les bassins simulés sous une charge dynamique sur une chaussée avec et sans fissure dans la couche traitée aux liants hydrauliques. Pour une chaussée sans défaut, la déflexion maximale est de 81.7 mm/100. En présence d'une fissure, celle-ci est supérieure avec une valeur de 91.1 mm/100 pour une fissure transversale et de 98.5 mm/100 pour une fissure longitudinale. Loin de la charge, ces différences sont moins visibles car la déflexion est affectée par les couches profondes de la chaussée qui ne sont pas fissurées.

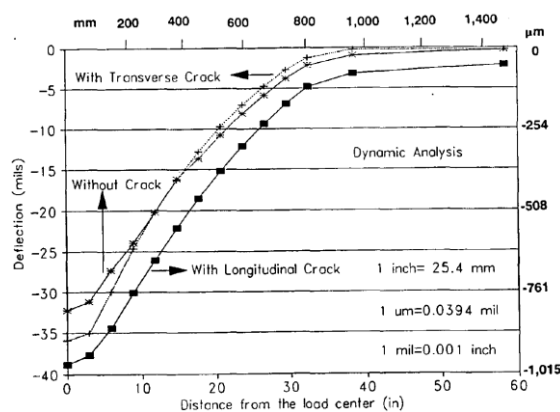


Figure I-24 : Bassins de déflexions simulés avec ABAQUS pour une charge dynamique pour une chaussée avec et sans fissure (Uddin, 1994).

Chapitre I : Recherche bibliographique

Tout comme Grenier (Grenier, 2002), une étude menée par Simonin et al (Simonin, et al., 2015) montre qu'une fissure transversale crée un changement de forme du bassin de déflexion lorsque la mesure est réalisée près de ce défaut. La Figure I-25 présente la chaussée concernée par cette étude ainsi que les différents défauts internes.

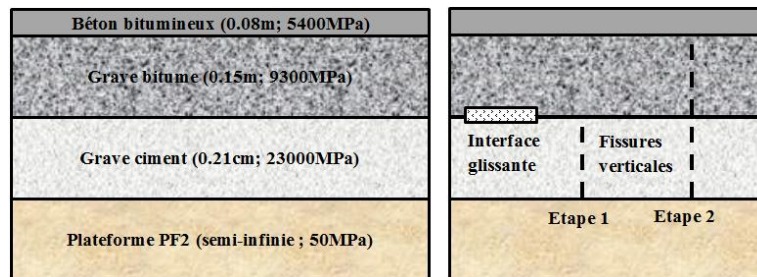


Figure I-25 : Description de la structure semi-rigide avec la position des défauts (Simonin, et al., 2015).

La Figure I-26 compare les bassins simulés à une distance de 0.1 m, 1 m et 2 m de la fissure transversale. Pour les deux distances les plus éloignées, la forme du bassin et le niveau de déflexion sont peu différents. Lorsque la mesure est réalisée à 0.1 m de la fissure, l'évolution de la déflexion maximale n'est pas suffisamment significative puisqu'elle augmente seulement de 3 mm/100. Cependant, le rayon de courbure est, dans cette configuration, un indicateur plus sensible au défaut. Les travaux de (Qiu, et al., 2014) ont conduit à des conclusions similaires. Par ailleurs, cette étude montre qu'une fissure affectant la couche de grave ciment seule, ou la hauteur totale de l'assise (incluant la couche de grave bitume) conduit à des bassins de déflexions similaires.

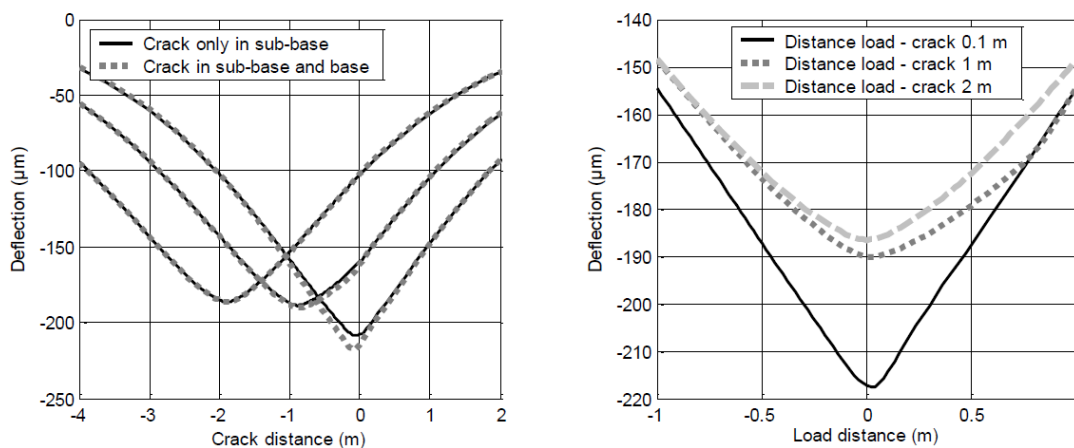


Figure I-26 : Influence de la distance entre la charge et une fissure verticale sur la mesure de déflexion (Simonin, et al., 2015).

D'autres recherches ont obtenu des résultats semblables ((Cong, et al., 2006), (Lee, et al., 1988); (Qiu, et al., 2014)). En 2014, (Qiu, et al., 2014) présentent des travaux sur l'impact de la largeur de la fissure sur la simulation de la mesure de déflexion d'un FWD. La Figure I-27 montre les bassins de déflexions simulés pour cinq largeurs de fissures transversales différentes. Pour une distance entre la charge et la fissure de 0.16 m, on observe des écarts importants entre la déflexion maximale mesurée sur la chaussée saine et celles avec fissures, pouvant atteindre 22 mm/100. La largeur de la fissure a également un impact : lorsque cette

Chapitre I : Recherche bibliographique

largeur passe de 2 mm à 20 mm, la déflexion maximale augmente d'environ 10 mm/100. Cependant, lorsqu'on s'éloigne à plus de 30 cm du point d'application de la charge, l'ensemble des bassins semblent se rejoindre.

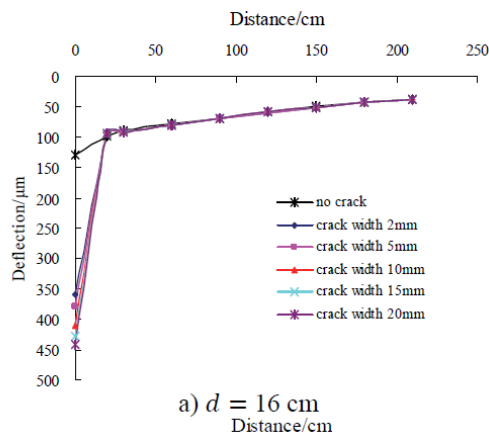


Figure I-27 : Influence de la largeur de la fissure transversale et de la position de la mesure sur le bassin de déflexion. (Qiu, et al., 2014).

La Figure I-28 présente, pour des fissures longitudinales de différentes largeurs, les bassins de déflexion mesurés. Les simulations de mesure ont été réalisées pour une distance entre la fissure et la charge de 35 cm. Le niveau de déflexion maximale sur chaussée saine est inférieur de 15 μm par rapport aux mesures sur chaussées fissurées. Les différentes largeurs de la fissure n'ont que peu d'influence sur les bassins, qui sont très proches. D'après ces études, la déflexion est plus sensible à une fissure transversale qu'à une fissure longitudinale.

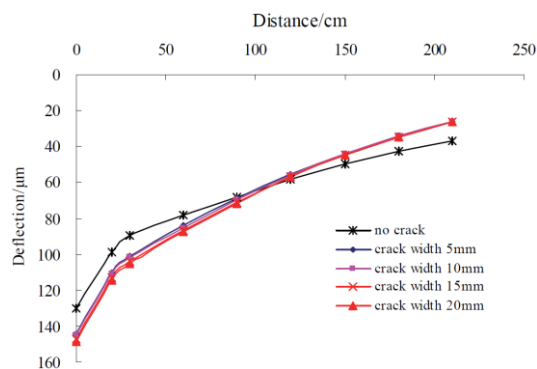


Figure I-28 : Influence de la largeur de la fissure longitudinale sur la mesure de déflexion (Qiu, et al., 2014).

I.3.2.3.2 Défauts de liaison aux interfaces

En 2005, 2006 et 2008, S. Chea et J. Martinez (Chea & Martinez, 2005), (Chea, 2006), (Chea & Martinez, 2008) s'intéressent à la détection de défauts de liaison aux interfaces. Ces derniers sont modélisés sur la structure définie dans la Figure I-25, sous un jumelage standard. La Figure I-29 présente les courbes de déflexions tracées pour différentes étendues de défauts. A travers ce travail, ils montrent que la présence d'un défaut entraîne une déflexion maximale plus importante que sur la chaussée saine. Ces conclusions sont également émises par (Chengchao, et al., 2016), (Yusuf, 2007) à partir de modélisations numériques et par

Chapitre I : Recherche bibliographique

(Simonin, et al., 2013), (Sadoun, et al., 2016) à partir de mesures réelles. Par la suite, ils montrent que l'étendue du défaut a également un effet sur la mesure puisque le niveau de déflexion maximale croît avec la longueur du défaut. Cependant, avec un maximum de 4 mm/100, les écarts de déflexion maximale sont peu significatifs au vu de la justesse et de la répétabilité des appareils de mesure, analysée précédemment. Les bassins de déflexion se rejoignent à environ 1 m de la charge. L'influence des différents défauts ne s'observe qu'à proximité de la charge (jusqu'à environ 1 m).

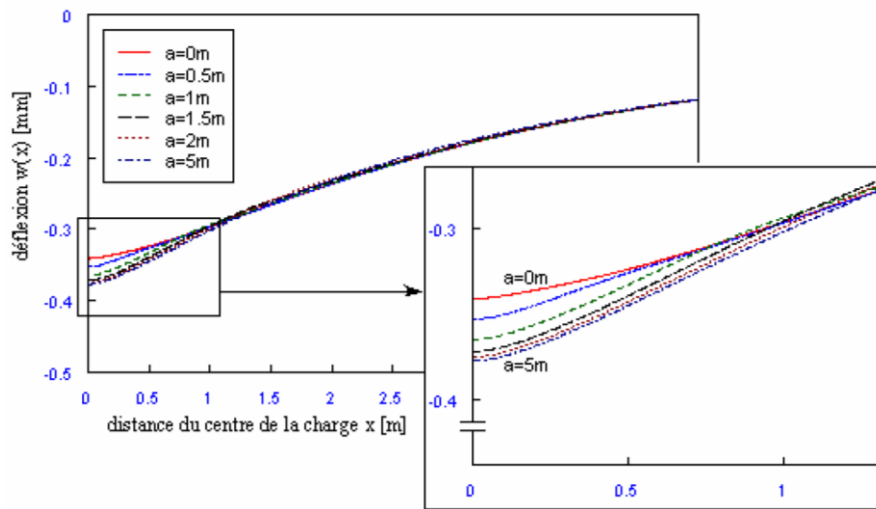


Figure I-29 : Evolution des bassins de déflexions pour différentes longueurs d'interface glissante (Chea & Martinez, 2005).

La Figure I-30 présente l'évolution du rayon de courbure sur une chaussée en présence d'un défaut d'interface d'une longueur de 2 m. Le rayon de courbure est un paramètre plus sensible à la présence de ce type de défaut. En effet, il décroît de 35 % entre la partie saine et endommagée de la structure.

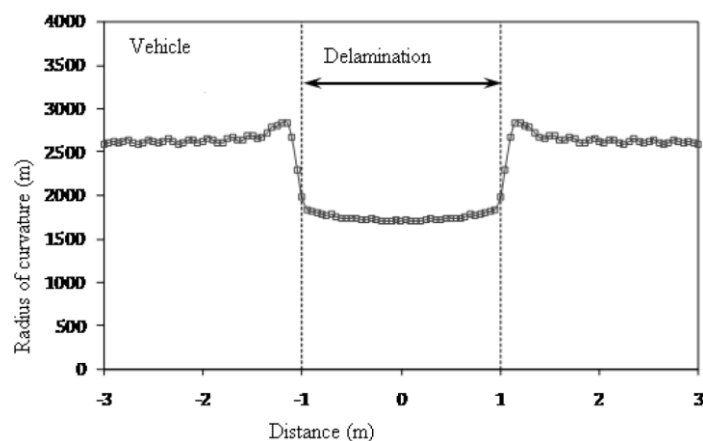


Figure I-30 : Evolution du rayon de courbure en présence d'un défaut d'interface (Chea & Martinez, 2008), (Simonin, et al., 2015).

Enfin, le calcul de la dérivée première s'avère également un indicateur intéressant dans ces études sur les interfaces de chaussées. En 1989, (Nougier, 1989) présente des courbes de la dérivée première de la déflexion, calculée par la méthode des différences divisées utilisée ici.

La Figure I-31 présente les courbes de dérivée première de la mesure de déflexion. L'étendue du défaut a une forte influence sur la forme de la dérivée première de la déflexion. Ainsi, plus l'étendue est importante, plus les valeurs maximales de la dérivée sont élevées. De plus, le minimum local de la dérivée est situé au niveau de l'abscisse du bord du défaut. Ce passage est très identifiable sur les courbes de dérivées premières. Au-delà de ce point, les différentes courbes se rejoignent pour finalement se confondre. Ce paramètre apparaît donc plus sensible au défaut que la déflexion maximale.

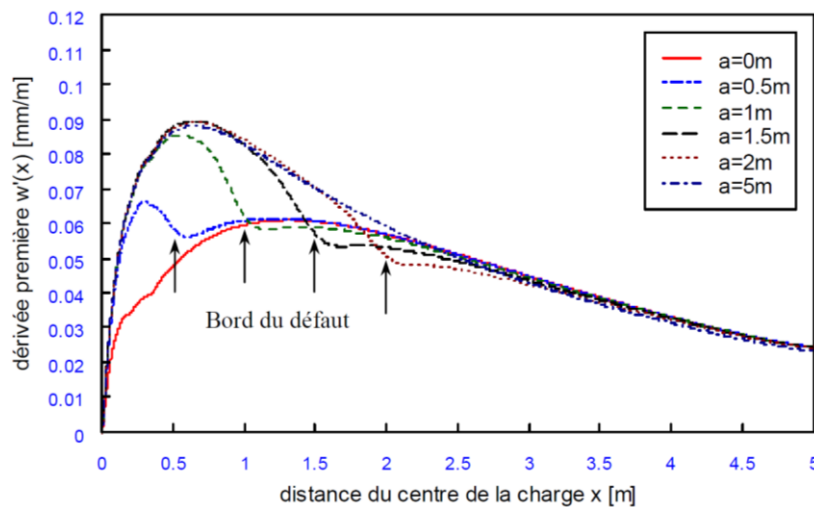


Figure I-31 : Courbes de la dérivée première des bassins de déflexions au voisinage d'un défaut d'interface de longueur a (Chea, 2006).

I.3.3 Exploitation des mesures de déflexion

A partir des mesures de déflexion, deux types d'exploitations sont possibles :

- Soit une analyse à l'échelle locale avec estimation de la durée de vie résiduelle de la chaussée et diagnostic de l'état des couches de chaussée.
- Soit une analyse à l'échelle d'un itinéraire avec la détection des zones homogènes ou dégradées.

Un tableau récapitulatif des indicateurs classiques de la mesure de déflexion est situé en Annexe A.

I.3.3.1 Echelle locale

A partir des points de mesure d'un bassin individuel, l'estimation de la durée de vie résiduelle se fait généralement par calcul inverse des modules des couches de chaussées. Des indicateurs basés sur différents paramètres du bassin de déflexion permettent également de caractériser l'état des couches de chaussées.

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.3.3.1.1 Déflexion caractéristique

La mesure de déflexion se fait généralement dans la bande de roulement de la voie lente (soumise au trafic poids lourds). Les variations de modules des matériaux du corps de chaussée n'affectent que peu le paramètre «déflexion ». Cependant, ce paramètre est sensible aux changements d'épaisseurs et très sensible aux modifications de portance (SETRA, 2009). La réalisation des mesures de déflexion lors de fortes chaleurs ou de périodes de faible pluviométrie n'est pas recommandée.

La déflexion caractéristique constitue un indicateur du comportement mécanique de l'ensemble structure/support de la chaussée. La déflexion caractéristique d_{car} est définie par :

$$d_{car} = d_m + 2 * \sigma_m \quad (I-7)$$

Avec

d_{car} : La déflexion caractéristique à 97 % des déflexions maximales ;

d_m : La moyenne des déflexions maximales ;

σ_m : L'écart-type des déflexions maximales.

Le Tableau I-9 définit des classes de déflexions caractéristique pour différentes structures, différents niveaux de trafic et différentes épaisseurs de matériaux. Ainsi, à partir de ce paramètre et des caractéristiques de la chaussée, un niveau global de comportement de la chaussée peut être défini.

Tableau I-9 : Classes de déflexion caractéristique (SETRA, 2009).

| Classes | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | D8 | D9 |
|--|-----------|------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|-------|
| Seuils de déflexion caractéristique en 1/100ème mm | de 0 à 19 | de 20 à 29 | de 30 à 44 | de 45 à 74 | de 75 à 99 | de 100 à 149 | de 150 à 199 | de 200 à 299 | ≥ 300 |
| Niveau global de comportement | | | | | | | | | |
| Chaussées souples | | | | | | | | | |
| T0-T1 | Bon | | | Moyen | Mauvais | | | | |
| T2-T3 | Bon | | | | Moyen | Mauvais | | | |
| T4-T5 | Bon | | | | | | Moyen | Mauvais | |
| Bitumineuses épaisses | | | | | | | | | |
| T0-T1 | Bon | | Moyen | Mauvais | | | | | |
| T2-T3 | Bon | | | Moyen | Mauvais | | | | |
| T4-T5 | Bon | | | | Moyen | Mauvais | | | |
| Assises traitées au liant hydraulique | | | | | | | | | |
| Epaisseur de MLTH > 0,35 m | Bon | Moyen | Mauvais | | | | | | |
| Epaisseur de MLTH ≤ 0,25 m | Bon | | Moyen | Mauvais | | | | | |
| Chaussées mixtes | | | | | | | | | |
| Niveau global | Bon | Moyen | Mauvais | | | | | | |

I.3.3.1.2 Rayon de courbure

Au point de la déflexion maximale, la déformée de la chaussée est caractérisée par le rayon de courbure R (Figure I-32). Il représente la valeur absolue du rayon du cercle tangent au bassin en ce point de déflexion maximale. Cet indicateur donne une indication des performances mécaniques des couches de chaussées.

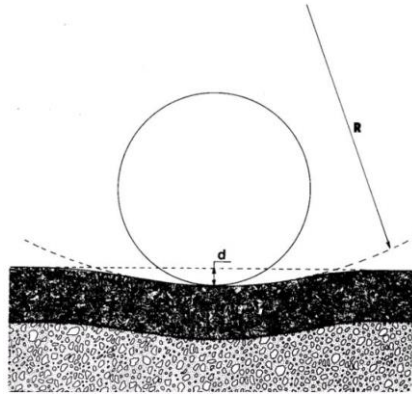


Figure I-32: Déflexion et rayon de courbure de la déformée sous une charge roulante (SETRA, 2009).

L'acquisition du rayon de courbure est réalisée de façon ponctuelle à l'aide d'un inclinomètre (Brengrath & Roche, 1978) ou de manière continue en exploitant les mesures des bassins des déflectographes ou du curviamètre.

Le rayon de courbure est particulièrement sensible aux variations :

- de qualité des couches traitées ;
- d'épaisseurs des assises traitées ;
- des conditions d'interface entre les couches ;
- de températures des couches bitumineuses.

Sur chaussées bitumineuses épaisses et mixtes, le rayon de courbure est sensible à l'évolution par fatigue du module des couches bitumineuses. Pour les structures à assise traitée aux liants hydrauliques, ce paramètre permet d'identifier les défauts de qualité des matériaux traités ou des défauts d'interface (Autret, 1969).

Le comportement d'une zone est caractérisé par :

- La valeur médiane du rayon;
- Le pourcentage de valeurs de rayons inférieurs aux seuils définis par type de structure ;
- Le seuil caractéristique à 20 % des rayons, correspondant au 2^{ème} décile.

Chapitre I : Recherche bibliographique

Le Tableau I-10 définit différentes classes de rayon de courbure. Pour chaque structure et pour un niveau de mesure de rayon, le Tableau I-10 permet de déterminer si le niveau global de comportement de la structure est bon, moyen ou mauvais.

Tableau I-10 : Classes de rayons de courbure.

| Classes | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 |
|--|---------|-----------|-----------|------------|-------------|-------|
| Seuils des rayons caractéristiques à 20 % (en m) | <200 | 200 à 399 | 400 à 799 | 800 à 1999 | 1201 à 1599 | ≥1600 |
| Niveau global de comportement | | | | | | |
| Bitumineuses épaisses | Mauvais | Moyen | | Bon | | |
| Assises traitées au liant hydraulique | Mauvais | | | Moyen | | Bon |
| Chaussées mixtes | Mauvais | | | Moyen | | Bon |

A partir de la déflexion maximale et du rayon de courbure, de nombreux indicateurs ont été élaborés. La plupart d'entre eux ont été conçus pour le FWD.

I.3.3.1.3 Indicateurs BLI/MLI/LLI

En 1987, Horak et Emery (Horak & Emery, 2009), proposent une décomposition en trois zones distinctes du bassin de déflexion mesuré sous une roue chargée (Figure I-33) :

- Le bassin de déflexion présente une courbure positive dans la zone 1 située aux abords du point de chargement, généralement localisée à moins de 300 mm du point de chargement.
- La zone 2 est généralement définie comme la zone d'inflexion. Sa position dépend du type de couche de surface mais est généralement située de 300 à 600 mm du point de chargement. Cette zone correspond au passage d'une courbure positive du bassin de déflexion à une courbure inverse.
- La zone 3 correspond à la zone la plus éloignée du point d'application de la charge. Elle commence à la fin de la zone 2 et se termine à l'emplacement où la déflexion devient nulle. Son étendue est d'environ 600 mm à 2000 mm. Cependant, elle a une forte dépendance à la profondeur réelle de la structure de chaussée et à la réponse structurelle des couches plus profondes.

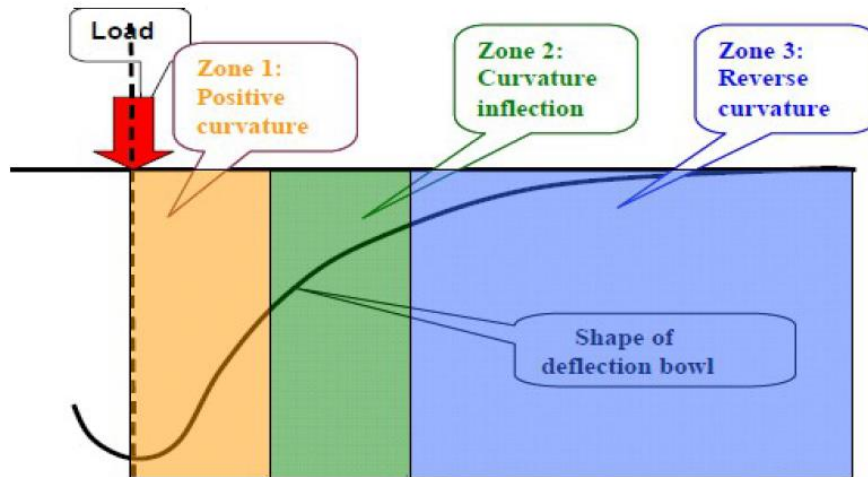


Figure I-33 : Découpage du bassin de déflexion (Horak & Emery, 2009).

En complément de la déflexion maximale et du rayon de courbure, ce découpage a permis de dégager différents indicateurs reposant sur la position des géophones en utilisant les valeurs déterminées par les mesures de bassin au FWD (Horak, 2008), (Horak & Emery, 2009):

- Le Base Layer Index (BLI) caractérisant la zone 1 et exprimé par $D_0 - D_{300}$. Il donne des indications sur la couche de surface ;
- Le Middle Layer Index (MLI) caractérisant la zone 2 et exprimé par $D_{300} - D_{600}$. Il donne des indications sur la couche de base ;
- Le Lower Layer Index (LLI) caractérisant la zone 3 et exprimé par $D_{600} - D_{900}$. Il donne des indications sur la couche de fondation ;

D'après Horak et al., une bonne corrélation existe entre les indicateurs BLI, MLI et LLI et l'état structurel des couches, dans le cas de chaussées souples.

1.3.3.1.4 Surface Modulus (ou module de surface)

Lorsqu'une charge est appliquée sur une chaussée, celle-ci est normalement répartie des couches supérieures vers la plate-forme. La Figure I-34 montre ce phénomène qui se caractérise par un transfert de charge suivant un cône d'environ 45 degrés.

Ullidtz (Ullidtz, 1987) propose de quantifier la résistance de la plate-forme par le module de surface. Ce Surface Modulus (SM) est défini comme étant le module équivalent de la structure, à une distance donnée du centre de la charge. Ullidtz propose deux formules pour ce module de surface, respectivement pour le calcul avec le géophone central ($SM_{(0)}$) et pour les autres géophones ($SM_{(r)}$):

$$SM_{(0)} = 2 * \sigma_0 * (1 - \nu^2) * \left(\frac{a}{d_0}\right) \quad (I-8)$$

$$SM_{(r)} = \sigma_0 * (1 - \nu^2) * \left(\frac{a}{r * d_r}\right) \quad (I-9)$$

Avec r la distance du centre de la charge (en mm),

Chapitre I : Recherche bibliographique

$d(r)$ la déflexion mesurée à la distance r ,
 ν le coefficient de Poisson du matériau,
 a le rayon de la plaque de chargement (en mm),
 σ_0 la pression de contact (en MPa).

La Figure I-34 représente le module de surface en fonction de la distance de la charge r . Dans la zone d'influence, $SM_{(r)}$ est représentatif de la structure en compression, à la profondeur $r=z$. Lorsque la distance r est assez grande, $r=z$ atteint un point où seule la plate-forme se situe dans la zone d'influence. Les modules de surface ainsi calculés ne dépendent que des matériaux de la couche de fondation et de la plate-forme.

Le calcul d'un module de surface différentiel (SMD) représente également un indicateur de la pente de $SM(r)$ sur les zones 2 et 3 décrites précédemment. En fonction des valeurs obtenues, le comportement de la plate-forme peut être classé :

$$SMD = SM_{(600)} - SM_{(1200)} \quad (I-10)$$

- $SMD > 20$ MPa : la plate-forme présente une diminution de la résistance en fonction de la contrainte.
- -20 MPa $< SMD < 20$ MPa : la plate-forme présente un comportement élastique linéaire.
- $SMD < -20$ MPa : la plate-forme présente une augmentation de la résistance en fonction de la contrainte.

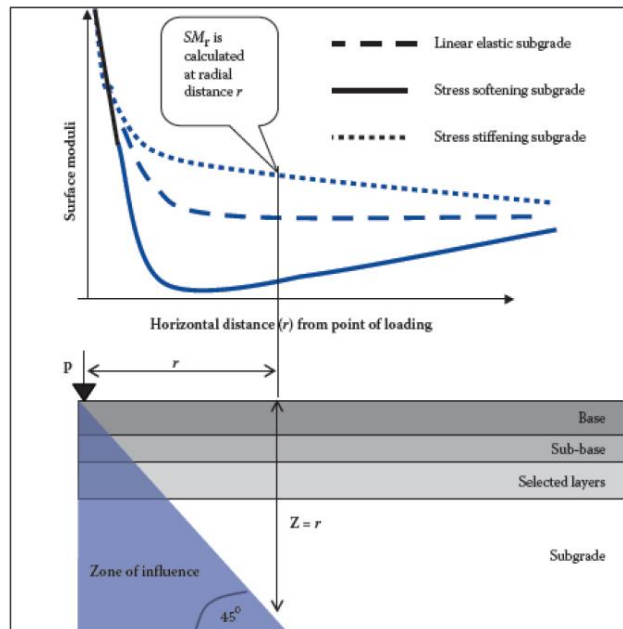


Figure I-34 : Allure de la variation du module de surface en fonction de la distance à la charge (Ullidtz, 1987).

I.3.3.1.5 Produit Rd

En 1969, Autret (Autret, 1969) constate que l'indicateur de la déflexion maximale ne suffit pas à expliquer le comportement de la chaussée et élabore un indicateur Rd qui résulte

Chapitre I : Recherche bibliographique

de la multiplication du rayon de courbure R et de la déflexion maximale d . Cet indicateur est utilisé pour déterminer le module du sol.

L'évaluation de l'indicateur Rd a été réalisée sur deux types de chaussées et a montré que :

- Sur chaussées souples :
 - La période de mesure et la valeur de la déflexion (pour des valeurs considérées comme raisonnables) n'influencent pas l'indicateur Rd ;
 - $Rd \leq 4000 \text{ m} * \text{mm}/100$ correspond à une faible épaisseur de chaussée ou un mauvais état du sol support ou du corps de chaussée ;
 - $Rd = 5500 \text{ m} * \text{mm}/100$ correspond à une valeur moyenne de l'indicateur ;
 - $Rd > 10500 \text{ m} * \text{mm}/100$ correspond à une forte épaisseur de chaussée ou bon état du sol support ou du corps de chaussée.
- Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques
 - $Rd > 15000 \text{ m} * \text{mm}/100$ et $d_c \leq 40 \text{ mm}/100$ correspond à une chaussée en bon état ;
 - $Rd < 15000 \text{ m} * \text{mm}/100$ et $d_c \geq 50$ à $60 \text{ mm}/100$ correspond à une chaussée en mauvais état.

I.3.3.1.6 Indice Bruit Route (IBR)

L'Indicateur Bruit Route (IBR) est un indicateur développé par le Centre de Recherche Routière Belge (BRRC) pour le curviamètre (Van Buylaere, 2016). Il exprime l'ampleur des vibrations mécaniques mesurées à la surface du revêtement lors du passage du curviamètre et est calculé ainsi :

$$IBR = \frac{1}{41} \int_{j=55}^{95} ABS(\bar{s}_j) \quad (\text{I-11})$$

Avec

s_j : le signal du géophone ;

$\bar{s}_j = s_j - S$;

S : La moyenne des 41 points de mesure de déflexion ;

$ABS(x)$: La valeur absolue de x .

Il permet d'évaluer la gravité des dégradations. Plus l'indice est élevé, plus il y a de risque de décollement de couche et de fissuration. L'identification d'un glissement des couches en surface se fait plus aisément que pour celles situées en profondeur. Si l'IBR est inférieur à 2.5, la chaussée ne présente pas de décollement. Cet indicateur peut aussi prévenir de l'état des dalles de béton et renseigne sur la présence de fissures.

I.3.3.1.7 Calcul inverse

Des campagnes d'auscultation sont régulièrement engagées pour estimer la capacité portante et la durée de vie résiduelle des chaussées. Les bassins de déflexions obtenus par la

mesure d'appareils d'auscultation (FWD, Curviamètre, Défectographes,...) permettent, en utilisant la procédure de calcul inverse, de déterminer les modules correspondant à chaque couche de la structure étudiée. Ce procédé fournit des informations mécaniques et permet d'évaluer ensuite par calcul la durée de vie résiduelle des chaussées.

Il existe actuellement deux méthodes de calcul inverse: la méthode statique et la méthode dynamique.

1.3.3.1.7.1 *La méthode de calcul inverse statique*

Cette méthode usuelle de calcul inverse repose sur le modèle de Burmister (Burmister, 1943) où le modèle de l'épaisseur équivalente (Ullidtz, 1987). Elle utilise la modélisation d'un chargement statique. Il existe principalement trois grandes méthodes de résolutions du calcul inverse statique (Chatti, et al., 2017).

- La méthode basée sur une technique d'itération. Cette technique utilise des calculs directs de la déflexion dans un processus itératif. Le principe consiste à faire varier les modules des couches de manière à ajuster au mieux le bassin de déflexion calculé à celui mesuré. La plupart des méthodes itératives repose sur l'utilisation d'un algorithme visant à minimiser le carré des écarts entre le bassin calculé et le bassin mesuré.
- La méthode basée sur l'utilisation d'une base de données de bassins de déflexion. Une base de données de bassins de déflexions est créée à l'aide d'un modèle de calcul. Cette base sert ensuite à trouver le bassin le plus proche du bassin de déflexion mesuré.
- La méthode basée sur l'utilisation d'équations de régression adaptées à une base de données de bassins de déflexion générée par un modèle de calcul.

Ces trois méthodes peuvent être utilisées indifféremment pour le calcul inverse statique. La méthode itérative apparaît tout de même la plus facile à mettre en place pour le calcul inverse statique. Généralement, le modèle de calcul de structures de chaussées utilisé dans ces méthodes est un modèle élastique linéaire.

1.3.3.1.7.2 *Programmes informatiques de calcul inverse statique*

Il existe de nombreux logiciels pour réaliser automatiquement le calcul inverse en statique (ALIZE (Balay, 2013), BISDEF (Bush III & Alexander, 1985), ELMOD (Ullidtz, 1987), ELSDEF (Lytton, et al., 1986), MICHBACK (Harichandran, et al., 1993), ...). L'objectif principal de ces programmes vise à obtenir une solution précise et relativement rapide. Cependant, il est impossible d'affirmer l'unicité de la solution obtenue et ce par n'importe quelle méthode de recherche. Ainsi, certains programmes ont recours à l'utilisation de divers contrôles pour guider la recherche vers un ensemble "acceptable" de modules de couches. Cette contrainte impose d'émettre des hypothèses sur le type de chaussée analysée et limite la plage acceptable de modules pour chaque type de couche.

Pour les mesures du FWD, le calcul inverse utilise les déflexions maximales mesurées par les géophones tandis que pour les appareils d'auscultation roulants, seuls certains points de mesure sont pris en compte. Les valeurs de déflexions sont supposées être mesurées à un même instant t .

La méthode de calcul inverse statique utilise un modèle simple (généralement élastique linéaire) qui permet une résolution rapide. Cependant la modélisation statique représente une approximation. De plus, seule une partie des informations est exploitée puisque tous les points de mesure de déflexion ne sont pas utilisés pour le calcul inverse.

1.3.3.1.7.3 *La méthode de calcul inverse dynamique*

Cette méthode se base sur la simulation de la réponse de la chaussée sous chargement dynamique. La phase de calcul inverse prend en compte l'ensemble des historiques de déflexion. Les méthodes de calcul inverse dynamique considèrent un modèle multicouche élastique avec amortissement, ou un modèle aux éléments finis. Les méthodes de calcul inverse dynamiques sont basées sur les domaines fréquentiel ou temporel. Le calcul inverse des modules de couches est effectué en faisant correspondre le bassin de déflexion calculé à l'état statique avec la composante fréquentielle des déflexions mesurées du capteur à une ou plusieurs fréquences. Pour le domaine temporel, la transformation de la charge appliquée et des historiques de déflexion mesurés dans le domaine fréquentiel est opérée en utilisant la Transformée de Fourier rapide (FFT). Dans le calcul inverse dans le domaine temporel, les historiques de déflexion sont directement comparés aux résultats prédits par l'analyse directe. En 1994, Uzan (Uzan, 1994) fait une comparaison entre les deux méthodes et conclut que le calcul inverse dans le domaine temporel est plus judicieux que celui dans le domaine fréquentiel. En 2004, Chatti (Chatti, et al., 2004) montre que si la FFT est peu précise, cela conduit à des erreurs significatives. La justesse de cette méthode dans le domaine fréquentiel dépend de la qualité des signaux mesurés.

1.3.3.1.7.4 *Programmes informatiques de calcul inverse dynamique*

Des programmes informatiques de calcul inverse dynamique ont été développés pour la détermination des modules des couches. Ils requièrent l'utilisation d'un calcul direct et d'un schéma de calcul inverse. Tous ces programmes nécessitent les historiques temporels des capteurs de charge et de déflexion. Cependant, ces méthodes présentent certaines limites. Dans le domaine fréquentiel, les enregistrements du FWD mesurés ne doivent pas être tronqués sous peine de conduire à des solutions faussées. Pour le domaine temporel, des problèmes peuvent surgir entre la numérisation de la réponse et la synchronisation temporelle entre les enregistrements de capteurs de charge et des géophones. Dans le domaine fréquentiel, les programmes informatiques couramment utilisés sont BKGREEN (Kang, 1998), PAVE-SID (Magnuson & Lytton, 1991), dans le domaine temporel, FEDPAN (Ong, et al., 1990), EVERCALCII (Turkiyyah, 2004), PREDIWARE (Broutin, 2010) et dans les deux domaines DYNABACK (Chatti, 2004) (Chatti, et al., 2004) (Chatti, et al., 2006).

1.3.3.1.7.5 *Comparaison de l'approche statique et dynamique pour le FWD*

De nombreuses comparaisons entre les méthodes de calcul inverse par approche statique et dynamique pour les mesures du FWD ont été conduites par (Tarn & Brown, 1989), (Ong, et al., 1990), (Lytton, et al., 1993), (Kang, 1998) et (Chatti, et al., 2004), (Grenier, 2007) et (Broutin, 2010). Elles ont conclu à l'obtention de modules de chaussées rétrocalculés plus réalistes avec l'analyse dynamique qu'avec l'analyse statique. D'après ces auteurs, la comparaison entre l'analyse statique et dynamique montre que les modules de couche de surface sont généralement semblables, ceux de la fondation sont du même ordre alors que ceux du sol sont souvent différents. Ces différences peuvent être causées par l'hypothèse d'un substratum semi-infini qui affecte significativement l'analyse statique. La principale différence repose tout de même sur la prise en compte d'un chargement statique ou dynamique. Ils privilégient la méthode dynamique en raison de plus grand nombre d'informations utilisées dans ce processus.

1.3.3.1.7.6 *Calcul inverse avec défauts*

En 2015, Xie et al. s'intéressent à l'effet de défauts de chaussées sur les résultats de calcul inverse (Xie, et al., 2015). L'étude se penche sur un cas de chaussée composée de trois couches (bitumineuse, grave ciment, sol). Par simulation numérique, la mesure du FWD a été modélisée pour différentes configurations. La première concerne deux sections de chaussées comportant respectivement une fissure dans la couche bitumineuse et une fissure dans la couche bitumineuse et la grave ciment. Des mesures ont été simulées entre 0.25 m et 1.95 m du défaut. Le résultat du calcul inverse sur chaussée saine est très satisfaisant avec de très faibles écarts avec les modules de référence. Cependant, les écarts entre les modules rétrocalculés sur chaussées saine et avec défauts sont très significatifs. En effet, pour la couche de roulement, ils varient entre -54 % et 289 % et pour la couche de base entre -64 % et -4 % pour l'ensemble des distances et pour les deux défauts. Seul le sol semble être correctement défini.

Dans un second temps, une étude est menée sur l'effet d'une couche de grave ciment désagrégée sur les résultats du calcul inverse. Tout comme pour les fissures, les modules rétro-calculés sont incohérents pour les deux premières couches. La présence de ce type de dégradation dans la chaussée conduit à obtenir des modules rétro-calculés peu réalistes.

En 2016, (Sadoun, et al., 2016) montre que le calcul inverse sur chaussée avec interface glissante à partir de la mesure du HWD conduit à obtenir des résultats satisfaisants.

1.3.3.1.7.7 *Comparaison du calcul inverse à partir des mesures du curviamètre et du FWD*

Le Centre de Recherches Routières Belge a mené des travaux sur le calcul inverse des modules de chaussées à partir des mesures du curviamètre et du FWD. En 2015, C. Van Geem et S. Perez (Van Geem & Perez, 2015) font une comparaison des calculs inverses obtenus pour ces deux appareils. L'étude précise qu'il est impératif de connaître précisément les épaisseurs des couches de chaussées sous peine de déterminer des modules incohérents. De

Chapitre I : Recherche bibliographique

plus, la stabilité des valeurs s'accroît avec la précision avec laquelle les épaisseurs sont connues. Les résultats déduits avec le logiciel DimMet© (Centre de Recherche Routière, 2018) montrent que les modules obtenus par calcul inverse avec les mesures du curviamètre peu satisfaisants, contrairement à ceux déterminés avec les mesures du FWD, qui sont cohérents.

En 2017, Van Geem (Van Geem, 2017) réalise de nouveaux travaux sur la comparaison de calculs inverses de modules à partir des mesures du curviamètre et du FWD. Dans cette étude, la chaussée comporte une interface entre les deux premières couches qui peut être collée ou glissante. Les modules des couches profondes sont mal déterminés pour le curviamètre. Des conclusions similaires sont émises pour d'autres sections. Tout comme pour la première étude, de meilleurs résultats de calcul inverse sont obtenus pour les mesures du FWD. L'utilisation d'un nombre plus élevé de points de déflexion dans la mesure du curviamètre améliore les résultats. Le Tableau I-11 présente les modules rétro-calculés pour les mesures du curviamètre et du FWD.

Tableau I-11 : Modules déterminés par calcul inverse pour le curviamètre et le FWD. (Van Geem, 2017).

| Matériaux | FWD | Curviamètre | |
|------------------|---------------|---------------|---------------|
| | Station 14340 | Station 14340 | Station 14340 |
| Béton bitumineux | 9901 | 8285 | 4604 |
| GNT | 248 | 859 | 734 |
| GNT | 235 | 116 | 127 |
| Sol | 242 | 89 | 91 |
| Substratum | 271 | 1611 | 41209 |

Il préconise la prise en compte de la viscoélasticité dans les prochains travaux.

1.3.3.2 Echelle itinéraire

Des indicateurs tels que le système Red Amber Green ou le Structural Strength Index ont été développés à l'échelle d'un itinéraire et proviennent d'une conjugaison d'indicateurs calculés pour une mesure individuelle. Ils donnent des informations globales sur la chaussée plutôt que sur l'état d'une couche. Par ailleurs, le découpage en zones homogènes permet l'identification de sections dégradées en vue de réaliser des travaux de réfection.

1.3.3.2.1 Système RAG

Le Committee of State Road Authorities (CSRA) a établi un classement à trois états structurels appelés RAG (Red, Amber, Green). Ce système se base sur le classement des indicateurs de la déflexion maximale D_0 , du rayon de courbure R_0C , BLI, MLI et LLI qui, selon les valeurs obtenues, peuvent prendre trois niveaux : sain, préoccupant ou sévère, pour différents types de structures (Tableau I-12). Le système RAG est basé sur des mesures au FWD, avec une charge de 40 kN.

Chapitre I : Recherche bibliographique

Tableau I-12 : Etat structurel d'une chaussée selon le système RAG (Horak & Emery, 2009).

| Type d'assise | Etat structurel | D ₀ (μm) | RoC (m) | BLI=D ₀ -D ₃₀₀ (μm) | MLI=D ₃₀₀ -D ₆₀₀ (μm) | LLI=D ₉₀₀ -D ₆₀₀ (μm) |
|-------------------------------------|-----------------|---------------------|---------|---|---|---|
| Assise granulaire | Sain | < 500 | > 100 | < 200 | < 100 | < 50 |
| | Préoccupant | 500-750 | 50-100 | 200-400 | 100-200 | 50-100 |
| | Sévère | > 750 | < 50 | > 400 | > 200 | > 100 |
| Assise traitée au liant hydraulique | Sain | < 200 | > 150 | < 100 | < 50 | < 40 |
| | Préoccupant | 200-400 | 80-150 | 100-300 | 50-100 | 40-80 |
| | Sévère | > 400 | < 80 | > 300 | > 100 | > 80 |
| Assise bitumineuse | Sain | < 400 | > 250 | < 200 | < 100 | < 50 |
| | Préoccupant | 400-600 | 100-250 | 200-400 | 100-150 | 50-80 |
| | Sévère | > 600 | < 100 | > 400 | > 150 | > 80 |

Les valeurs de déflexion du Tableau I-12 sont cohérentes avec celles proposées dans le guide technique « Renforcements de chaussées, Diagnostic et conception » (SETRA, 2009). Cependant, les valeurs comparées ne sont pas mesurées à l'aide du même appareil. En effet, pour le Tableau I-12, les données sont déterminées à l'aide du FWD à 40 kN alors que pour le guide technique « les renforcements de chaussées Diagnostic et conception », les déflexions sont mesurées au déflectographe Lacroix. Ceci induit une différence entre le rayon de Courbure (R) mesuré à l'aide des déflectographes Lacroix et celui mesuré avec le FWD.

I.3.3.2.2 Structural Strength Index (SSI)

Le Structural Strength Index (SSI) est un indicateur de la résistance de la structure développé par le Texas Transportation Institute (TTI). Il se base sur deux paramètres du bassin de déflexion BLI et W₇ (déflexion au 7^{ème} géophone d'un FWD) ainsi que sur deux tableaux, un pour les chaussées bitumineuses minces et l'autre pour les chaussées bitumineuses épaisses (Scullion, 1998). SSI varie de zéro à 100 et permet de caractériser des sols de fondation et la structure de chaussées indépendamment en termes de rigidité relative. Ce système est basé sur une évaluation statistique des déflexions.

$$SSI = f(\delta_i) \quad (I-12)$$

Avec

$$\delta_i = g * x_i \quad (I-13)$$

La déflexion δ_i dépend du type de couches de la structure, des propriétés des matériaux, du trafic cumulé ainsi que des conditions météorologiques.

g représente la déflexion mesurée ou déterminée par évaluation statistique ;

x_i représente différentes variables affectées par la déflexion δ_i . L'indicateur SSI s'inscrit dans un contexte de maintenance des chaussées et peut être utile dans la projection et les décisions budgétaires, dans la programmation des fonds, pour évaluer l'état global du réseau et dans l'inventaire de réseau.

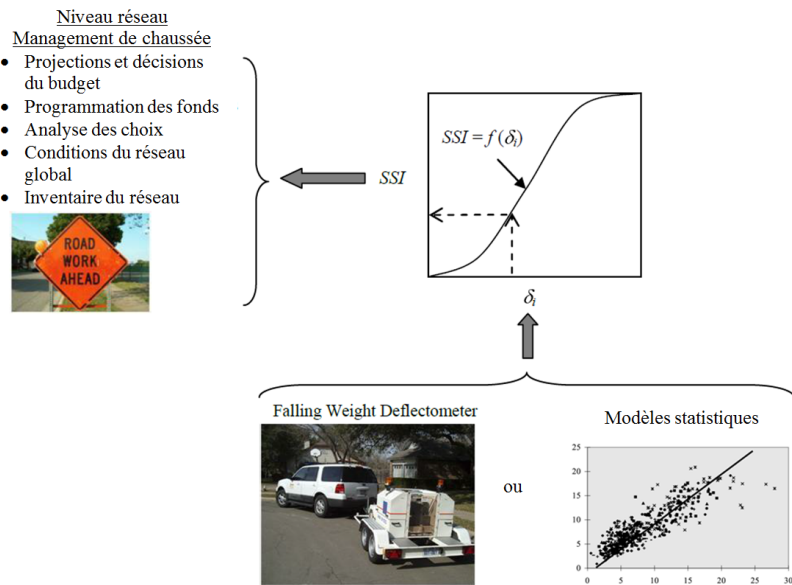


Figure I-35: Algorithme de détermination de l'indicateur SSI ; (Flora, et al., 2010)

I.3.3.2.3 Global indicator

Le Global Indicator mis en place par le CRR Belge (Van Geem, et al., 2014) (Van Geem, 2017) est composé de cinq Key Performance Indicators (KPI). Ils servent à exprimer les objectifs visés d'un système de gestion des routes. Les trois premiers font référence à la structure de chaussée (KPI1, KPI2 et KPI3) et sont directement calculés à partir des mesures des appareils, sans connaissance particulière des caractéristiques de la chaussée. Leur valeur se situe entre 0 (bon) et 5 (mauvais). Ils sont ensuite associés à deux autres indicateurs représentatifs du trafic (tous véhicules et poids lourds), le Global Indicator peut être déduit et exprime la durée de vie résiduelle de la chaussée. Il peut être utilisé aussi bien pour les mesures du FWD que pour les mesures du curviamètre. (Van Geem, 2017).

➔ KPI1: Capacité portante

KPI1 est calculé à l'aide d'une approche itérative avec un modèle théorique du bassin de déflexion $f(x)$. Cet indicateur est fonction de l'indicateur « Tragfähigkeitszahl » $T_Z = \sqrt{\frac{R}{a}}$ avec d la déflexion maximale mesurée et R le rayon de courbure (Jendia, 1995) et du produit Rd (Autret, 1969). Une faible valeur de T_Z est synonyme d'une mauvaise capacité portante.

➔ KPI2 : Collage des couches

Pour le FWD, KPI2 dépend du rayon de courbure R et des déflexions sous la charge et à 300 mm de la charge ($D(0)$ et $D(300)$). Pour le curviamètre, il est fonction du rayon de courbure R et de l'Indice Bruit Route (IBR).

➔ KPI3 : Cohésion

Chapitre I : Recherche bibliographique

Les réponses de chaque géophone et du capteur de force du FWD sont stockées sur une période de 60 ms, ce qui donne la courbe d'hystérésis pour chaque géophone. La surface $E(x)$ inscrite dans la courbe d'hystérésis représente l'énergie dissipée. L'indicateur KPI3 dépend de cette énergie.

→ KPI4 : Trafic tous véhicules

KPI4 est égal à $\frac{n_{vj}}{N_{max}}$ avec n_{vj} le nombre de véhicules sur la section par jour et N_{max} le nombre maximum de véhicules par jour sur cette même section.

→ KPI5 : Trafic pondéré

Le calcul de cet indicateur se fait en prenant en compte toutes les catégories de véhicules et en les pondérant avec un facteur plus important pour les poids lourds.

Ainsi, le Global Indicator peut être alors calculé à l'aide des cinq indicateurs précédemment déduits. La durée de vie résiduelle de la chaussée est alors établie.

1.3.3.2.4 Découpage en zones homogènes

Les appareils d'auscultation à grand rendement tels que le déflectographe et le curviamètre mesurent en quasi continu, puisqu'une mesure de bassin est relevée tous les 4 ou 5 m. Ainsi, un très grand nombre de bassins est mesuré à l'échelle d'un itinéraire de plusieurs kilomètres. Le découpage d'un itinéraire peut se faire suivant plusieurs paramètres (d_{max} , R_c , RAG, \dots). Il existe différentes méthodes d'analyse utilisées pour découper l'itinéraire en zones homogènes.

1.3.3.2.4.1 Méthode LCPC (Du Mesnil-Adelée & Peybernard, 1984)

Cette méthode est basée sur le carré moyen des différences successives. Elle est utilisée par de nombreux logiciels de découpage en zones homogènes et notamment celui livré avec le curviamètre Belge.

1.3.3.2.4.1.1 Première étape : Test d'homogénéité

Le test d'homogénéité est appliqué à l'ensemble de l'enregistrement. S'il montre que la suite des mesures répond au critère d'homogénéité, on passe à l'enregistrement suivant, sinon, on réalise la deuxième étape.

Le test d'homogénéité revient à considérer :

Soient n valeurs d'un paramètre x_j ;

Avec

$1 \leq j \leq n$ et \bar{x} la valeur moyenne des n observations.

$$r = \frac{1 \sum_{j=1}^{n-1} (x_{j+1} - x_j)^2}{2 \sum_{j=1}^{n-1} (x_{j+1} - \bar{x})^2} \quad (\text{I-14})$$

En fonction du nombre n de valeurs du paramètre x_j , et de la valeur de r , il est possible de dire si la zone est homogène, contient des variations lentes ou des groupements anormaux.

1.3.3.2.4.1.2 Deuxième étape : Découpage

Lorsque le test indique que l'enregistrement contient des variations lentes ou des groupements anormaux, la méthode de découpage est utilisée.

Pour un enregistrement contenant n mesures, les fonctions $g(i)$ sont calculées pour les $n-1$ valeurs :

$$g(i) = \frac{n}{i(n-1)} \left(\sum_{j=1}^i y_j \right)^2 \quad (\text{I-15})$$

Avec

$$1 \leq i \leq n - 1$$

$$y_j = x_j - \bar{x} \quad (\text{I-16})$$

x_j : valeur mesurée

\bar{x} : valeur moyenne des mesures

L'enregistrement est découpé en deux zones telle que la limite entre les deux zones correspond au point i tel que $g(i)$ est maximal.

1^{ère} zone : i points compris entre les abscisses 1 à i .

2^{ème} zone : $n-i$ points compris entre les abscisses $i+1$ à n .

1.3.3.2.4.1.3 Troisième étape : Application du test d'homogénéité aux deux zones.

Le test d'homogénéité est appliqué aux deux zones déterminées précédemment. Si elles répondent au critère d'homogénéité, le traitement est arrêté, sinon elles sont redécoupées et on retourne à l'étape 2 avec :

$$-1^{\text{ère}} \text{ zone : } z_j = y_j - \bar{y}_1, 1 \leq j \leq i$$

\bar{y}_1 valeur moyenne des y_j dans la zone 1

$$-2^{\text{ème}} \text{ zone : } z_j = y_j - \bar{y}_2, 1 \leq j \leq n-i$$

\bar{y}_2 valeur moyenne des y_j dans la zone 2

Cette méthode présente des avantages:

- Possibilité d'automatiser la méthode ;

Chapitre I : Recherche bibliographique

- Possibilité de modifier le critère d'homogénéité choisi ;
- Possibilité de différencier les zones homogènes des zones de fluctuations rapides suivant les valeurs de r.

1.3.3.2.4.2 Méthode COST 336 pour le FWD (COST 336, 1999)

Le groupe COST 336 préconise également une méthode de découpage, seulement pour les mesures FWD, consistant à effectuer le cumul de la somme des déflexions minorée par la moyenne des déflexions de la section.

$$S_1 = X_1 - X_m \quad (\text{I-17})$$

$$S_2 = X_2 - X_m + S_1 \quad (\text{I-18})$$

$$S_i = X_i - X_m + S_{i-1} \quad (\text{I-19})$$

Avec

X_i la déflexion mesurée au point i

X_m la moyenne de déflexion sur une section

S_i la somme cumulée des déflexions à partir de la moyenne des déflexions au point i

Les S_i sont ensuite tracées selon l'itinéraire et chaque changement de pente indique la présence d'une nouvelle zone homogène.

1.3.3.2.4.3 Méthode CRR pour le curviamètre (Van Geem, 2009)

Pour les mesures de curviamètre, le CRR utilise une méthode de découpage basée sur des classes de déflexions. La déflexion caractéristique glissante est calculée comme :

$$d_{g,n} = d_{m,n} + m * \sigma_n \quad (\text{I-20})$$

$$\sigma_n = \left(\frac{\left(\sum_{i=0}^p (d_{m,n} - d_{max,n-i})^2 \right)}{(p-1)} \right)^{1/2} \quad (\text{I-21})$$

Avec :

$d_{g,n}$: la déflexion caractéristique ;

$d_{m,n}$: la moyenne des p déflexions maximales ($d_{max,n-p}, \dots, d_{max,n}$) mesurées consécutivement ;

m : facteur multiplicateur ;

σ_n : écart-type (sur les p déflexions maximales par rapport à la moyenne) ;

$n=p, p+1, \dots$

Par défaut, $p = 5$ et $m = 2$.

Par la suite, la déflexion caractéristique glissante est tracée en fonction de la distance parcourue puis la zone est découpée en longueur inégale mais supérieure à un minimum $L_{min}=200$ m. Chacune est caractérisée par une classe de déflexion donnée dans le Tableau I-13. Cette méthode est normalement applicable aux chaussées souples.

Tableau I-13: Classes de déflexion.

| Classe d_g (mm/100) | D1 $20 < d_g \leq 40$ | D2 $40 < d_g \leq 60$ | D3 $60 < d_g \leq 80$ | D4 $80 < d_g \leq 100$ | D5 $100 < d_g \leq 125$ |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|

1.3.3.2.4.4 Comparaison des méthodes de découpage en zone homogène sur la déflexion caractéristique

La Figure I-36 montre le découpage en zone homogène par la déflexion maximale pour des mesures réalisées avec le curviamètre le long d'un itinéraire. Ces mesures de déflexion ont été réalisées sur un tronçon de 16 km en Belgique. Les méthodes ont été évaluées et se superposent de façon assez satisfaisante. Par ailleurs, 23 zones homogènes sont déterminées avec les méthodes Belge et du COST 336 contre 29 avec la méthode du LCPC. Cette dernière regroupe plusieurs avantages notamment le caractère itératif de cette méthode qui permet de mettre en place des codes de calcul pour déterminer les zones homogènes. De plus, elle permet de modifier le critère d'homogénéité choisi et de différencier les zones homogènes et les zones de fluctuations rapides suivant la valeur de r . Dans le travail de thèse, la méthode du LCPC sera donc privilégiée.

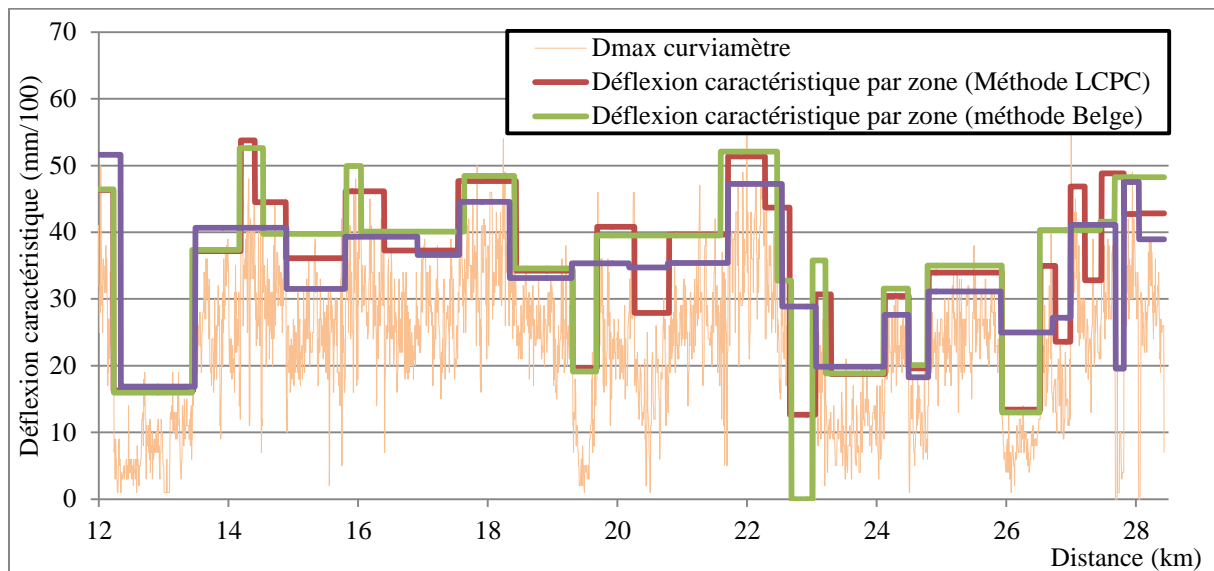


Figure I-36 : Superposition des méthodes de découpage CRR, LCPC et COST 336.

1.3.4 Conclusion de la deuxième partie

Depuis les années 1950 et l'apparition de la poutre BENKELMAN, de nombreux appareils de mesure de déflexion ont vu le jour. Aujourd'hui, la majorité est capable de relever le bassin de déflexion défini en plusieurs points. Le FWD réalise des mesures à point fixe. Pour tout type de chaussée, il apparaît très juste et répétable vis-à-vis d'un capteur ancré, considéré comme référence. Le curviamètre et les deflectographes ont de bonnes performances métrologiques sur chaussées souples mais sous-estiment souvent la déflexion de référence sur structures plus rigides. Cependant, leur système de mesure leur confère un avantage. En effet, ils relèvent la déflexion en quasi-continu à des vitesses variant entre 3 km/h et 18 km/h. Leur utilisation est privilégiée sur itinéraire. Afin de comprendre ces écarts de mesure, les biais de mesure de ces appareils seront étudiés puis évalués dans le second chapitre. Ces dernières années, des appareils de mesure de déflexion à grande vitesse ont été développés. Ceux-ci s'insèrent parfaitement dans le trafic puisqu'ils roulent à plus de

70 km/h. Les mesures de ces appareils semblent justes par rapport au FWD. Cependant, la plupart des évaluations sont réalisées sur chaussées souples avec un fort niveau de déflexion. D'autres études sur chaussées plus rigides pourraient valider leurs performances.

Par leur principe de mesure et leur chargement, ces appareils ont une influence non négligeable sur la déflexion. Les effets de la déflexion initiale ou de l'ensemble des charges du véhicule agissent sur le bassin relevé. D'autres part, les fréquences de sollicitation et la température influencent fortement le niveau de mesure. Ces facteurs doivent être pris en compte lors des campagnes d'essai. La présence de défauts dans la chaussée (fissures et décollements) modifie significativement la déflexion, avec de fortes variations lorsque la mesure est proche de la discontinuité.

La dernière partie de ce chapitre porte sur l'exploitation de la mesure de déflexion. Celle-ci peut se faire à l'échelle locale. Pour estimer la durée de vie résiduelle des chaussées, un calcul inverse des modules est réalisé. Les résultats déterminés avec les mesures du FWD sont souvent satisfaisants et plus encore avec une approche dynamique. Cependant, la présence de défauts ne permet pas de déterminer des modules cohérents. Des études menées avec les mesures du curviamètre ont montré qu'il était très compliqué d'obtenir des valeurs de module satisfaisantes par calcul inverse. Il est donc nécessaire de comprendre ces erreurs et d'apporter des solutions.

Différents indicateurs sont construits pour estimer l'état des couches de chaussée. Ceux-ci sont généralement fonction de la déflexion maximale et du rayon de courbure. Or, les appareils actuels relèvent le bassin de déflexion entier. Une meilleure exploitation des mesures est donc envisagée. D'autres indicateurs sont destinés à l'exploitation à l'échelle d'un itinéraire. Ils sont généralement définis par une combinaison des indicateurs de la mesure. Sur itinéraire, l'identification de zones dégradées peut se faire par l'intermédiaire de la méthode de découpage en zones homogènes. D'après les comparaisons réalisées, la méthode de du-Mesnil-Peybernard paraît la plus simple et la plus facilement paramétrable.

1.4 Conclusion

Les travaux réalisés dans cette thèse s'intéressent à l'amélioration de l'interprétation des mesures du curviamètre et du déflectographe Flash.

Après avoir rappelé les principales caractéristiques des chaussées, ce chapitre s'est tout d'abord penché sur les méthodes d'auscultation de la chaussée. On peut distinguer les méthodes d'auscultation de surface, comme le relevé de dégradations, et de structure, comme le carottage. Dans cette thèse, l'attention est portée sur la structure, part la plus importante en cas de reconstruction. La mesure de déflexion, méthode non destructive, permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques de la chaussée. Il existe plusieurs appareils capables de réaliser cette mesure. La poutre Benkelman ne relève que la déflexion maximale alors que certains appareils comme le curviamètre ou le FWD sont capables de mesurer le bassin de déflexion, défini en de nombreux points. Ces appareils ont des spécificités différentes, à savoir :

-
- Leur géométrie ;
 - Leur principe de mesure :
 - Géophones ou lasers ;
 - Mesures fixes ou quasi-continues ;
 - Leurs performances métrologiques avec leur biais de mesure.

La mesure de déflexion est sensible à certains paramètres. Lors de la réalisation des mesures, les principes de fonctionnement des appareils introduisent des erreurs qui biaisent les résultats. Par ailleurs, des facteurs tels que la température ou la fréquence de chargement des appareils ont une forte influence sur la déflexion. L'état d'endommagement de la chaussée impacte également la déflexion, puisque d'importantes variations apparaissent au niveau des défauts.

Différents modes d'exploitation des mesures de déflexion sont possibles. Tout d'abord, à l'échelle locale, avec le calcul inverse des modules des couches de chaussées. Dans ce chapitre, on a montré que si ce calcul fonctionne bien avec le FWD, il donne très souvent des résultats incohérents avec le curviamètre, probablement parce que la mesure du bassin de déflexion n'est pas suffisamment précise. Différents indicateurs ont été développés à partir de la mesure du FWD, et sont basés sur des valeurs de déflexion mesurées en différents points, et également sur le rayon de courbure. Ils permettent d'évaluer les caractéristiques de différentes couches de la chaussée. Dans un second temps, l'étude s'est penchée sur l'exploitation à l'échelle d'un itinéraire. Des indicateurs, dépendant généralement de la déflexion maximale et du rayon de courbure, sont mis en place pour qualifier l'état d'un réseau. Le découpage en zones homogènes permet l'identification des zones dégradées. L'étude des différentes méthodes de découpage a conduit à privilégier la méthode de du Mesnil-Peybernard, qui peut être facilement automatisée, et qui permet d'ajuster la précision du découpage.

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

| | | |
|-----------|---|-----------|
| II | Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion..... | 91 |
| II.1 | Introduction | 92 |
| II.2 | Etude théorique du fonctionnement des appareils..... | 92 |
| II.2.1 | Choix des structures de chaussées..... | 92 |
| II.2.2 | Etude du principe de mesure du curviamètre et des déflectographes..... | 93 |
| II.2.3 | Modélisation de la déflexion mesurée par les appareils avec ALIZE..... | 97 |
| II.2.4 | Evaluation des biais de mesure pour différents cas de structures de chaussées | 102 |
| II.2.5 | Bilan de l'étude théorique du fonctionnement des appareils | 109 |
| II.3 | Proposition d'une procédure de correction des mesures du curviamètre et du déflectographe Flash..... | 110 |
| II.3.1 | Choix de la fonction décrivant le bassin de déflexion..... | 111 |
| II.3.2 | Procédure de correction du bassin de déflexion..... | 115 |
| II.4 | Conclusion..... | 124 |

II.1 Introduction

Les appareils d'auscultation à grand rendement tels que les Défectographes 02, 03, 04, Flash et le Curviamètre permettent de mesurer la déflexion des chaussées en quasi-continu. Ce paramètre est une mesure historique de l'évaluation structurelle et donne des caractéristiques mécaniques de la chaussée.

Ce chapitre se penche sur l'étude théorique du fonctionnement du défectographe et du curviamètre et sur la mise en place d'une procédure de correction des mesures de ces appareils. Après une présentation du principe de mesure de ces appareils, les défectographes et le curviamètre sont évalués théoriquement. Cette étude est entreprise afin de mettre en évidence leur justesse vis-à-vis de la mesure du bassin de déflexion de référence sous jumelage standard, bassin censé être relevé par les appareils. L'utilisation du logiciel ALIZE (Balay, 2013) permet de simuler les mesures des appareils. Des comparaisons sont menées pour différentes températures, différentes plateformes support et épaisseurs de plateforme support.

Cette étude montre qu'il existe des biais de mesure liés aux appareils. Dans l'optique d'améliorer leur interprétation, une méthode de correction des bassins de déflexion est mise en place. Cette approche utilise le modèle de Jouve et Martinez, fonction simple permettant de décrire la forme du bassin de déflexion sous une roue isolée, pour en déduire le bassin que relèveraient effectivement les appareils (par superposition de charges et en prenant en compte leur principe de fonctionnement). Les paramètres de cette fonction sont ensuite optimisés pour réduire l'écart entre le bassin mesuré et le bassin simulé. La fonction ainsi calée permet de resimuler la déflexion sous un jumelage standard. Enfin, cette approche est validée sur des mesures théoriques, pour différents cas de structures.

II.2 Etude théorique du fonctionnement des appareils

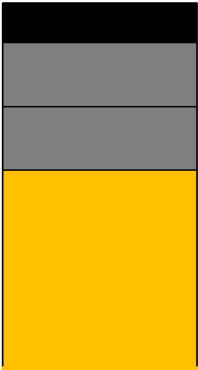
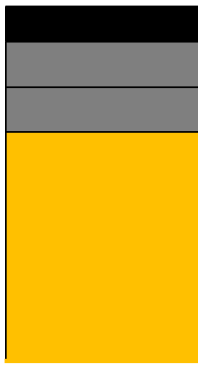
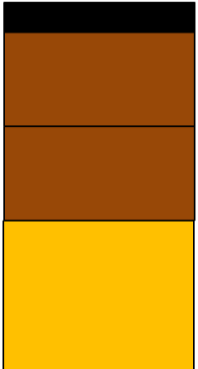
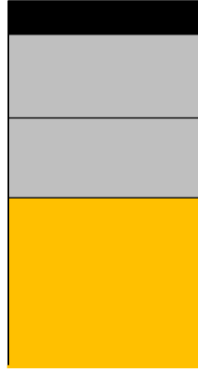
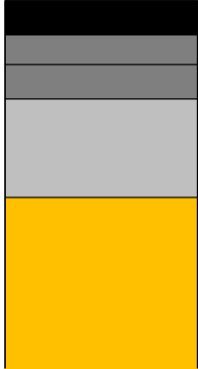
Il a été mis en évidence, par l'analyse expérimentale de la justesse et de la répétabilité des défectographes et du curviamètre (cf Chapitre I, §I.3.2), que ces appareils d'auscultation introduisent des erreurs de mesures. Afin de les comprendre et de les illustrer, une évaluation théorique de ces appareils est conduite avec l'utilisation du logiciel de calcul de structures de chaussées multicouche ALIZE. Ce logiciel prend en compte l'hypothèse de comportement élastique linéaire des matériaux. Dans ce chapitre, l'ensemble des « mesures » que l'on va présenter sont des valeurs simulées numériquement avec ALIZE.

II.2.1 Choix des structures de chaussées

Dans cette étude, cinq chaussées du catalogue des structures types de chaussées neuves (LCPC & SETRA, 1998) (deux bitumineuses, une souple, une hydraulique, et une mixte) sont considérées, pour l'évaluation de la réponse du curviamètre et des défectographes. Elles reposent sur une plateforme PF2 de 50 MPa considérée comme semi-infinie. Le Tableau II-1 répertorie l'ensemble des structures prises en compte dans cette étude.

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

Tableau II-1 : Structures de chaussées étudiées.

| Chaussée bitumineuse épaisse | | Chaussée bitumineuse | |
|---|---|---|---|
| Fiche 2 TC5-30 PF2 (GB3/GB3/PF2) | | Fiche 2 TC3-20 PF2 (GB3/GB3/PF2) | |
|  | <ul style="list-style-type: none"> Couche de surface en BB : 8 cm Couche de base en GB : 13 cm Couche de fondation en GB : 13 cm Plateforme support PF2 considérée comme semi-infinie |  | <ul style="list-style-type: none"> Couche de surface en BB : 6 cm Couche de base en GB : 8 cm Couche de fondation en GB : 8 cm Plateforme support PF2 considérée comme semi-infinie |
| Chaussée souple | | Chaussée hydraulique | |
| Fiche 27 TC3-20 PF2 (GNT/GNT/PF2) | | Fiche 5 TC5-30 PF2 (GC4/GC4/PF2) | |
|  | <ul style="list-style-type: none"> Couche de surface en BB : 8 cm Couche de base en GNT : 25 cm Couche de fondation en GNT : 25 cm Plateforme support PF2 considérée comme semi-infinie |  | <ul style="list-style-type: none"> Couche de surface en BB : 8 cm Couche de base en GC : 19 cm Couche de fondation en GC : 20 cm Plateforme support PF2 considérée comme semi-infinie |
| Chaussée mixte | | | |
| Fiche 15 TC5-30 PF2 (GB3/GB3/GC3/PF2) | | | |
|  | <ul style="list-style-type: none"> Couche de surface en BB : 8 cm Couche de base en GB : 7 cm Couche de base en GB : 8 cm Couche de fondation en GC : 23 cm Plateforme support PF2 considérée comme semi-infinie | | |

Par souci de synthétisation, seuls les résultats obtenus pour la structure bitumineuse (Fiche 2 TC3-20 PF2) sont présentés dans les graphes de ce chapitre. Des tableaux récapitulatifs ainsi que des conclusions sur les autres structures sont proposés en fin de chaque paragraphe.

II.2.2 Etude du principe de mesure du curviamètre et des déflectographes

Le curviamètre et les déflectographes introduisent des biais de mesure qui conduisent souvent à sous-estimer la déflexion de référence sous jumelage standard. Ces erreurs sont principalement dues aux principes de fonctionnement des appareils:

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

- Le jumelage standard n'est pas isolé, et le bassin de déflexion mesuré est influencé par les charges des autres roues du camion. L'impact de l'essieu avant est d'autant plus important que la chaussée est rigide.
- Le deuxième biais provient du principe de mesure des appareils.

II.2.2.1 Défectographe

Les erreurs de mesure liées au défectographe sont causées par le système de mesure de la déflexion par une poutre.

Comme cité dans le chapitre I, §I.3.2.2, le plan de référence défini par les 3 points de contact de la poutre de mesure, A, B et C devrait rester immobile mais cette condition n'est pas vérifiée dans la majorité des cas, car les points d'appui se trouvent dans la zone de déformation de la chaussée. De plus, le principe de mesure de la poutre impose une déflexion nulle en début de mesure. Aussi, l'étendue du bassin que l'appareil peut mesurer dépend de la longueur de cette poutre.

Le calcul de la déflexion mesurée par le défectographe nécessite la connaissance des mouvements des différents points d'appui A et B ainsi que celui du patin de mesure C. La forme du bassin suivant l'axe du camion (point A) et l'axe décrit par l'alignement jumelage arrière-roue avant (point B et C) doivent être déterminées (De Boissoudy, et al., 1984), (Triki, 1990).

La Figure II-1 illustre les mouvements des points A, B et C pour un faible déformabilité de la chaussée.

En 1984, De Boissoudy, et al. expliquent le mouvement de la poutre de mesure : « Lorsque le camion avance sur la poutre, le point A sort progressivement de la zone d'influence de l'essieu avant et remonte. Les points d'appui latéraux B entrent dans la zone d'influence de l'essieu arrière et s'enfoncent. Les patins de mesure C sont, en début de mesure, déjà dans la zone d'influence de l'essieu de chargement. A partir de la déflexion initiale dC_0 ils atteignent la déflexion maximale dC_n en fin de mesure. »

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

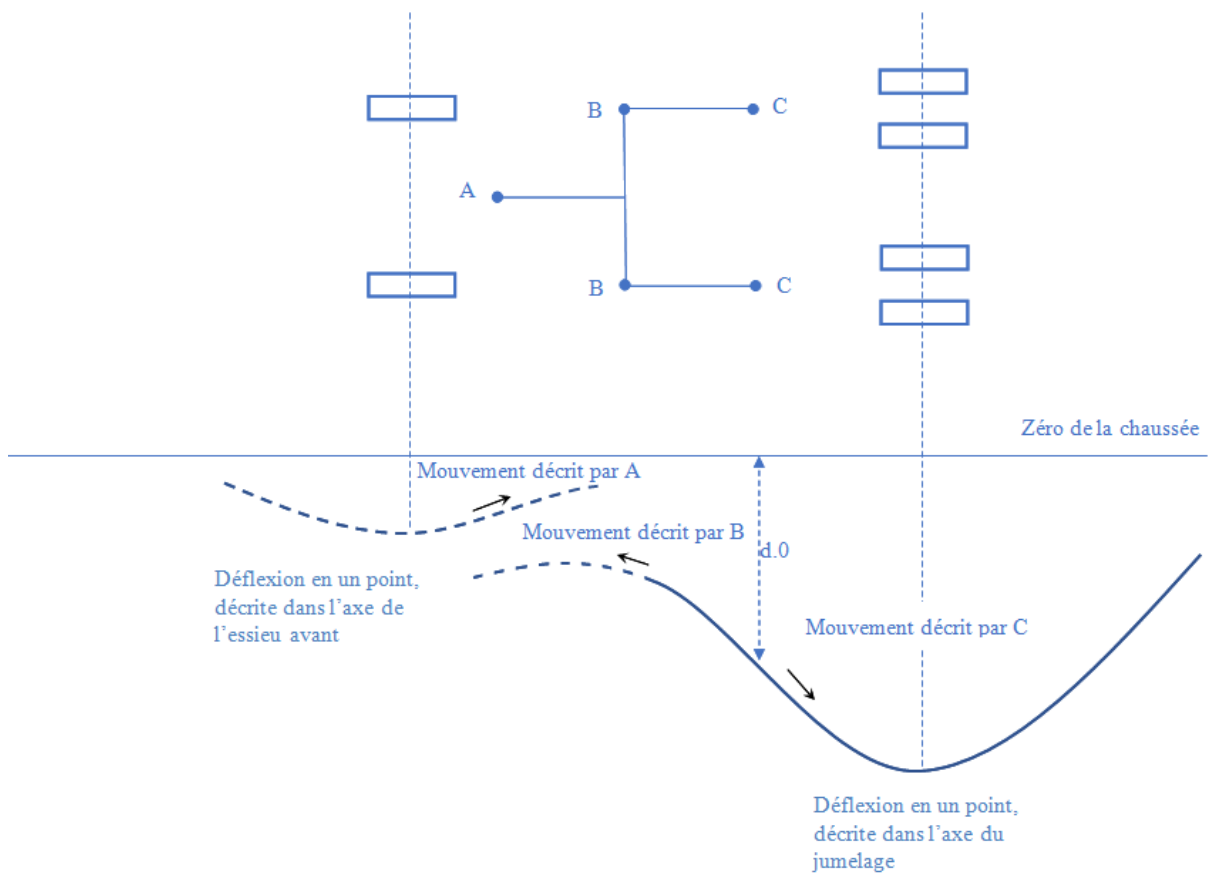


Figure II-1 : Fonctionnement de la poutre du déflectographe non modifié (De Boissoudy, et al., 1984).

Le calcul de la déflexion résultante mesurée par le déflectographe est établi à l'aide de la Figure II-2. Le point O désigne l'axe de rotation réel du bras de mesure.

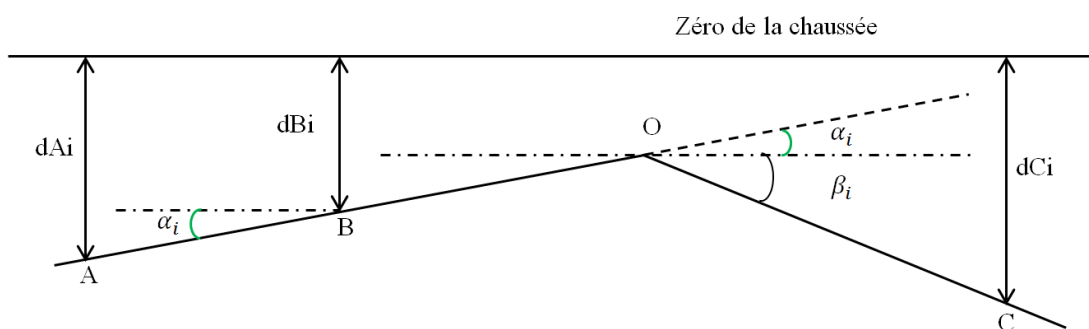


Figure II-2 : Calcul de la déflexion mesurée (De Boissoudy, et al., 1984).

i représente l'indice du point de mesure, compris entre 0 (début de mesure) et n (fin de mesure).

Les dimensions des angles étant petites, il est considéré que :

$$\sin \alpha_i = \alpha_i \quad (\text{II-1})$$

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

$$\sin \beta_i = \beta_i \quad (\text{II-2})$$

Ainsi, les angles sont définis, en radians, comme suit :

$$\alpha_i = \frac{dA_i - dB_i}{AB} \quad (\text{II-3})$$

$$\beta_i = \frac{dC_i - (dB_i - \alpha_i * \overline{BO})}{\overline{OC}} \quad (\text{II-4})$$

Il est ensuite possible de déterminer la déflexion au point de mesure i, soit :

$$W_i = \overline{OC} * (\alpha_i + \beta_i) \quad (\text{II-5})$$

Ainsi, la déflexion maximale mesurée est égale à :

$$W_m = W_n - W_0 \quad (\text{II-6})$$

Avec W_0 , la déflexion initiale égale à

$$W_0 = \overline{OC} * (\alpha_0 + \beta_0) \quad (\text{II-7})$$

Pour une poutre quelconque, W_m s'exprime par:

$$W_m = \frac{\overline{OC} + \overline{OB}}{\overline{AB}} * (dA_n - dA_0) + (dC_n - dC_0) - \frac{\overline{AB} + \overline{OC} + \overline{OB}}{\overline{AB}} * (dB_n - dB_0) \quad (\text{II-8})$$

II.2.2.2 Curviamètre

Le biais de mesure introduit par le curviamètre vient du traitement des signaux des géophones. L'obtention de la déflexion se fait à partir de l'accélération verticale subie par la chaussée sous le passage de l'essieu arrière du curviamètre. Elle s'exprime ainsi (Van Buylaere, 2009):

$$\gamma(t) = a \frac{dS(t)}{dt} + bS(t) + c \int_0^t S(t)dt \quad (\text{II-9})$$

Avec :

a, b et c des paramètres de calibration (sensibilité, amortissement et fréquence de coupure des géophones) ;

S(t) : Le signal du géophone (vitesse de déplacement vertical).

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

La déflexion est déduite de l'accélération verticale par une double intégration. La résolution nécessite l'introduction de deux constantes d'intégration. En raison de la géométrie de l'appareil, la déflexion est mesurée jusqu'à une distance d'environ 3 m du centre de la charge. Pour cette raison, la déflexion et la pente du bassin sont considérées nulles pour cette distance.

II.2.3 Modélisation de la déflexion mesurée par les appareils avec ALIZE

La première étape consiste à établir un cas de chargement correspondant à la géométrie de l'appareil (cf Chapitre I, §I.3.1) avec le logiciel ALIZE. L'objectif est de calculer le bassin de déflexion absolu sous le camion complet, puis celui mesuré par les appareils. La Figure II-3 représente le cas de chargement du déflectographe Flash. Le camion comprend un essieu avant à roues simples, et un essieu arrière à roues jumelées. Dans ALIZE, les charges sont représentées par des cercles, chargés par une pression verticale uniforme.

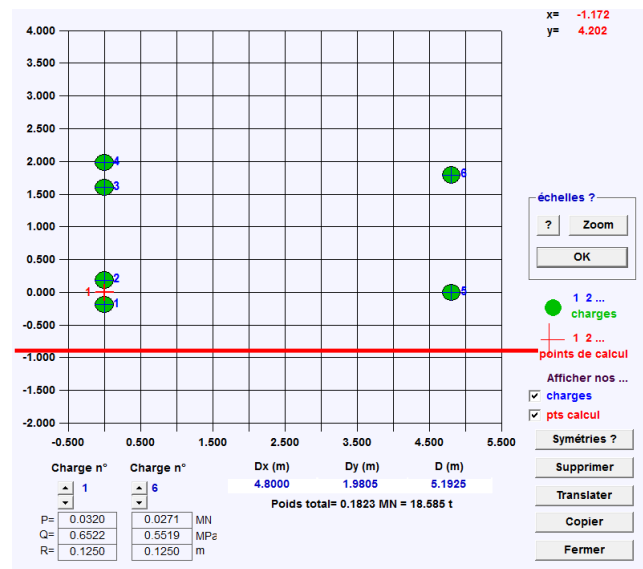


Figure II-3: Capture écran Alizé (Balay, 2013) - Visualisation du cas de chargement du Défectographe Flash.

II.2.3.1 Fréquence de sollicitations de la chaussée

Bien que le logiciel ALIZE ne considère pas le caractère viscoélastique des matériaux bitumineux, la prise en compte des fréquences de sollicitation de la chaussée et des températures dans le choix des modules de ces matériaux permet de prendre en compte de façon approchée cette hypothèse. Les valeurs de module des enrobés à différentes températures et fréquences sont déterminées à partir des essais de module complexe, généralement réalisés pour des fréquences comprises entre 1 et 30 Hz, et des températures comprises entre -10 et 40 °C. Des lois d'ajustement des modules des matériaux bitumineux en fonction de la fréquence et de la température sont également disponibles dans le logiciel ALIZE.

La méthode utilisée pour évaluer les fréquences de chargement dans une chaussée consiste à utiliser la déformation à la base de la couche bitumineuse. La fréquence est déterminée à

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

partir de la distance L entre les crêtes en contraction du signal, et du temps que met la roue pour parcourir cette distance (Baaj, 2002). Le signal de la Figure II-4 illustre le calcul de la fréquence F de la sollicitation.

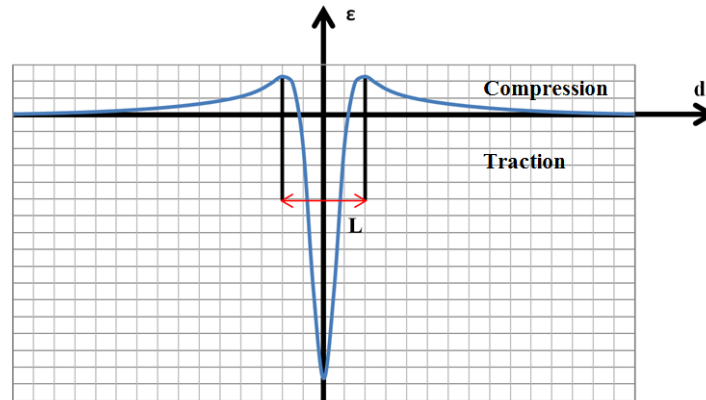


Figure II-4 : Signal de déformation enregistré à la base de la chaussée lors du passage d'une roue à vitesse constante (Baaj, 2002).

Un exemple de résultats de fréquences obtenues est donné dans le Tableau II-2. La fréquence est définie pour une vitesse de roulement des appareils d'auscultation et dépend de l'épaisseur des couches bitumineuses.

Tableau II-2 : Fréquences de sollicitation en fonction de la vitesse de roulement (Baaj, 2002).

| Type de revêtement | V=36 km/h | V=90 km/h |
|---|----------------------|-----------------------|
| Revêtement mince (<0.04 m) L= 0.5 m | T= 0.05 s F=20 Hz | T= 0.02 s F=50 Hz |
| Revêtement épais (0.1 m/0.14 m) L=2 m | T=0.2 s F= 5 Hz | T=0.08 s F=12.5 Hz |

La fréquence de sollicitation de la chaussée dépend de la vitesse de l'appareil de mesure. Pour certaines configurations, elle peut être de l'ordre de 1 Hz (pour les deflectographes, roulant à vitesse faible, de l'ordre de 5 km/h). La gamme de fréquence disponible pour l'ajustement des modules dans le logiciel ALIZE se situe entre 2 Hz et 30 Hz. Ainsi, les fréquences inférieures à cette limite basse seront considérées égales à 2 Hz.

La Figure II-5 montre, pour la structure bitumineuse de la fiche 2 du catalogue, l'effet d'une augmentation de la fréquence de sollicitation de 2 à 15 Hz sur la déflexion. Cette variation a peu d'effet sur la forme du bassin de déflexion, pour une distance supérieure à 1 m de part et d'autre de la charge. La déflexion loin de la charge étant sensible aux couches profondes, la superposition des bassins de déflexion à cette distance est explicable par un module de sollicitation identique, non affecté par la fréquence de sollicitation de la chaussée. Cependant, au niveau de la déflexion maximale, un écart de 6 mm/100 est constaté entre les bassins relevés pour les deux fréquences extrêmes. Ceci est la conséquence de l'évolution des modules des matériaux bitumineux qui augmentent avec la fréquence. L'augmentation de la rigidité de la structure fait diminuer la déflexion maximale.

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

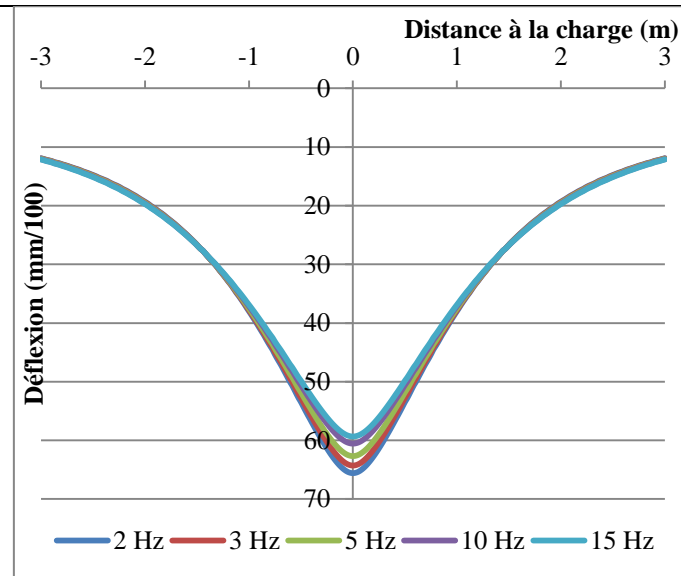


Figure II-5: Influence de la fréquence sur un bassin de déflexion sous jumelage de référence - Structure bitumineuse.

II.2.3.2 Simulations des bassins de déflexion mesurés par les appareils

Dans ce chapitre, seuls les graphiques représentant les mesures du curviamètre et du déflectographe Flash sont présentés.

A l'aide du logiciel ALIZE, les bassins de déflexion absolus sous les six charges des appareils sont tout d'abord simulés. Ce logiciel permet de calculer les déflexions en différents points d'un massif semi-infini composé de plusieurs couches à l'aide de l'outil « calcul étendu ». Le bassin de déflexion « absolu » est obtenu en calculant le déplacement vertical dans l'axe du jumelage arrière (droit ou gauche selon l'appareil). Cet axe pour le calcul du bassin de déflexion est représenté par la ligne rouge de la Figure II-3, dans le cas du déflectographe Flash. La Figure II-6 présente pour le déflectographe Flash et le Curviamètre, les bassins de déflexion « absolus » sous l'appareil complet calculés avec ALIZE. Le bassin de déflexion « absolu » est caractérisé par deux pics correspondant aux essieux avant et arrière.

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

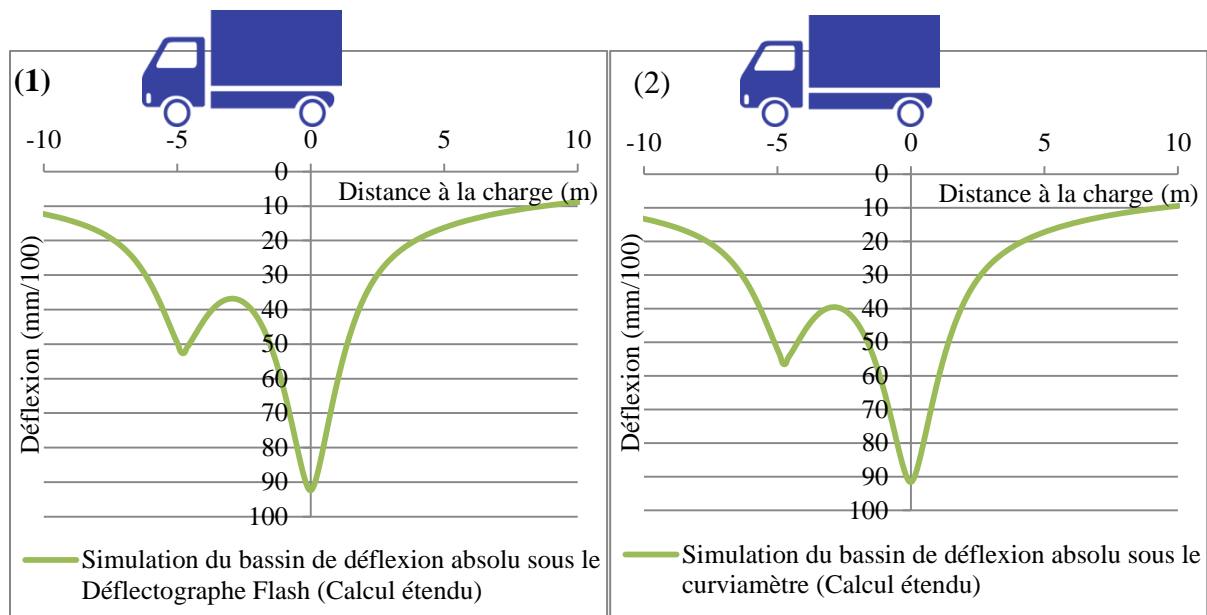


Figure II-6 : Bassins de déflexion absolus sous l'appareil calculés avec ALIZE. (1) Défectographe Flash – (2) Curviamètre – Structure bitumineuse.

Ensuite, afin de simuler les bassins de déflexion mesurés par les appareils, nous avons appliqué aux bassins « absolus » calculés avec ALIZE un traitement correspondant au principe de fonctionnement de chaque appareil.

Pour le curviamètre, cela consiste à imposer une déflexion nulle et une pente nulle du bassin de déflexion à 3 m de la charge. Ces conditions limites sont imposées en dérivant le bassin absolu sous l'appareil, en imposant une valeur nulle à la dérivée à 3 m de la charge, puis en intégrant la vitesse de déplacement et en ajustant la constante d'intégration pour obtenir une déflexion nulle à 3 m.

Les hypothèses de traitement des mesures du déflectographe consistent à fixer une déflexion nulle en début de mesure et à considérer que les points A et B d'appui de la poutre de mesures sont fixes pendant le déplacement de l'appareil. Pour calculer la déflexion mesurée, on utilise les bassins de déflexions absolus sous l'appareil pour extraire les mouvements des points d'appui de la poutre A, B et C et ensuite appliquer l'équation (II-8).

La Figure II-7 présente les bassins de déflexions mesurés (simulés avec ALIZE) pour le déflectographe Flash et le curviamètre. Pour le déflectographe Flash, le bassin est obtenu seulement devant l'essieu arrière (entre 0 et -1.5 m). La déflexion maximale atteint 53 mm/100. Pour le curviamètre, le bassin s'étend de part et d'autre de l'essieu arrière (entre -1 m et 3 m). La déflexion maximale est de 42 mm/100.

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

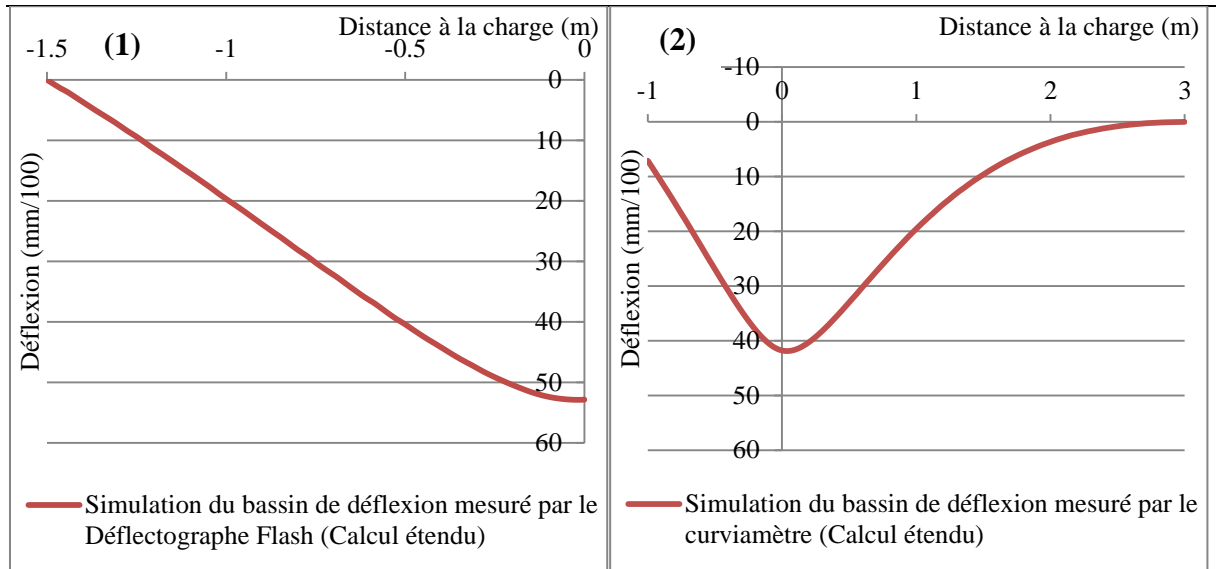


Figure II-7 : Simulation des bassins de déflexion mesurés par les appareils avec ALIZE - (1) Déflectographe Flash – (2) Curviamètre - Structure bitumineuse.

La méthode de simulation des mesures des appareils étant définie, nous avons comparé les bassins de déflexion simulés des appareils avec le bassin de déflexion sous un jumelage standard chargé à 65 kN, considéré comme la référence. En effet, le déflectographe et le curviamètre sont conçus pour relever la déflexion sous cette charge, qui correspond à la charge de référence de la méthode française de dimensionnement des chaussées. Le bassin de déflexion sous un jumelage isolé, chargé à 65 kN est donc le bassin de référence que devraient mesurer les déflectographes et le curviamètre en l'absence de biais.

La Figure II-8 compare, pour le déflectographe Flash et le curviamètre :

- les simulations des bassins absolus sous l'ensemble des six charges de chaque appareil (en rouge);
- les simulations des bassins mesurés par les appareils, qui prennent en compte les hypothèses de mesure (en bleu);
- les simulations des bassins de référence sous le jumelage standard chargé à 65 kN (en vert).

La comparaison montre clairement que ces appareils, conçus à l'origine pour relever la déflexion de référence sous le jumelage standard, introduisent d'importantes erreurs de mesure. Les hypothèses utilisées pour traiter les mesures sont fortes et ont un effet non négligeable sur la mesure de déflexion, comme la nécessité de considérer une déflexion nulle à une certaine distance de la charge. Le niveau de déflexion mesuré est largement sous-estimé pour les deux appareils par rapport à celui de référence. En effet, la déflexion de référence est nulle à environ 12 m de la charge, bien loin des hypothèses de mesure des appareils. De plus, les formes des bassins sont modifiées par rapport au bassin de référence. Les écarts entre les déflexions maximales mesurées et celles de référence augmentent avec la rigidité de la

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

structure. Dans ce travail, ils varient entre 40 % pour les chaussées souple et bitumineuses et 80 % pour une chaussée rigide.

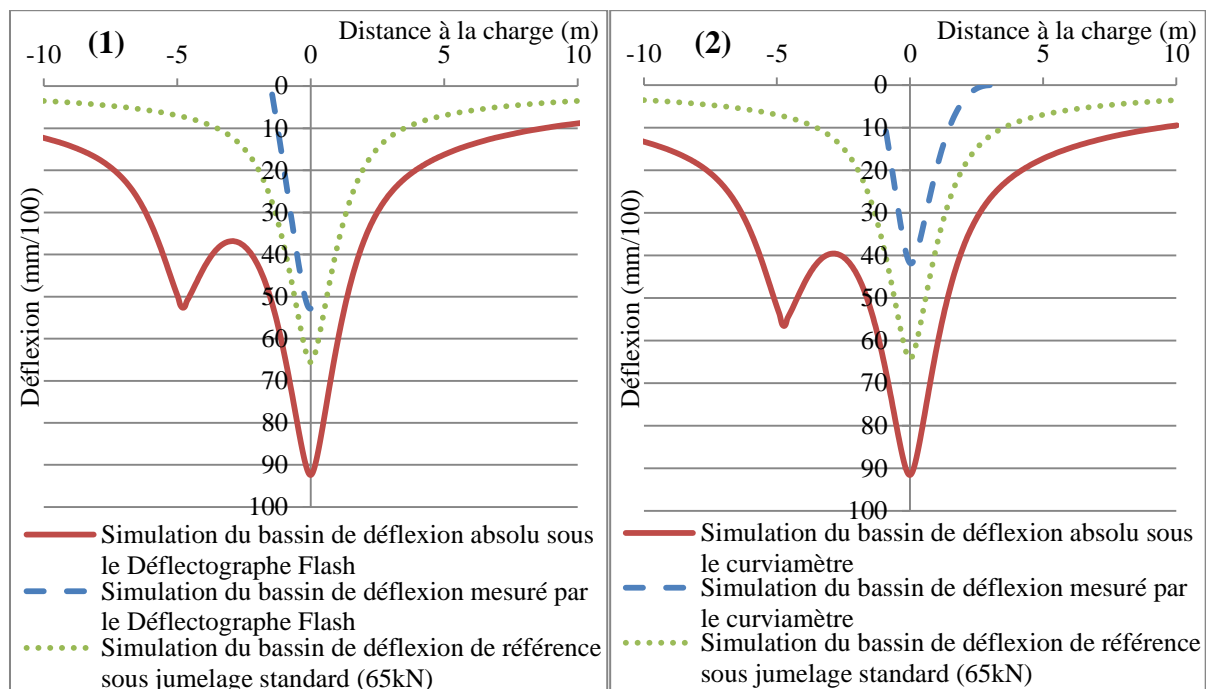


Figure II-8 : Simulations des bassins de déflexion absolus sous l'appareil, mesurés par les appareils et de référence sous jumelage de standard ; (1) Défectographe Flash – (2) Curviamètre – Structure bitumineuse.

Des conclusions similaires ont été obtenues pour les défectographes 02, 03 et 04. Les graphiques obtenus sont semblables à ceux présentés pour le défectographe Flash. Le niveau de déflexion des D02, D03 et D04 est souvent même plus faible que celui du défectographe Flash. L'étendue du bassin mesuré varie également suivant le type de défectographe, en raison de la longueur de la poutre de mesure (variant entre 1.15 m et 1.5 m selon le modèle). Pour cette structure, les simulations des mesures de déflexion des défectographes 02, 03 et 04 sous-estiment la déflexion de référence sous jumelage standard.

En conclusion, les différents appareils étudiés, du fait de leur principe de mesure, sous-estiment de façon importante la déflexion de la chaussée, et modifient la forme du bassin de déflexion. Ces biais de mesure rendent difficile l'interprétation des mesures par un modèle mécanique, ou par un calcul inverse, puisque la sous-estimation de la déflexion va conduire à une surestimation des modules des couches de chaussée. Pour cette raison, les analyses des mesures des appareils restent aujourd'hui limitées, et essentiellement qualitatives (on se base sur les variations du niveau de déflexion pour identifier des zones dégradées).

II.2.4 Evaluation des biais de mesure pour différents cas de structures de chaussées

Afin de mieux évaluer les limites de mesure actuelles des défectographes et du curviamètre, les biais de mesure générés par les appareils ont été évalués sur 5 cas de

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

structures de chaussées, pour différentes températures, et différents cas de plateformes et épaisseurs de plateforme (cf. Tableau II-1). Cette étude a été conduite à l'aide du logiciel ALIZE en comparant les bassins mesurés, simulés avec ALIZE, et les bassins de référence sous le jumelage de référence, chargé à 65 kN.

II.2.4.1 Influence de la température

La Figure II-9 présente les écarts de justesse en déflexion maximale des cinq appareils pour une structure bitumineuse reposant sur une plateforme semi-infinie de module 50 MPa, pour différentes températures. Le niveau de mesure conventionnellement vrai correspond au niveau de déflexion absolu sous le jumelage arrière du camion complet et non au niveau de référence sous jumelage standard. Pour tous les appareils et toutes les configurations, les écarts maximum en déflexion sont très importants même s'ils diminuent lorsque la température augmente. Les déflectographes D02 et D03 présentent des écarts vraiment très grands. Les appareils les plus justes sont le D04, le Flash et le curviamètre.

La Figure II-9 présente également les classes de justesse des appareils, définies dans la méthode d'essai LCPC n°39 (Simonin, 1997). On constate que c'est seulement pour des températures supérieures ou égales à 25°C et pour les structures bitumineuses que le déflectographe Flash et le Curviamètre sont considérés de classe 1. Les déflectographes D02 et D03 sont très loin d'atteindre la classe 1.

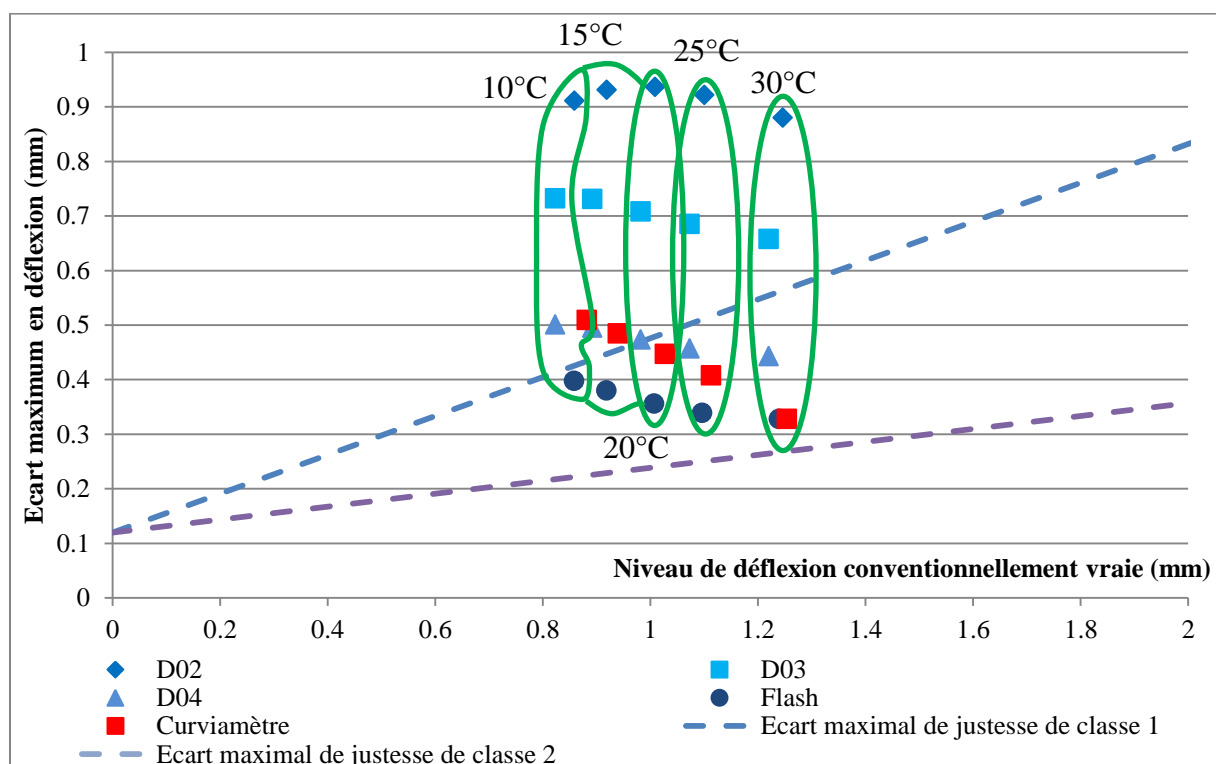


Figure II-9: Ecart maximum de justesse de la mesure de déflexion pour différents appareils - Structure bitumineuse.

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

Les Tableaux II-3 et II-4 présentent les écarts relatifs de déflexion maximale entre les bassins mesurés par les cinq appareils et les bassins de référence sous jumelage standard, en prenant en compte la fréquence de mesure des appareils. L'écart relatif Er est exprimé par :

$$Er = \frac{|D_{Ref} - D_{mes}|}{D_{Ref}} * 100 \quad \text{(II-10)}$$

Avec D_{Ref} : Déflexion maximale de référence sous jumelage standard.

D_{mes} : Déflexion mesurée par les appareils.

Un code couleurs, défini dans le Tableau II-4, a été utilisé pour classer les écarts relatifs entre la déflexion maximale de référence sous le jumelage standard et celle de la mesure des appareils.

Les appareils D02 et D03 ne parviennent pas à mesurer une déflexion maximale cohérente sur les structures hydrauliques, mixtes et bitumineuses épaisses (les valeurs mesurées sont souvent négatives, du fait des mouvements de la poutre de mesure). Bien que meilleures sur structure souple, leurs mesures présentent toujours des écarts relatifs supérieurs à 40 %. Le D04 n'apporte guère des résultats plus satisfaisants puisque l'ensemble des écarts oscille entre 30 % et 100 %. Les variations les plus faibles sont constatées sur chaussées bitumineuses et souples pour le deflectographe Flash et le curviamètre. Cependant, pour les chaussées rigides, ces deux derniers ne parviennent pas à mesurer des valeurs satisfaisantes. Plus la structure est rigide, plus Er est important. Des écarts relatifs plus faibles sont constatés avec une augmentation de la température. Dans toutes les configurations, la déflexion maximale mesurée par les appareils est largement sous-estimée par rapport à celle de référence sous jumelage standard. Elle ne peut donc avoir qu'une valeur indicative, et ne permet pas une analyse par des modèles mécaniques de la chaussée.

Tableau II-3 : Ecarts relatifs entre la déflexion maximale de référence sous le jumelage standard et celle de la mesure des appareils pour différentes structures de chaussées et différentes températures.

| | D 02 | | | | | D 03 | | | | | D 04 | | | | |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 10°C | 15°C | 20°C | 25°C | 30°C | 10°C | 15°C | 20°C | 25°C | 30°C | 10°C | 15°C | 20°C | 25°C | 30°C |
| Bitumineuse épaisse | Grey | Grey | Grey | Grey | Purple | Grey | Grey | Purple | Purple | Purple | Purple | Purple | Red | Red | Orange |
| Bitumineuse | Grey | Grey | Purple | Purple | Purple | Purple | Purple | Purple | Red | Red | Red | Orange | Orange | Orange | Orange |
| Souple | Purple | Purple | Purple | Purple | Purple | Purple | Purple | Purple | Purple | Red | Orange | Orange | Orange | Orange | Orange |
| Mixte | Grey | Grey | Grey | Grey | Grey | Grey | Grey | Grey | Grey | Grey | Purple | Purple | Purple | Purple | Purple |
| Hydraulique | Grey | Grey | Grey | Grey | Grey | Grey | Grey | Grey | Grey | Grey | Purple | Purple | Purple | Purple | Purple |

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

| | Flash | | | | | Curviamètre | | | | |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|-------------|
| | 10°C | 15°C | 20°C | 25°C | 30°C | 10°C | 15°C | 20°C | 25°C | 30°C |
| Bitumineuse Epaisse | Red | Orange | Orange | Orange | Yellow | Purple | Red | Red | Orange | Green |
| Bitumineuse | Orange | Yellow | Yellow | Yellow | Green | Orange | Orange | Orange | Yellow | Light Green |
| Souple | Orange | Orange | Yellow | Yellow | Yellow | Orange | Orange | Orange | Yellow | Green |
| Mixte | Purple | Purple | Red | Red | Red | Purple | Purple | Purple | Red | Orange |
| Hydraulique | Purple | Purple | Purple | Red | Red | Purple | Purple | Purple | Red | Orange |

Tableau II-4 : Classification des écarts relatifs entre la déflexion maximale sous le jumelage de référence et celle de la mesure des appareils.

| $Er > 100\%$ | $60\% < Er < 100\%$ | $40\% < Er < 60\%$ | $20\% < Er < 40\%$ | $10\% < Er < 20\%$ | $5\% < Er < 10\%$ | $1\% < Er < 5\%$ | $Er < 1\%$ |
|--------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|------------|
| Black | Purple | Red | Orange | Yellow | Green | Light Green | Light Blue |

II.2.4.2 Influence de la portance de la plateforme

Cette partie analyse l'influence du module de la plateforme sur la justesse des mesures. Cette étude est réalisée pour une température de 15 °C.

La Figure II-10 représente l'écart maximum entre la déflexion mesurée et la déflexion conventionnellement vraie pour une chaussée bitumineuse qui repose sur différentes catégories de plateformes supposées semi-infinies. Plus la plateforme support est rigide, moins le niveau de déflexion est élevé. Une augmentation de la rigidité de la plateforme conduit à une amélioration de la justesse des appareils. Les D02 et D03 ne respectent pas les limites des classes de justesse 1 et 2. Les structures rigides conduisent toujours à un écart assez conséquent pour ces deux appareils. Le D04 est de classe 1 à partir de PF2qs. Le curviamètre et le Flash sont considérés de classe 1 pour la plateforme PF2qs (80 MPa) et de classe 2 entre PF3 et PF4.

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

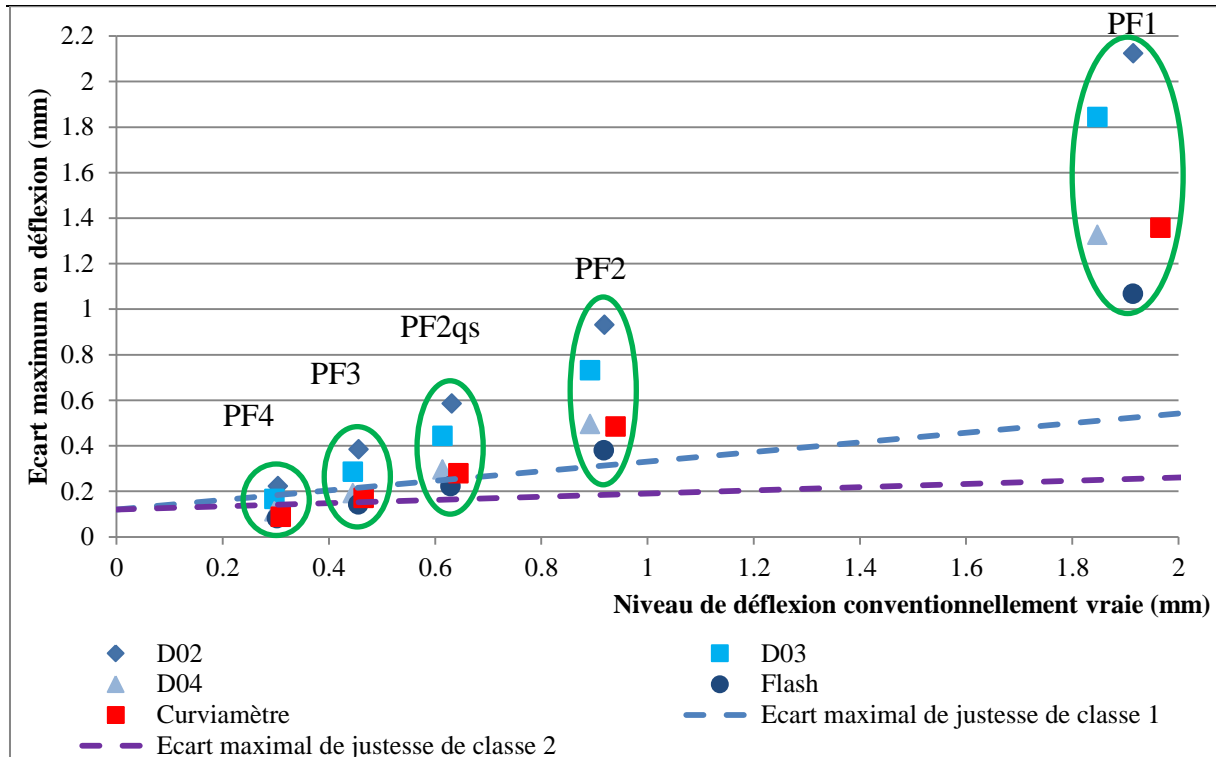


Figure II-10 : Ecart maximum de justesse des différents appareils, pour différentes portances de plateforme - Structure bitumineuse.

Sur les chaussées souples, les D02, D03 sont de classe 1 pour les plateformes à partir de PF3. Pour toutes les chaussées, le D04, le curviamètre et déflectographe Flash sont considérés de classe 1 pour des plateformes PF3 et de classe 2 sur plateforme PF4.

Le Tableau II-5 présente les écarts relatifs entre la déflexion maximale mesurée et celle de référence sous jumelage standard pour les différentes plateformes. Il respecte le code couleur défini dans le Tableau II-4. Le changement de plateforme ne permet pas aux appareils D02 et D03 d'atteindre une précision satisfaisante. Les déflexions sur chaussées rigides sont négatives et $E_r > 40\%$ pour les structures bitumineuses et souple. Pour le D04, les écarts relatifs se situent entre 20 % et 100 % pour l'ensemble des combinaisons avec de meilleurs résultats pour la chaussée souple. Comme pour les variations de températures, les valeurs les plus satisfaisantes sont obtenues pour les mesures du déflectographe Flash et du curviamètre. Les mesures de ces appareils sur chaussées bitumineuses et souples sont proches des mesures sous jumelage de référence. Cependant, sur chaussées mixte et hydraulique, les résultats ne sont pas satisfaisants, quelle que soit la plateforme. Pour tous les appareils et toutes les structures, la présence d'une plateforme plus rigide induit une diminution de E_r et donc une mesure plus juste des appareils par rapport à la déflexion sous jumelage de référence. Pour toutes les configurations, la déflexion sous le jumelage de référence est sous-estimée par les appareils.

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

Tableau II-5 : Ecart relatif entre la déflexion maximale sous le jumelage de référence et celle de la mesure des appareils pour différents niveaux de portance de la plateforme.

| | D02 | | | | | D03 | | | | | D04 | | | | |
|---------------------|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|
| | PF1 | PF2 | PF2 _{qs} | PF3 | PF4 | PF1 | PF2 | PF2 _{qs} | PF3 | PF4 | PF1 | PF2 | PF2 _{qs} | PF3 | PF4 |
| Bitumineuse épaisse | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bitumineuse | | | | | | | | | | | | | | | |
| Souple | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mixte | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hydraulique | | | | | | | | | | | | | | | |

| | Flash | | | | | Curviamètre | | | | |
|---------------------|-------|-----|-------------------|-----|-----|-------------|-----|-------------------|-----|-----|
| | PF1 | PF2 | PF2 _{qs} | PF3 | PF4 | PF1 | PF2 | PF2 _{qs} | PF3 | PF4 |
| Bitumineuse épaisse | | | | | | | | | | |
| Bitumineuse | | | | | | | | | | |
| Souple | | | | | | | | | | |
| Mixte | | | | | | | | | | |
| Hydraulique | | | | | | | | | | |

II.2.4.3 Influence de l'épaisseur de la plateforme

Dans cette partie, on s'intéresse à l'effet de l'épaisseur de la plateforme sur la justesse des mesures de déflexion. Les structures du Tableau II-1 sont prises en compte en modifiant l'épaisseur de la plateforme reposant sur un substratum rigide de module 55000 MPa. La température est fixée à 15 °C. La Figure II-11 présente l'écart maximal en déflexion par rapport au niveau de déflexion conventionnellement vrai pour une chaussée bitumineuse reposant sur une plateforme PF2 (50 MPa). Le niveau de déflexion décroît avec une diminution de l'épaisseur de la plateforme. De nouveau dans cette évaluation, le curviamètre et le deflectographe Flash présentent la meilleure précision de mesure, en particulier pour une faible épaisseur de plateforme. Ils sont considérés de classe 2 pour des épaisseurs de 2 m et de 4 m, et de classe 1 pour des épaisseurs de 6 m et 8 m.

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

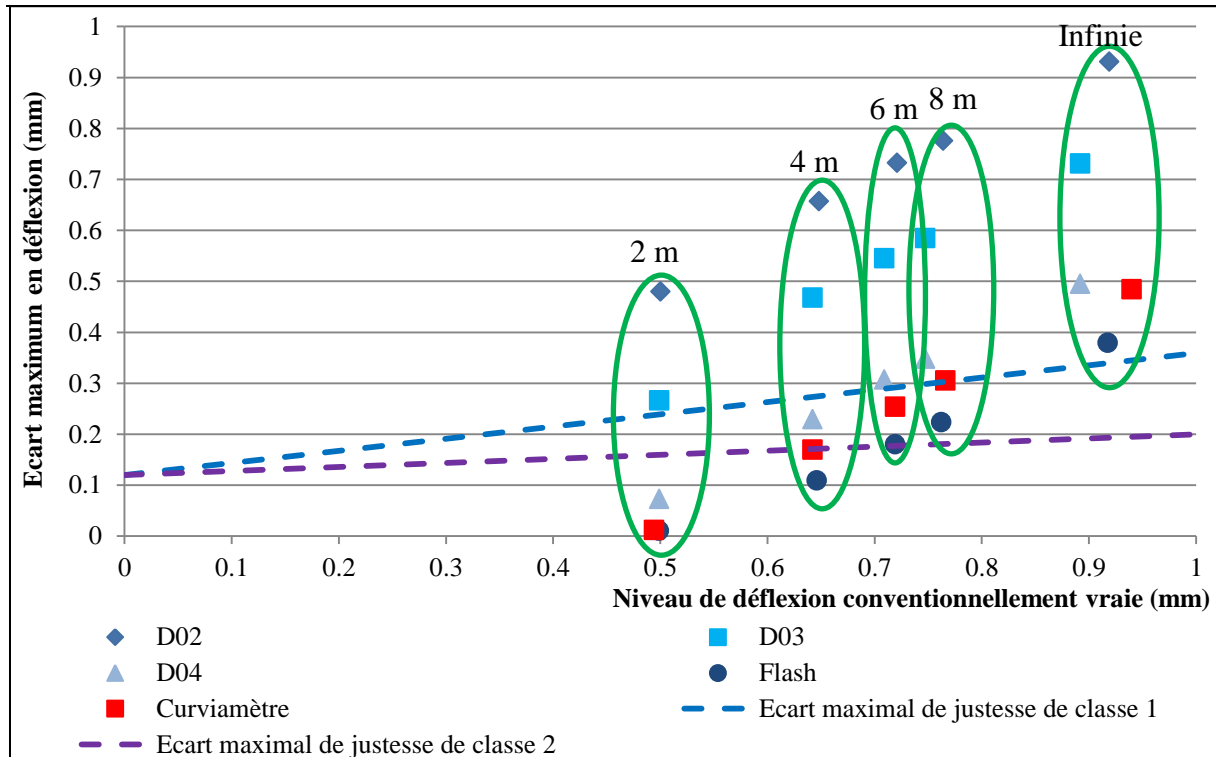


Figure II-11 : Ecart maximum de justesse des différents appareils, pour différentes épaisseurs de plateforme - structure bitumineuse.

Sur chaussée souple, les appareils D02 et D03 sont de classe 1 pour une épaisseur de 2 m de plateforme. Pour le déflectographe Flash et le curviamètre, des conclusions similaires à la chaussée bitumineuse sont formulées. Sur les chaussées rigides, pour une épaisseur de plateforme de 2 m, le curviamètre et le déflectographe Flash sont considérés de classe 2. La diminution de l'épaisseur de la plateforme réduit l'écart avec la déflexion conventionnellement vraie et permet ainsi aux appareils tels que le curviamètre et le déflectographe Flash d'atteindre la classe 2.

Le Tableau II-6 présente les écarts relatifs entre la déflexion maximale mesurée et celle de référence sous jumelage standard pour les différentes épaisseurs de plateforme. Il respecte le même code couleur donné par le Tableau II-4. Le changement d'épaisseur de plateforme ne permet pas aux appareils D02 et D03 de mesurer une déflexion maximale satisfaisante. Pour les cinq structures, les écarts relatifs avec la déflexion maximale sous le jumelage de référence restent généralement supérieurs à 60 %. Pour le D04, ils se situent entre 10 % et 60 % pour l'ensemble des combinaisons avec de meilleurs résultats pour les chaussées souples et bitumineuses. Les résultats pour le déflectographe Flash et le curviamètre sont toujours les plus satisfaisantes. Les écarts relatifs sur chaussées souples et bitumineuses se situent entre 5 % et 20 % et atteignent 60 % sur les chaussées rigides. Pour l'ensemble des mesures, plus le substratum rigide est proche de la surface, plus la mesure est proche de la déflexion de référence sous jumelage standard. Pour la majorité des configurations de structures et d'épaisseur de plateforme, la déflexion mesurée par les appareils est sous-estimée par rapport à la déflexion de référence sous jumelage standard. Seul le déflectographe Flash surestime la

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

valeur de la déflexion maximale de référence sous jumelage standard pour une plateforme d'épaisseur 2 m, pour les structures bitumineuses.

Tableau II-6 : Influence de l'épaisseur de la plateforme sur la déflexion maximale, pour différents appareils, pour une structure bitumineuse.

| | D02 | | | | | D03 | | | | | D04 | | | | |
|---------------------|---------|-----|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|-----|
| | Infinie | 8 m | 6 m | 4 m | 2 m | Infinie | 8 m | 6 m | 4 m | 2 m | Infinie | 8 m | 6 m | 4 m | 2 m |
| Bitumineuse épaisse | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bitumineuse | | | | | | | | | | | | | | | |
| Souple | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mixte | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hydraulique | | | | | | | | | | | | | | | |

| | Flash | | | | | Curviamètre | | | | |
|---------------------|---------|-----|-----|-----|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|
| | Infinie | 8 m | 6 m | 4 m | 2 m | Infinie | 8 m | 6 m | 4 m | 2 m |
| Bitumineuse épaisse | | | | | | | | | | |
| Bitumineuse | | | | | | | | | | |
| Souple | | | | | | | | | | |
| Mixte | | | | | | | | | | |
| Hydraulique | | | | | | | | | | |

II.2.5 Bilan de l'étude théorique du fonctionnement des appareils

Dans la première partie ce chapitre, on s'est intéressé à la justesse de la mesure des déflectographes et du curviamètre, pour différents cas de structures de chaussées. Dans un premier temps, le principe de fonctionnement des différents appareils a été analysé, et les principaux biais de mesure de chaque appareil ont été identifiés. Le premier biais, commun au curviamètre et au déflectographe, est lié à l'influence des charges du second essieu du camion sur la déflexion. Le second biais dépend du type d'appareil. Les déflectographes assument que la déflexion est nulle en début de mesure et que les points d'appuis de la poutre restent fixes pendant la mesure, ce qui n'est pas vérifié. Pour le curviamètre, la déflexion et la pente du

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

bassin sont supposées égales à zéro à 3 m de la charge, ce qui représente aussi une approximation. Ces hypothèses ont une forte influence sur la mesure de déflexion.

Après avoir identifié les causes des erreurs de mesure, une évaluation théorique de la justesse des appareils a été réalisée avec le logiciel ALIZE, pour plusieurs cas de structures de chaussées. Les différentes études sur l'influence de la température, de la plateforme ou encore de l'épaisseur de la plateforme ont mis en évidence les résultats suivants :

- les déflectographes 02 et 03 conduisent à des mesures très peu précises. Les écarts entre les mesures des appareils et la déflexion de référence sous jumelage sont généralement supérieurs à 60 % et peuvent atteindre 100 % (avec même des cas de mesures négatives des appareils) sur chaussées rigides et même sur chaussées bitumineuses par température basse. On confirme ainsi leur domaine de qualification pour les chaussées souples uniquement.
- Le déflectographe D04 est adapté aux chaussées souples et bitumineuses (écart de justesse généralement compris entre 20 % et 40 %). Pour les autres types de chaussées, l'erreur de justesse est supérieure à 40 %, ce qui ne permet pas de qualifier l'appareil.
- Les écarts de justesse obtenus avec le curviamètre et le déflectographe Flash sont légèrement meilleurs (écarts de 5 % à 40 %) que ceux du déflectographe 04 pour les chaussées souples, bitumineuses et bitumineuses épaisses. La qualification de ces appareils sur ce type de chaussée est envisageable. Pour les chaussées hydrauliques et mixtes, l'erreur de justesse est trop importante pour qualifier l'appareil. Néanmoins, l'erreur reste inférieure à 70 % et une interprétation relative des mesures le long d'un itinéraire est envisageable pour détecter des zones dégradées.

Ces conclusions se rapprochent de celles émises dans le chapitre I §I.3.1.6.

D'après ces résultats, on a considéré que les déflectographes d'ancienne génération, D02, D03 et même D04, présentent des erreurs de mesure trop importantes, pour permettre une modélisation des mesures. Pour la suite du travail, il a donc été décidé de conserver uniquement les deux appareils les plus justes, à savoir le déflectographe Flash et le curviamètre.

Pour ces deux appareils, il apparaît néanmoins primordial de chercher à développer une procédure de correction des mesures de ces appareils, pour permettre une meilleure interprétation des bassins de déflexion.

II.3 Proposition d'une procédure de correction des mesures du curviamètre et du déflectographe Flash

Les études expérimentales menées par (Simonin & Riouall, 1997), (Vialletel & Simonin, 1997), (Lepert, et al., 1997) et (Simonin, et al., 2015) et la précédente étude numérique indiquent que le curviamètre et le déflectographe Flash, bien que plus justes que les déflectographes 02, 03 et 04, introduisent des biais de mesure significatifs. Dans ce

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

contexte, il paraît nécessaire de corriger les mesures de déflexion pour des applications telles que le calcul inverse des modules des couches de chaussées. Pour cette raison, il est nécessaire de rechercher des méthodes de correction, qui pourraient éliminer certains biais de mesure, comme notamment l'hypothèse d'une déflexion nulle à une certaine distance de la charge, qui est d'autant moins réaliste que la chaussée est rigide.

Deux approches de correction ont été envisagées :

- La première consiste à définir un modèle théorique de la structure de la chaussée et à l'ajuster à la déflexion mesurée par le deflectographe ou le curviamètre (en prenant en compte le principe de fonctionnement de l'appareil). Ce modèle ajusté pourra ensuite être utilisé pour recalculer la déflexion de référence sous un jumelage standard chargé à 65 kN. Cette méthode nécessite non seulement de prendre en compte le fonctionnement complet de l'appareil, mais aussi de connaître les caractéristiques de la structure de chaussée (nature et épaisseur des couches, modules des matériaux). La mise en œuvre de cette procédure n'est donc pas facile, car elle nécessite de nombreuses données sur la structure de chaussée.
- La deuxième procédure consiste à utiliser une fonction mathématique simple (définie par deux ou trois paramètres) qui décrit la forme du bassin de déflexion sous une roue simple. Le bassin de déflexion de l'appareil complet est obtenu par superposition de l'ensemble des charges, et en prenant en compte le principe de fonctionnement de chaque appareil. En minimisant l'écart entre le bassin simulé et mesuré, les paramètres de la fonction sont optimisés. Ils permettent ensuite de calculer la déflexion de référence sous un jumelage standard, correspondant à une déflexion corrigée, indépendante de l'appareil.

Cette seconde méthode, est plus simple à appliquer car elle ne nécessite pas une connaissance précise des caractéristiques de la structure de chaussée, et c'est celle qui a été sélectionnée pour la mise en place de la procédure de correction.

II.3.1 Choix de la fonction décrivant le bassin de déflexion

La première étape de la mise en place de la procédure de correction consiste à choisir une fonction décrivant la forme du bassin de déflexion. Trois modèles décrivant le bassin de déflexion sont successivement présentés puis évalués.

II.3.1.1 *Modèle de HOGG (Hogg, 1944)*

Ce modèle considère la chaussée comme une plaque mince d'épaisseur h_1 , de module d'Young E_1 et de coefficient de Poisson ν_1 reposant sur un massif élastique semi-infini. La Figure II-12 représente le modèle de Hogg qui assimile le sol à un massif de Boussinesq de module d'Young E_s et de coefficient de Poisson ν_s (Keymanesh, 2001).

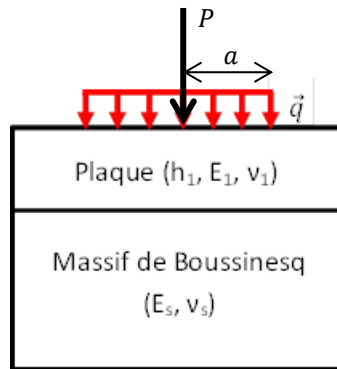


Figure II-12 : Modèle bicouche de Hogg (1944).

L'expression de la déflexion s'écrit sous la forme suivante :

$$W_H(x) = C(x/L_0) \frac{0.1925 * P}{L_0 K} \quad (\text{II-11})$$

Avec $P = \pi q a$ la charge concentrée;

Avec K , la rigidité du sol :

$$K = \frac{2E_s(1 - \nu_s)}{(1 + \nu_s)(3 - 4\nu_s)} \quad (\text{II-12})$$

Avec L_0 la longueur caractéristique définie par :

$$L_0 = \left[\frac{D}{K} \right]^{1/3} \quad (\text{II-13})$$

Avec D la rigidité flexionnelle de la plaque supérieure telle que :

$$D = \frac{E_1 h_1^3}{12(1 - \nu_1^2)} \quad (\text{II-14})$$

Avec $C(x/L_0)$ la fonction caractérisant la forme de la déflexion donnée par :

$$C(x/L_0) = 1 + [0.206701(x/L_0)^2 - 0.000005605(x/L_0)^8] \ln(x/2L_0) - 0.08738(x/L_0)^2 - 0.015621(x/L_0)^4 + 0.0036748(x/L_0)^5 - 0.00043392(x/L_0)^6 + 0.000008447(x/L_0)^8 + \dots \quad (\text{II-15})$$

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

II.3.1.2 Modèles empiriques

Les expressions suivantes posent comme condition l'homogénéité horizontale de la structure de chaussée et l'hypothèse de symétrie de révolution du bassin de déflexion sous une charge unique P_0 .

II.3.1.2.1 Modèle d'Autret (Autret, 1969)

En 1969, Autret propose une expression de la déflexion, basée sur une formule d'approximation du rayon de courbure.

$$W_A(x) = \frac{2Rd^2}{x^2 + 2Rd} \quad (\text{II-16})$$

Avec:

d : Déflexion maximale ;

R : Rayon de courbure au sommet du bassin de déflexion.

II.3.1.2.2 Modèle de Jouve et Martinez (Martinez & Jouve, 1990)

Le développement de la méthode d'Autret par Jouve et Martinez a conduit à l'expression suivante de la déflexion :

$$W_{JM}(x) = \frac{d}{\left[1 + \frac{1}{2n+1} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{2n}\right]} \quad (\text{II-17})$$

Avec:

d : Déflexion maximale

λ : Abscisse du point d'inflexion de la courbe de déflexion

n : Exposant lié à la forme de la courbe de déflexion

II.3.1.3 Evaluation des modèles

Ces trois modèles décrivant les bassins de déflexion ont été évalués en comparant la forme du bassin de déflexion prédite par chaque modèle avec le bassin de déflexion sous une roue isolée (32.5 kN) calculé avec le logiciel ALIZE. Les paramètres de chaque modèle ont été ajustés par une procédure d'optimisation des moindres carrés, sur le bassin calculé avec ALIZE. Cette étude a été conduite pour la structure bitumineuse de référence déjà utilisée précédemment (fiche 2 du catalogue de dimensionnement).

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

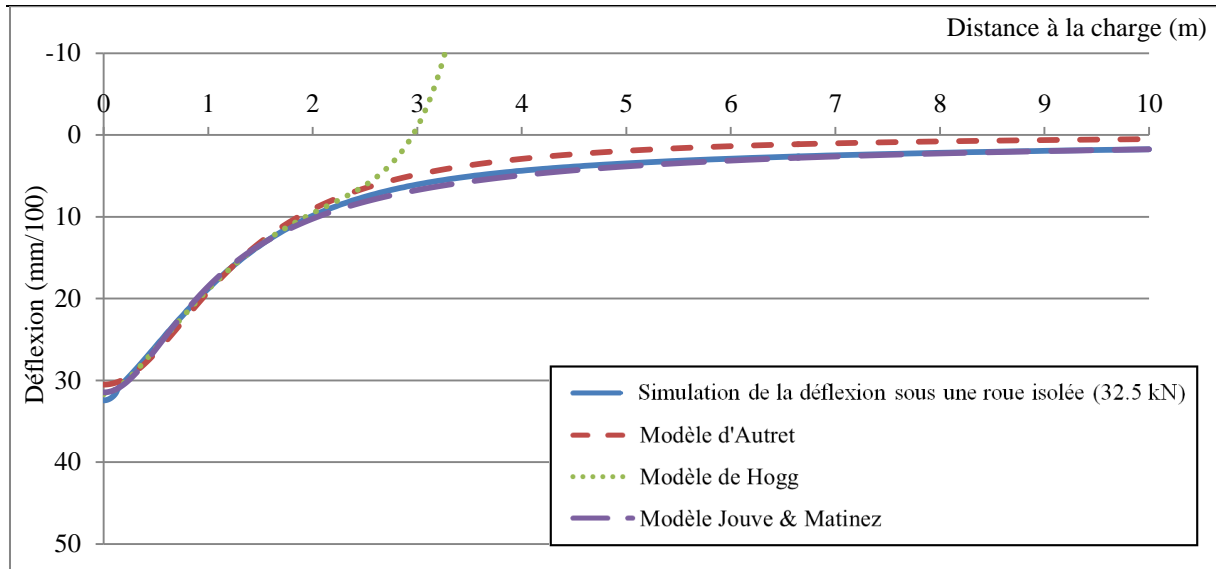


Figure II-13 : Comparaison des trois modèles pour le cas d'une roue isolée - Structure bitumineuse.

La Figure II-13 compare la simulation d'un bassin de déflexion sous une roue simple (32.5 kN) et ceux ajustés avec chaque modèle dans le cas d'une chaussée bitumineuse. Le bassin simulé avec ALIZE sous une roue simple est, à son sommet, moins régulier que les autres. Ceci vient de l'application d'une pression uniformément répartie sur un disque de rayon limité. Ces quatre bassins sont néanmoins tous très semblables à faible distance de la charge (entre 0 et 2 m). Cependant, à partir d'une certaine distance de la charge, les modèles de Hogg et d'Autret ne reproduisent plus correctement le bassin sous une roue simple. En effet, la fonction $C(x/L_0)$, définissant le modèle de Hogg, devient négative lorsque x/L_0 est supérieur à 2.95 dans l'exemple choisi. Ce changement de signe conduit à une déflexion négative. Pour le modèle d'Autret, les paramètres R et d , respectivement le rayon de courbure et la déflexion maximale, caractérisent la forme du bassin de déflexion pour $x=0$. Cependant, aucun autre paramètre ne permet de contrôler la forme du bassin loin de la charge et il est difficile de prédire précisément son allure à ces distances.

Une étude similaire menée sur les quatre autres types de structures de chaussées a donné des résultats équivalents. La seule différence notable est, pour le modèle de Hogg, la valeur plus ou moins importante de x/L_0 pour laquelle la fonction $C(x/L_0)$ devient négative.

En conclusion, les trois modèles donnent de bons résultats à une faible distance de la charge. Cependant, pour des distances supérieures à 2 m, seul le modèle de Jouve et Martinez permet d'estimer convenablement le bassin de déflexion sous une roue simple. Il est également sans a priori sur la structure. Compte tenu de ces résultats, c'est le modèle de Jouve et Martinez (qui sera noté J&M), qui a été sélectionné pour la suite de l'étude et pour la mise en place de la procédure de correction.

II.3.2 Procédure de correction du bassin de déflexion

La Figure II-14 représente l'algorithme développé pour la correction des mesures de bassins de déflexion du Curviamètre et du déflectographe Flash, basé sur le modèle de Jouve et Martinez.

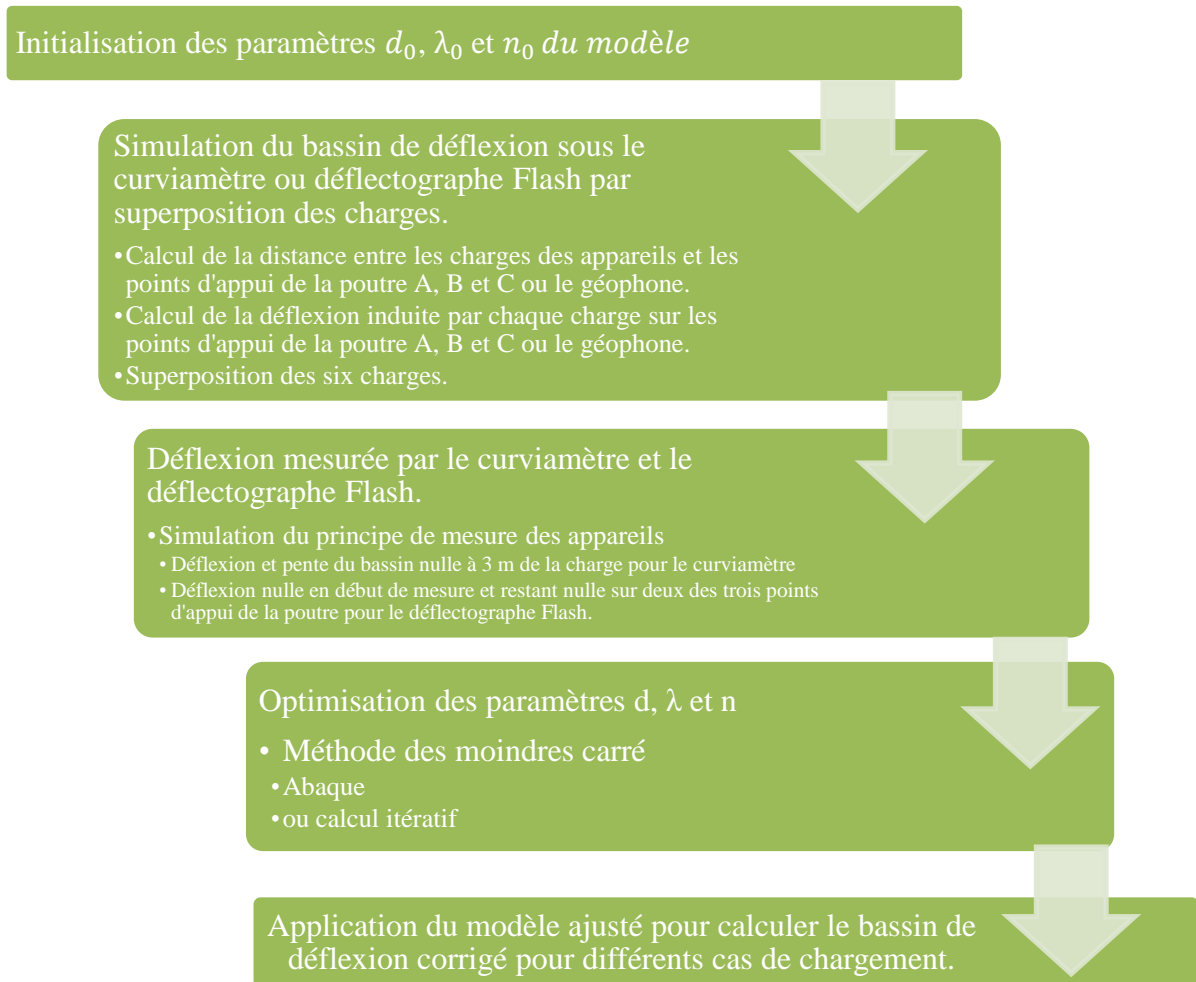


Figure II-14 : Algorithme du processus de correction des mesures de bassins de déflexion en utilisant le modèle de Jouve&Martinez.

Le processus se divise en plusieurs étapes :

1. La première étape de la procédure de correction consiste à initialiser les trois paramètres d_0 , λ_0 et n_0 . Le paramètre d_0 est pris égal à la déflexion maximale mesurée par le Curviamètre ou le déflectographe Flash (mesures simulées avec ALIZE ou réelles des appareils). Les paramètres λ_0 et n_0 sont arbitrairement fixés à 1.
2. La distance entre chaque charge de l'appareil et les points d'application (géophone ou points d'appui de la poutre) est calculée pour déduire la déflexion induite par chaque charge sur le géophone (ou les points d'appui de la poutre A, B et C). Par

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

superposition des six charges, la déflexion absolue sous le camion complet peut être calculée.

3. La détermination de la mesure des appareils nécessite la prise en compte des hypothèses de mesure, soit :
 - La pente du bassin de déflexion et la déflexion sont considérées nulles à 3 m de la charge pour le curviamètre.
 - La déflexion est considérée nulle en début de mesure et les points d'appui de la poutre sont supposés fixes pour le déflectographe Flash.

Le Tableau II-7 et le Tableau II-8 récapitulent les étapes 2 et 3 du processus de correction pour le déflectographe Flash et le curviamètre.

Tableau II-7 : Méthode de construction du bassin simulé J&M pour le déflectographe Flash.

| | Charge n (1 à 6) | | Ensemble des 6 charges en un point j | Déflexion relevée par l'appareil |
|----------|--|--|--|--|
| Abscisse | Distance (m) de la charge n au point d'application j | Déflexion induite par la charge n sur le point d'application j | Déflexion cumulée au point j (A, B ou C) | La fonction f dépend de la géométrie de l'appareil |
| X_1 | $e_{jn}(X_1)$ $= \sqrt{(x \pm X_1)^2 + (y)^2}$ | $W_{jnRI}(e_{jn}(X_1))$ | $W_j(X_1)$ $= \sum_{n=1}^6 W_{jnRI}(e_{jn}(X_1))$ | W $= f(W_j(X_1); W_j(X_1))$ |
| X_i | $e_{jn}(X_i)$ $= \sqrt{(x \pm X_i)^2 + (y)^2}$ | $W_{jnRI}(e_{jn}(X_i))$ | $W_j(X_i)$ $= \sum_{n=1}^6 W_{jnRI}(e_{jn}(X_i))$ | $W = f(W_j(X_i); W_j(X_1))$ |
| X_f | $e_{jn}(X_f)$ $= \sqrt{(x \pm X_f)^2 + (y)^2}$ | $W_{jnRI}(e_{jn}(X_f))$ | $W_j(X_f)$ $= \sum_{n=1}^6 W_{jnRI}(e_{jn}(X_f))$ | W $= f(W_j(X_f); W_j(X_1))$ |

Avec:

$e_{jn}(x)$: Distance de la charge aux points d'application;

RI : Roue isolée;

j : Trois point d'applications A, B et C;

$i = 1$ (avec X_1 première abscisse de mesure) à f (avec X_f dernière abscisse de mesure);

n : Charge de 1 à 6.

La fonction f est déduite du fonctionnement du déflectographe Flash en utilisant l'équation (II-8).

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

Tableau II-8 : Méthode de construction du bassin simulé J&M pour le Curviamètre.

| Abscisse | Charge 1 à 6 | | Ensemble des charges | Déflexion relevée par l'appareil | |
|----------|--|---|---|----------------------------------|---|
| | Distance (m) de la charge n au géophone | Déflexion induite par la charge n sur le géophone | | Hypothèse de dérivée nulle à 3 m | Hypothèse de déflexion nulle à 3 m |
| X_1 | $e_{gn}(X_1) = \sqrt{(x \pm X_1)^2 + (y)^2}$ | $W_{gnRI}(e_{gn}(X_1))$ | $W_g(X_1) = \sum_{n=1}^6 W_{gnRI}(e_{gn}(X_1))$ | $W_g'(X_1) - W_g'(X_f)$ | $W(X_1) = \int_{X_1}^{X_2} [W_g'(X_1) - W_g'(X_f)]$ |
| X_i | $e_{gn}(X_i) = \sqrt{(x \pm X_i)^2 + (y)^2}$ | $W_{gnRI}(e_{gn}(X_i))$ | $W_g(X_i) = \sum_{n=1}^6 W_{gnRI}(e_{gn}(X_i))$ | $W_g'(X_i) - W_g'(X_f)$ | $W(X_i) = \int_{X_i}^{X_{i+1}} [W_g'(X_i) - W_g'(X_f)]$ |
| X_f | $e_{gn}(X_f) = \sqrt{(x \pm X_f)^2 + (y)^2}$ | $W_{gnRI}(e_{gn}(X_f))$ | $W_g(X_f) = \sum_{n=1}^6 W_{gnRI}(e_{gn}(X_f))$ | $W_g'(X_f) - W_g'(X_f)$ | $W(X_f) = 0$ |

Avec:

$e_{gn}(x)$: Distance de la charge au point d'application;

RI : Roue isolée;

g le géophone;

$i = 1$ (avec X_1 première abscisse de mesure) à f (avec X_f dernière abscisse de mesure);

n : Charge de 1 à 6.

- Les paramètres d_0 , λ_0 et n_0 sont optimisés en utilisant la méthode des moindres carrés pour minimiser l'écart entre le bassin mesuré et celui ajusté par la procédure de correction. S est définie comme la somme des carrés des écarts entre le bassin de déflexion ajusté par la procédure de correction $W(X)$ et le bassin de déflexion mesuré $W(X)_{mes}$. S est calculée sur l'ensemble des points de la mesure. En 1993, Jouve et Martinez (Martinez & Jouve, 1993) ont mené une étude déterminant, pour le deflectographe, le domaine de définition du paramètre n . Il doit être borné entre 0.5 et 2. Le paramètre λ , représentant le point d'inflexion, doit se situer hors de la zone de charge (Cf chapitre I, § I.3.3.1.3). Ses limites se situent entre 0.2 m et 2.5 m. Ces recommandations ont été suivies au cours de la procédure de correction.

$$S = \sum_{i=1}^f [W(X_i) - W(X_i)_{mes}]^2 \quad (\text{II-18})$$

Cette optimisation est considérée validée si elle satisfait l'équation (II-19).

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

$$I = \frac{S}{S_{mes}} \leq 5\% \quad (\text{II-19})$$

Avec S_{mes} la somme des carrés des valeurs de déflexion aux différents points de mesure du bassin de déflexion:

$$S_{mes} = \sum_{i=1}^f [W(X_i)_{mes}]^2 \quad (\text{II-20})$$

Deux processus ont été implémentés pour optimiser les paramètres d , λ et n .

Le premier utilise un processus itératif pour déterminer la meilleure combinaison de d_f , λ_f et n_f . Cette procédure est réalisée en utilisant l'outil « Solver » du logiciel Microsoft Excel. Cet outil permet de trouver une valeur optimale pour une formule située dans une seule cellule, appelée cellule objectif, en fonction de contraintes ou de limites appliquées aux valeurs d'autres cellules de la formule dans une feuille de calcul. Le Solveur utilise un groupe de cellules, appelées variables de décision ou simplement cellules variables, qui interviennent dans le calcul des formules des cellules objectif et de contraintes. Le Solveur affine les valeurs des cellules variables de décision pour satisfaire aux limites appliquées aux cellules de contraintes et produire le résultat souhaité pour la cellule objectif.

Il est possible de calculer un objectif à atteindre en fonction de plusieurs cellules variables. Le but est de déterminer la valeur minimale de I , soumise à des contraintes sur λ et n . Le solveur ajuste les valeurs de d , λ et n pour satisfaire les contraintes et fournir le meilleur résultat. Cette méthode est privilégiée pour des mesures ponctuelles.

Une seconde approche utilise un abaque comportant toutes les combinaisons possibles de d , λ et n , compte tenu des limites imposées précédemment pour ces valeurs. Les variations des paramètres sont présentées dans le Tableau II-9. Pour les 34500 combinaisons, l'indice I est calculé. La combinaison de d_f , λ_f et n_f donnant la plus faible valeur de I est conservée. Cette méthode plus rapide que le calcul itératif est utilisée pour des mesures sur itinéraire. Les deux méthodes ont des précisions inférieures à 1 mm/100 sur la déflexion maximale. La mise en place et l'utilisation de ces abaques sont décrites en Annexe B et Annexe C.

Tableau II-9 : Intervalles de variation des paramètres d , λ et n pour la construction des abaques.

| Paramètres | Valeur minimale | Valeur maximale | Incrément |
|------------|-----------------|-----------------|-----------|
| d | 1 mm/100 | 100 mm/100 | 1 mm/100 |
| λ | 0.2 m | 2.5 m | 0.1 m |
| n | 0.5 | 2 | 0.1 |

5. Ainsi, la combinaison finale d_f , λ_f et n_f est définie. En réintroduisant ces paramètres dans une configuration de roue simple ou de jumelage de référence comme présentée dans le Tableau II-10, un bassin de déflexion sous ces différents cas de chargement peut-être déduit. Ce bassin est donc indépendant de l'appareil. Dans la suite du travail,

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

le bassin de déflexion sous jumelage de référence est préféré à celui sous roue simple. En effet, ce bassin de déflexion est pris comme référence pour le dimensionnement ou le renforcement des chaussées.

Tableau II-10: Méthode de construction du bassin de déflexion sous jumelage standard.

| | Charge n (1 à 2) | | Déflexion corrigée sous jumelage standard |
|----------|--|-----------------------|---|
| Abscisse | Distance (m) de la charge n au point d'application j | Déflexion roue isolée | Déflexion cumulée au point j |
| X_1 | $e_n(X_1) = \sqrt{(x \pm X_1)^2 + (y)^2}$ | $W_{nRI}(e_n(X_1))$ | $W(X_1) = \sum_{n=1}^2 W_{nRI}(e_n(X_1))$ |
| X_i | $e_n(X_i) = \sqrt{(x \pm X_i)^2 + (y)^2}$ | $W_{nRI}(e_n(X_i))$ | $W(X_i) = \sum_{n=1}^2 W_{nRI}(e_n(X_i))$ |
| X_f | $e_n(X_f) = \sqrt{(x \pm X_f)^2 + (y)^2}$ | $W_{nRI}(e_n(X_f))$ | $W(X_f) = \sum_{n=1}^2 W_{nRI}(e_n(X_f))$ |

Avec:

$e(x)$: Distance de la charge aux points d'application;

RI : Roue isolée;

$i = 1$ (avec X_1 première abscisse de mesure) à f (avec X_f dernière abscisse de mesure);

n : Charge de 1 à 2.

II.3.2.1 Application de la méthode de correction des déflexions à des cas théoriques

Afin d'évaluer l'efficacité de la procédure de correction, des comparaisons ont été réalisées entre les bassins de déflexion théoriques calculés avec ALIZE et les bassins corrigés. Une évaluation des modules déterminés par calcul inverse à partir des bassins de déflexion corrigés a également été réalisée.

II.3.2.1.1 Validation des bassins de déflexions corrigés

Pour évaluer la méthode de correction, cinq bassins de déflexions ont été comparés :

- Le bassin de déflexion « absolu » sous le camion complet, calculé avec ALIZE
- La simulation du bassin de déflexion mesuré par les appareils, en tenant compte des charges multiples et du principe de fonctionnement de chaque appareil.
- Le bassin de déflexion ajusté par la procédure de correction sur la mesure des appareils. Cette étape permet l'obtention des paramètres optimisés d_f , λ_f et n_f .
- Le bassin de déflexion corrigé sous jumelage standard déterminé à partir des mesures des appareils et déduit des paramètres optimisés d_f , λ_f et n_f appliqués à un jumelage de référence.

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

- Le bassin de référence sous jumelage standard (65 kN), calculé avec ALIZE

La Figure II-15 présente les résultats obtenus pour une chaussée bitumineuse reposant sur une plateforme semi-infinie PF2 (module 50 MPa). La comparaison des cinq bassins montre des tendances similaires pour les deux appareils (curviamètre et déflectographe Flash) :

- La déflexion mesurée par les appareils est bien plus faible que la déflexion de référence, sous jumelage standard, calculée avec ALIZE. Ceci confirme l'erreur de mesure très significative introduite par les appareils. De plus, la forme des bassins de déflexion mesurés n'est pas très réaliste.
- Au contraire, le bassin de déflexion « absolu », sous le camion complet, donne des déflexions supérieures à la déflexion de référence, sous jumelage standard.
- Le bassin de déflexion ajusté, avec la fonction de Jouve et Martinez, sur la mesure des appareils reproduit très bien le bassin de déflexion mesuré. Pour les deux appareils, le calcul de l'indice I donne des valeurs inférieures 0.7 %. Cet ajustement permet de caler les paramètres du modèle de Jouve et Martinez.
- La procédure de correction donne des résultats satisfaisants pour les deux appareils :
 - Les bassins de déflexion corrigés sont beaucoup plus proches du bassin de déflexion de référence sous jumelage standard (65 kN) que ceux mesurés directement par les appareils, notamment pour le curviamètre.
 - Les bassins corrigés sont symétriques par rapport à l'axe des ordonnées en $x=0$ et leur forme est similaire à celle du bassin de référence.
 - La déflexion corrigée n'est plus nulle à 1.5 m ou 3 m de la charge, mais à plus de 8 m, ce qui est plus réaliste.

Néanmoins, on peut noter qu'il subsiste un écart entre les déflexions corrigées, et le bassin de référence sous le jumelage standard. Cet écart s'explique probablement par la longueur de mesure limitée des appareils (3 m pour le curviamètre et seulement 1.5 m pour le déflectographe Flash). Il y a donc une perte d'information à partir d'une certaine distance de la charge (1.5 m ou 3 m). La partie du bassin de déflexion située loin de la charge ne peut donc être reproduite avec précision.

Les mêmes comparaisons ont été réalisées pour l'ensemble des structures choisies au début de ce chapitre. Ces comparaisons ont montré que la procédure de correction est efficace dans tous les cas et que plus la chaussée est souple, moins l'écart entre le bassin de référence sous jumelage standard et le bassin corrigé est important.

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

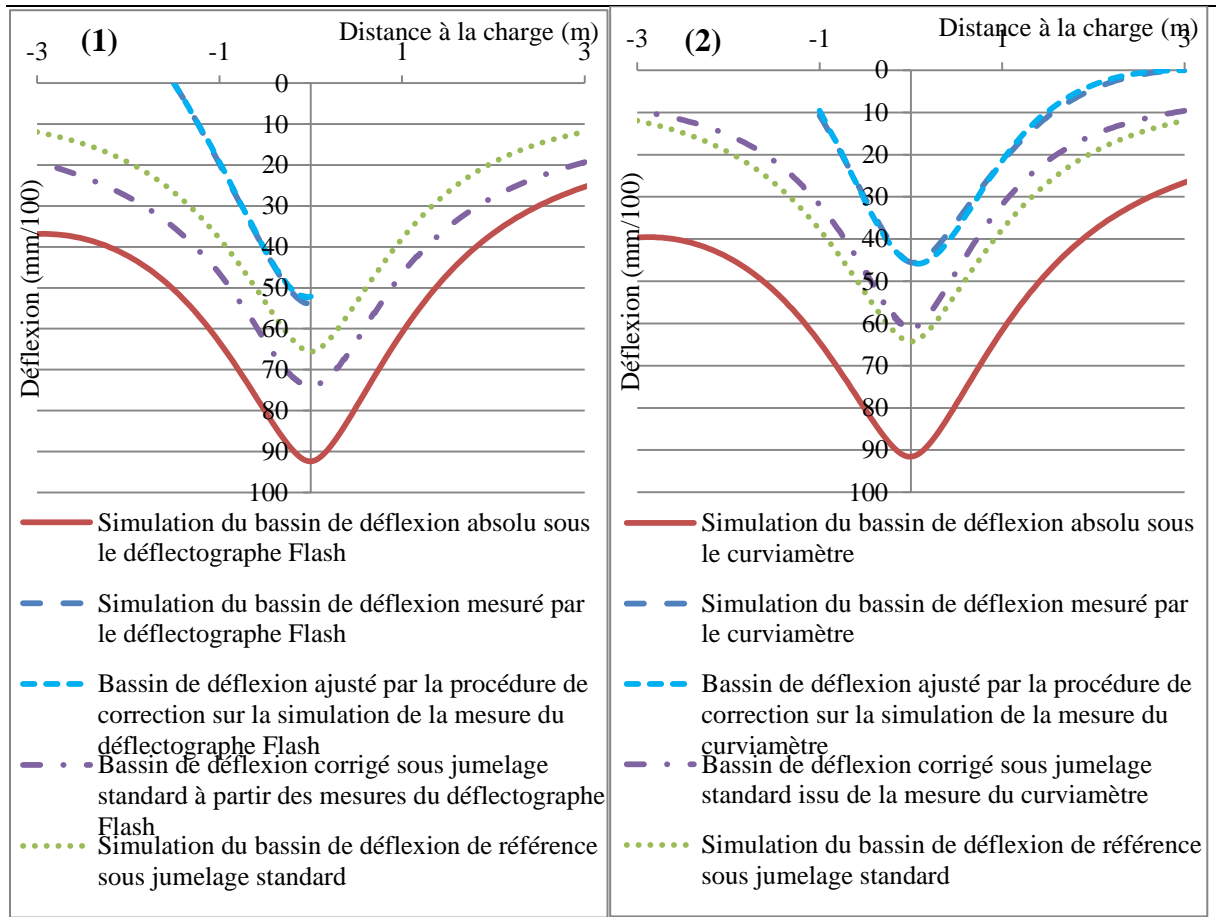


Figure II-15 : Comparaison entre les bassins de déflexion mesurés par les appareils, avec et sans correction sous un jumelage de référence - (1) Défectographe Flash – (2) Curviamètre - Structure bitumineuse.

Le Tableau II-11 met en évidence le gain en justesse de déflexion maximale entre la mesure avec et sans correction, par rapport à la mesure de déflexion de référence sous jumelage standard. Pour l'ensemble des structures étudiées de ce chapitre et les deux appareils, les mesures directes des appareils présentent un écart d'au moins 18 % avec la référence, pouvant aller jusqu'à 78.5 % sur chaussée mixte avec le curviamètre. Pour les déflexions maximales après correction, les écarts sont nettement plus faibles, puisqu'ils varient entre 0.3 % pour une chaussée souple à moins de 20 % pour les chaussées rigides pour le curviamètre. Pour ces dernières, même si l'écart relatif semble important, l'écart absolu sur la déflexion maximale est de 5.4 mm/100. Cette valeur reste faible vis-à-vis des performances métrologiques de cet appareil. Pour le défectographe Flash, les écarts varient entre 6.1 % et 42.2 %. Les écarts sont acceptables pour les chaussées bitumineuses, mais deviennent élevés pour les chaussées rigides. Cela confirme la meilleure précision de la mesure du curviamètre.

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

Tableau II-11 : Gain de justesse en déflexion maximale après correction pour le curviamètre et le déflectographe Flash.

| Type de chaussée | Dmax de référence (mm/100) (Fréquence du Curviamètre) | Curviamètre | | Dmax de référence (mm/100) (Fréquence du D. Flash) | Déflectographe Flash | |
|---------------------|--|-----------------------|------------------------|---|-----------------------|------------------------|
| | | Dmax mesurée (mm/100) | Dmax corrigée (mm/100) | | Dmax mesurée (mm/100) | Dmax corrigée (mm/100) |
| Bitumineuse | 64.3 | 45.5 (29.2 %) | 60.3 (6.2 %) | 65.6 | 53.8 (18 %) | 73.8 (12.5 %) |
| Bitumineuse épaisse | 43.1 | 19.8 (54.1 %) | 41.6 (3.4 %) | 44 | 26.8 (39.1 %) | 41.3 (6.1 %) |
| Souple | 68.5 | 49.3 (28 %) | 68.7 (0.3 %) | 68.8 | 54.9 (20.2 %) | 63.9 (7.1 %) |
| Mixte | 27.4 | 5.9 (78.5 %) | 22 (19.7 %) | 27.7 | 9.2 (66.8 %) | 16 (42.2 %) |
| Hydraulique | 36 | 11.9 (67 %) | 32.4 (10 %) | 36.1 | 17.4 (51.8 %) | 21 (41.8 %) |

II.3.2.1.2 Validation de modules obtenus par calcul inverse

Une seconde validation de la procédure de correction a porté sur les modules des couches de chaussée obtenus par calcul inverse, avant et après correction. Les calculs inverses ont été réalisés à l'aide du module « rétro-calcul » du logiciel ALIZE. Le calcul inverse a été effectué à partir des bassins de déflexions « mesurés » et des bassins corrigés, obtenus sous une charge de jumelage standard. La résolution du calcul inverse se fait en prenant en compte l'algorithme de Newton-Raphson. Le calcul inverse est réalisé en sélectionnant 18 points de déflexion entre 0 m et 3 m de la charge. Le premier mètre du bassin est représenté par 11 points de déflexion et les deux derniers mètres par 7 points de déflexion.

Afin de faciliter la convergence du calcul inverse, des limites ont dû être fixées pour les modules de l'une des couches de chaque structure. Dans l'exemple de la chaussée bitumineuse, la variation du module de la seconde couche bitumineuse a été limitée entre 5000 MPa et 15000 MPa, valeurs qui semblaient réalistes. Ces modules, dont les valeurs ont été bornées, sont marqués d'un astérisque dans le Tableau II-12. Ce tableau indique les valeurs de module obtenues par calcul inverse pour la structure bitumineuse et l'erreur relative (entre parenthèses). Le module d'Young d'origine et ceux déterminés par calcul inverse sont comparés. Ce tableau montre que le calcul inverse basé sur les mesures de déflexions non corrigées des appareils conduit à des modules non réalistes (confirmant ce qui avait été noté dans les recherches bibliographiques). Dans la majorité des cas, pour les deux appareils, l'erreur relative est supérieure à 30 % et peut même atteindre 89 %. Le module du sol est particulièrement surestimé, en raison du principe de mesure des appareils. Avec de tels écarts, il est impossible d'évaluer correctement la structure de chaussée. Les modules déterminés par calcul inverse basés sur les mesures corrigées sont plus cohérents. Les erreurs sur le module déterminé sont souvent inférieures à 25 %. Le module du sol est bien estimé avec une différence de maximum 11 MPa par rapport à la valeur d'origine. Il convient de noter qu'une erreur de 25 % sur un module rétro-calculé reste acceptable, car la sensibilité du bassin de déflexion à la variation de module d'une couche de chaussée peut être relativement

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

faible. La différence correspondante entre le bassin de déflexion mesuré et celui obtenu avec le module rétro-calculé est inférieur à 5 %.

Tableau II-12 : Ecart relatif entre le module d'Young original et les modules déterminés par calcul inverse avec et sans correction – Structure bitumineuse.

| Module d'Young d'origine (MPa) | Déflectographe Flash | | Module d'Young d'origine (MPa) | Curviamètre | |
|--------------------------------|----------------------|------------------|--------------------------------|----------------|------------------|
| | Mesures (MPa) | Correction (MPa) | | Mesures (MPa) | Correction (MPa) |
| 5372 | 6102 (14%) | 7217 (34%) | 5742 | 4787 (17%) | 4370 (24%) |
| 6907 | 3251 (53%) | 8055 (17%) | 7383 | 822 (89%) | 6524 (12%) |
| 6907* | 5250 (24%) | 5814 (16) | 7383* | 11300 (53%) | 5030 (32%) |
| 50 | 76 (52%) | 39 (22%) | 50 | 93 (86%) | 61 (22%) |

La Figure II-16 montre le bassin de déflexion obtenu avec les modules rétro-calculés, à partir de la mesure directe du curviamètre (sans correction), pour la chaussée bitumineuse. Le bassin issu du rétro-calcul présente un écart important avec la mesure de l'appareil (en orange). Malgré les limites imposées au module de la couche de fondation, les deux courbes divergent de manière significative.

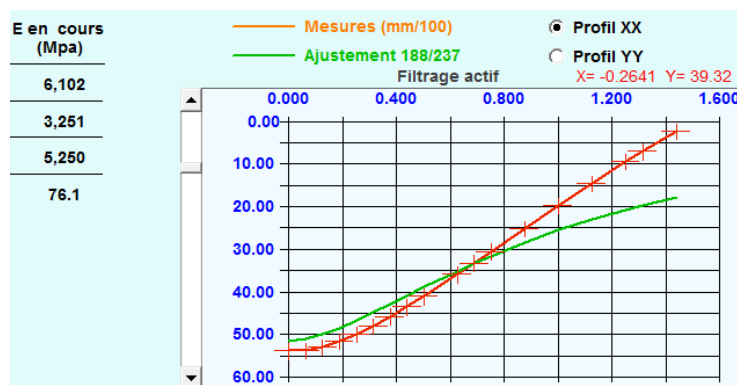


Figure II-16 : Capture écran ALIZE - module « rétro-calcul » - comparaison du bassin de déflexion issu du rétrocalcul (sans correction) avec le bassin mesuré par le curviamètre, structure bitumineuse.

La Figure II-17 montre le bassin de déflexion obtenu à partir des modules rétrocalculés après correction, pour le curviamètre. Le bassin issu du rétrocalcul est ici beaucoup plus proche du bassin mesuré. Cette figure montre clairement l'apport de la correction sur le calcul inverse. Les modules déterminés sont nettement plus proches des modules originaux, et le bassin de déflexion recalculé se confond pratiquement avec la mesure.

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

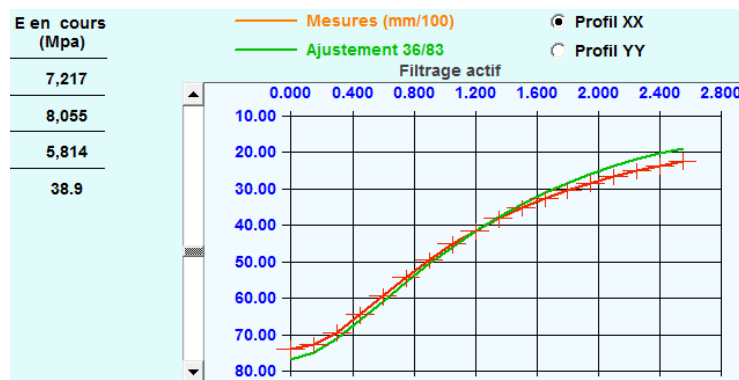


Figure II-17 : Capture écran ALIZE - module « rétro-calcul » - Comparaison du bassin de déflexion issu du rétrocalcul (après correction) avec le bassin mesuré par le curviamètre - Structure bitumineuse.

Le Tableau II-13 présente les écarts maximums entre le module d'Young d'origine et le module rétro-calculés issu ou non de la procédure de correction pour le curviamètre et le déflectographe Flash sur les cinq structures de l'étude. Les écarts maximums avec les modules rétro-calculés de la mesure directe sont généralement obtenus pour le module de la plateforme. Les écarts entre les modules originaux et ceux rétro-calculés sont considérablement réduits après correction, en particulier pour les chaussées souple et bitumineuses. En effet, les écarts maximums passent de plus de 50 % à environ 30 % et ce pour les deux appareils. Cependant, pour les chaussées mixte et hydraulique, les écarts sont toujours importants pour les deux appareils avec des écarts maximums supérieurs à 40 %.

Tableau II-13 : Ecart maximum entre le module d'Young d'origine et le module rétro-calculés pour le curviamètre et le déflectographe Flash sur les cinq structures de l'étude.

| | | Bitumineuse épaisse | Bitumineuse | Souple | Mixte | Hydraulique |
|----------------------|------------|---------------------|-------------|--------|-------|-------------|
| Curviamètre | Mesures | 246% | 89% | 123% | 65% | 149% |
| | Correction | 29% | 27% | 28% | 49% | 95% |
| Déflectographe Flash | Mesures | 176% | 53% | 160% | 142% | 220% |
| | Correction | 8% | 34% | 31% | 42% | 82% |

II.4 Conclusion

Les appareils d'auscultation non destructifs tels que le curviamètre et le déflectographe sont largement utilisés en France pour l'auscultation des chaussées. Des comparaisons avec des dispositifs de référence (capteur de déplacement ancré placé dans la chaussée, en particulier) ont montré que ces appareils dits à grand rendement tendent à sous-estimer la déflexion de référence. Les principes de fonctionnement de ces appareils ont été analysés, et on a montré que leur mode de fonctionnement, et certaines hypothèses utilisées pour le traitement des mesures conduisent à des biais de mesure. Le calcul inverse des modules des couches à partir de ces mesures donne des résultats peu satisfaisants, dus à une sous-estimation de la déflexion maximale et une modification de la forme du bassin. Par

Chapitre II : Etude du fonctionnement des appareils et mise en place d'une procédure de correction des mesures de déflexion

conséquent, les mesures de déflexion de ces appareils ne peuvent être pleinement exploitées et sont généralement utilisés uniquement comme indicateurs « qualitatifs » de l'état structurel de la chaussée

Pour quantifier les erreurs de mesure des différents appareils (déflectographes D02, D03, D04 et Flash, et curviamètre), des comparaisons ont été réalisées, pour tous ces appareils, et pour différents cas de structures de chaussée, entre la déflexion théorique de la chaussée sous un essieu de référence (essieu à roues jumelées chargé à 130 kN), calculée avec ALIZE, et la déflexion « mesurée » par chaque appareil (également simulée avec ALIZE). Ces comparaisons ont montré que les déflectographes d'ancienne génération, D02, D03 et D04 présentent des erreurs de mesure très grandes, généralement supérieures à 60 % (sauf sur chaussées souples). Ces erreurs ont été jugées trop importantes, et ces appareils n'ont pas été retenus pour la suite du travail. Seuls le curviamètre et le déflectographe Flash ont été retenus pour développer une procédure de correction permettant d'améliorer leur précision de mesure. Cette procédure est basée sur l'utilisation d'une fonction simple décrivant la forme du bassin de déflexion, le modèle de Jouve et Martinez, qui est sans a priori sur la structure.

Avec cette correction, un bassin de déflexion indépendant de l'appareil correspondant à une roue isolée (utile pour le calcul inverse ou pour le calcul d'indicateurs) ou à un jumelage de référence peut être défini.

Des comparaisons avec des bassins de déflexion théoriques, calculés avec le logiciel ALIZE, ont montré que la procédure de correction réduit considérablement les erreurs de mesure, pour les deux appareils :

- Après correction, le déflectographe Flash et le curviamètre donnent des résultats satisfaisants pour les chaussées souples et bitumineuses épaisses avec un écart maximal entre déflexion corrigée et de référence inférieur à 12,5 %. Pour ces chaussées, ces deux appareils peuvent permettre de réaliser du calcul inverse.
- Pour les chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques et mixtes, la mesure corrigée du curviamètre présente un écart maximal avec la mesure de référence inférieur à 20 % (pour les exemples traités). Cet écart est compatible avec la réalisation de calcul inverse.
- Pour le déflectographe Flash, pour ces chaussées, l'écart maximal peut atteindre 40 %, ce qui ne permet plus d'envisager un calcul inverse dans les bonnes conditions.

Finalement, on a montré que les bassins de déflexion corrigés peuvent être utilisés pour le calcul inverse et donnent des modules de couches assez proches des valeurs réelles (erreur relative généralement inférieure à 30 %).

Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives, pour une meilleure exploitation des mesures du déflectographe et du curviamètre, pour des applications telles que l'évaluation de la durée de vie résiduelle de chaussée, ou le renforcement de chaussée.

Dans la suite de la thèse, la procédure de correction sera testée sur mesures réelles provenant de plusieurs sites dont les caractéristiques de la chaussée sont connues.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

| | | |
|------------|---|------------|
| III | Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion | 127 |
| III.1 | Introduction | 128 |
| III.2 | Calculs par éléments finis 3D pour la simulation des déflexions | 129 |
| III.2.1 | Définition des structures de chaussée | 129 |
| III.2.2 | Caractéristique du maillage | 129 |
| III.2.3 | Validation du modèle CESAR | 130 |
| III.2.4 | Modélisation des interfaces glissantes | 131 |
| III.2.5 | Simulation de l'avancement des appareils | 134 |
| III.3 | Etude de l'influence des défauts sur les indicateurs classiques de déflexion | 136 |
| III.3.1 | Détermination des valeurs de référence des indicateurs classiques de la mesure de déflexion | 136 |
| III.3.2 | Sensibilité des indicateurs à une interface glissante localisée | 138 |
| III.3.3 | Sensibilité des indicateurs à d'autres types de défauts | 144 |
| III.3.4 | Conclusion de la première partie | 146 |
| III.4 | Création d'indicateurs optimisés à grand rendement spécifiques d'un type de défaut donné | 147 |
| III.4.1 | Mise en place d'indicateurs optimisés | 147 |
| III.4.2 | Etude du comportement des indicateurs sur des bassins de déflexion théorique | 159 |
| III.4.3 | Conclusion de la partie 2 | 174 |
| III.5 | Conclusion générale du chapitre | 175 |

III.1 Introduction

Ce chapitre vise à développer une méthode de détection de l'endommagement à partir de la mesure du bassin de déflexion par un curviamètre ou un déflectographe Flash. L'objectif de ce chapitre est de déterminer l'endommagement de la chaussée par l'intermédiaire d'indicateurs issus des mesures des appareils. Plusieurs configurations de défauts sont envisagées (présence de décollement localisé ou généralisé, variation de modules de couches de chaussées généralisée ou localisée). L'approche utilisée pour la mise au point de ces indicateurs est basée sur des modélisations 3D par éléments finis avec le logiciel CESAR-LCPC (CESAR, 2016), de la réponse de la chaussée comportant des défauts, afin de définir l'influence de ces défauts sur les bassins de déflexion, et de développer des indicateurs permettant de les identifier.

Le premier travail a consisté à construire, avec CESAR-LCPC, un modèle éléments finis de chaussée pouvant présenter des défauts, qui permet la simulation de la mesure du bassin de déflexion des appareils. La chaussée a été modélisée comme une structure tridimensionnelle. Le comportement des matériaux de chaussée a été supposé élastique linéaire. Le modèle s'étend sur une distance de 30 m de long, afin de permettre de simuler le chargement du véhicule de mesure complet. Le maillage éléments finis a été défini de façon à pouvoir simuler des mesures sur la structure avec un pas de 0.1 m. A partir de ce modèle, les bassins absolus sous camion complet ont été calculés tous les 0.1 m sur toute la longueur de cette section. A partir de ces bassins, la simulation des bassins mesurés par les appareils a été réalisée en appliquant le principe de mesure correspondant à l'appareil de mesure choisi (curviamètre ou déflectographe Flash), selon l'approche définie dans le chapitre II.

Après avoir défini le modèle de calcul, on a étudié la sensibilité des indicateurs classiques issus de la mesure de déflexion à un endommagement localisé (défaut d'interface). Cette étude a porté à la fois sur les mesures du curviamètre et sur celles du déflectographe Flash. Les variations des indicateurs, déflexion maximale, rayon de courbure et valeur maximale de la pente, déduits du bassin de déflexion simulé ont d'abord été étudiées, en comparant les valeurs obtenues sur une structure sans dommage, et une structure endommagée. La méthode de correction des bassins de déflexion a ensuite été appliquée au bassin simulé pour en déduire un bassin sous un chargement de référence. Ces bassins corrigés ont été utilisés pour calculer des indicateurs corrigés de déflexion maximale, rayon de courbure et pente, mais aussi de nouveaux indicateurs (BLI, MLI et LLI), développés pour le FWD. La comparaison entre les résultats obtenus pour ces indicateurs entre structure saine et structure endommagée a également été conduite.

Cette étude portant sur les indicateurs permettant de détecter des défauts a été menée sur plusieurs cas :

- un décollement d'interface, d'abord localisé, puis généralisé, c'est-à-dire affectant toute la longueur de la section de chaussée.
- une variation de module d'une couche de chaussée, soit locale, soit généralisée.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Seule une synthèse des résultats obtenus est présentée dans ce chapitre. Le détail de cette étude est donné en Annexe D.

La dernière partie de ce chapitre porte sur la mise en place d'une méthode de construction de nouveaux indicateurs optimisés, plus sensibles à la présence d'un type de défaut donné. Ces indicateurs sont définis par une fonction de pondération qui maximise leur sensibilité à un défaut structurel comme une variation de module ou un défaut de collage d'interface. Par la suite, la méthode a été appliquée au cas d'une interface endommagée, puis à un cas de variations de module d'une couche de la chaussée.

III.2 Calculs par éléments finis 3D pour la simulation des déflexions

Ce paragraphe est consacré à la modélisation 3D de différents cas de structures de chaussées par éléments finis à l'aide du logiciel CESAR-LCPC, en vue d'étudier l'influence de la présence de défauts sur le bassin de déflexion de ces chaussées. A l'aide des simulations numériques, les mesures du curviamètre et du deflectographe Flash sont calculées, tant pour une structure homogène qu'en présence de certains défauts. Les modélisations sont réalisées en supposant un comportement élastique linéaire de la chaussée.

III.2.1 Définition des structures de chaussée

L'étude porte sur trois structures de chaussées (souple, bitumineuse et mixte) avec des niveaux de déflexion maximale significativement différents. Les épaisseurs et modules des différentes couches des 3 structures sont présentés dans le Tableau III-1. L'épaisseur de la plateforme support est égale à 6 m et toutes les structures reposent sur un substratum rigide semi-infini. Les modules sont donnés à 15 °C et 10 Hz.

Tableau III-1 : Structures de chaussée étudiées.

| Chaussée souple | | | Chaussée bitumineuse | | | Chaussée mixte | | |
|-----------------|---------------|--------------|----------------------|---------------|--------------|----------------|---------------|--------------|
| Matériau | Epaisseur (m) | Module (MPa) | Matériau | Epaisseur (m) | Module (MPa) | Matériau | Epaisseur (m) | Module (MPa) |
| BBSG | 0.06 | 7000 | BBSG | 0.06 | 7000 | BBSG | 0.08 | 7000 |
| GB3 | 0.1 | 9000 | GB3 | 0.08 | 9000 | GB3 | 0.07 | 9000 |
| GNT | 0.1 | 360 | GB3 | 0.08 | 9000 | GB3 | 0.08 | 9000 |
| GNT | 0.25 | 150 | Sol | 6 | 50 | GC | 0.23 | 23000 |
| Sol | 6 | 50 | Substratum | Infinie | 55000 | Sol | 6 | 50 |
| Substratum | Infinie | 55000 | | | | Substratum | Infinie | 55000 |

III.2.2 Caractéristique du maillage

Pour réduire la taille du maillage, on a pris en compte la symétrie du problème, tant pour les structures de chaussées que pour les charges.

Les dimensions des deux appareils (curviamètre et deflectographe) ont été supposées identiques. Les charges appliquées par les roues des appareils ont été représentées par des

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

carrés de 0.2 m de côté, chargés par une pression verticale uniforme. La distance entre l'essieu arrière à roues jumelées et l'essieu avant a été prise égale à 4.8 m. Les centres des roues avant et les centres du jumelage arrière ont été positionnés à 1.1 m de l'axe de symétrie.

La largeur et la longueur du modèle ont été ajustées pour la structure mixte qui conduit au bassin de déflexion le plus étendu. Pour cette structure, la déflexion est négligeable à une distance de 8.2 m (inférieure à 0.001 mm/100). La largeur du maillage a donc été prise égale à 9 m. Pour prendre en compte, la possibilité de simuler des mesures avant et après la présence d'un défaut localisé au centre du modèle, la longueur du modèle a été choisie égale à 30 m. La hauteur du maillage dépend directement de celle de la chaussée. Le Tableau III-2 présente les dimensions en mètre et le nombre d'éléments des maillages considérés pour les différentes structures. Les conditions aux limites imposent des déplacements nuls suivant x sur les limites latérales en x, des déplacements nuls suivant y sur les limites latérales en y et des déplacements nuls suivant x, y et z sur la limite inférieure en z.

Tableau III-2 : Dimension du modèle de chaussée.

| | Dimension (m) | Nombre d'éléments |
|----------------------|----------------------------------|------------------------------|
| Longueur (suivant x) | 30 | 190 |
| Largeur (suivant y) | 9 | 18 |
| Hauteur (suivant z) | 6.22 à 6.51 (selon la structure) | 14 à 18 (selon la structure) |

La Figure III-1 représente le maillage de la chaussée, et la déformée du maillage obtenue sous le chargement du poids-lourd. La discrétisation est plus fine au centre du maillage pour simuler au mieux l'impact des charges et le bassin de déflexion engendré dans cette zone, qui correspond à la zone de simulation des mesures des appareils.

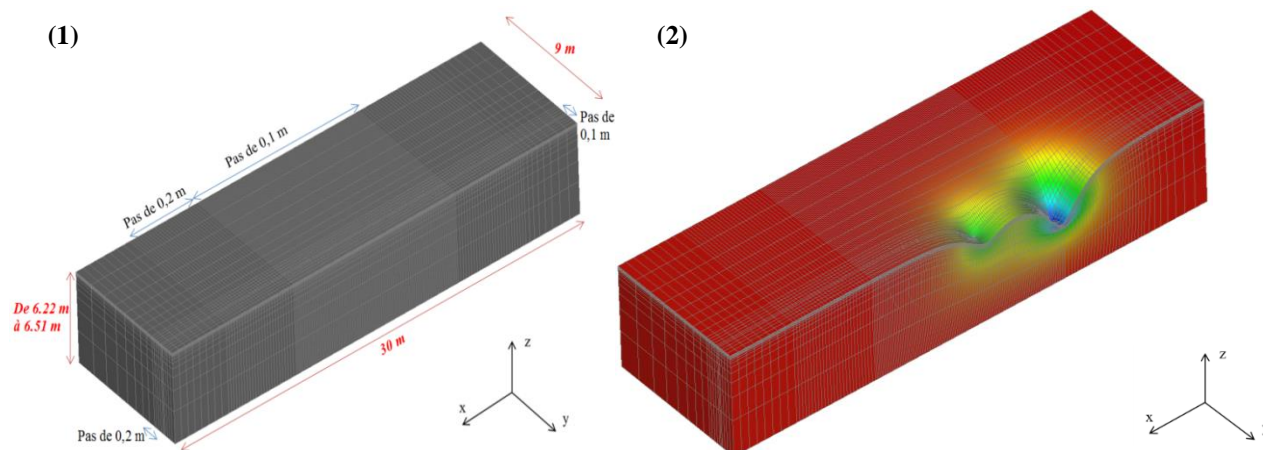


Figure III-1 : Maillage utilisé pour simuler l'avancement des appareils le long d'un itinéraire – (1) Sans déformée – (2) Avec déformée.

III.2.3 Validation du modèle CESAR

La validation du modèle éléments finis a été réalisée par comparaison du bassin de déflexion calculé avec celui calculé par ALIZE pour une même structure. Cependant, le modèle CESAR considère une charge rectangulaire tandis que celui adopté par ALIZE

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

considère une charge circulaire. Afin de conserver la même force appliquée, la pression de la charge rectangulaire a été ajustée à l'aide de l'Equation (III.1), en considérant la même force F que dans le calcul ALIZE

$$P = \frac{F}{S} \quad \text{(III.1)}$$

Le Tableau III-3 présente les caractéristiques utilisées pour modéliser la charge avec les logiciels ALIZE et CESAR-LCPC.

Tableau III-3 : Comparaison des caractéristiques des charges utilisées dans les modèles ALIZE et CESAR-LCPC.

| | Charge circulaire (ALIZE) | Charge rectangulaire (CESAR) |
|--------------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| P : Pression (MPa) | 0.6620 | 0.8125 |
| F : Poids/Roue (MN) | 0.0325 | 0.0325 |
| S : Surface au sol (m ²) | 0.04909 | 0.0400 |

La Figure III-2 compare les bassins de déflexion sous jumelage de référence obtenus avec ALIZE (empreinte circulaire) et avec CESAR (empreinte rectangulaire) pour la structure bitumineuse. Ces deux courbes se superposent presque parfaitement. La seule différence se situe au niveau de la déflexion maximale légèrement inférieure pour la charge rectangulaire. Cet écart d'environ 0.3 mm/100 est négligeable. La comparaison pour les deux autres types de chaussées a conduit à des résultats similaires, ce qui valide le modèle éléments finis adopté.

III.2.4 Modélisation des interfaces glissantes

Le guide de dimensionnement des chaussées utilisé en France (LCPC & SETRA, 1994) et les dispositions constructives définissent des conditions d'interfaces de couches de chaussées pour les chaussées neuves, qui peuvent être collées ou glissantes, en fonction des matériaux en contact.

Néanmoins, ces conditions « théoriques » ne sont pas toujours celles obtenues sur le terrain. Ainsi les interfaces spécifiées à la construction comme devant être collées peuvent présenter, du fait de mauvaises conditions de mise en œuvre ou du fait des sollicitations répétées du trafic et du climat, des zones délaminées, leur conférant localement un comportement glissant.

De façon à pouvoir se ramener au formalisme développé pour les indicateurs de couches, nous allons considérer des lois de comportement d'interface élastique à « raideur finie » k de la forme :

$$\sigma_{xz} = k[[u_x]], \quad \sigma_{yz} = k[[u_y]] \quad \text{(III.2)}$$

pouvant rendre compte continument d'états intermédiaires entre les états collé (raideur infinie) et décollé (raideur nulle). On va alors pouvoir faire jouer aux raideurs k d'interface un rôle similaire à celui des modules E de couches.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Dans le cas d'utilisation du programme CESAR, de telles lois d'interfaces peuvent être explicitement prises en compte par un dédoublement des nœuds d'interfaces et l'introduction d'éléments de type « ressort » reliant deux à deux les nœuds en vis-à-vis, de raideur K fonction de k et de la géométrie et de la nature des facettes des éléments de massif du maillage.

Par contre dans le cas d'utilisation du logiciel ALIZE, la prise en compte de raideurs d'interface intermédiaires nécessite l'introduction de couches minces d'épaisseur h_{int} forfaitaire (exemple : $h_{int} = 2 \text{ mm}$) (Duong, 2017), constituées d'un matériau élastique linéaire isotrope. Il est facile de voir que dans ces conditions la modélisation revient à introduire des lois de comportement en cisaillement de la forme :

$$\sigma_{xz} \approx \frac{\mu_{int}}{h_{int}} \llbracket u_x \rrbracket, \quad \sigma_{yz} \approx \frac{\mu_{int}}{h_{int}} \llbracket u_y \rrbracket \quad (\text{III.3})$$

et par conséquent à prendre :

$$k \approx \frac{\mu_{int}}{h_{int}} \quad (\text{III.4})$$

où $\mu_{int} = \frac{E_{int}}{2(1+\nu_{int})}$ est le module de cisaillement du matériau élastique de « remplissage », constituant l'interface.

A valeurs h_{int} , ν_{int} données, on obtient donc une modélisation équivalente à celle souhaitée en choisissant :

$$E_{int} = 2(1 + \nu_{int})h_{int} \times k \quad (\text{III.5})$$

A titre d'exemple, la modélisation par ALIZE des chaussées usuelles à l'aide de cette technique montre que pour $h_{int} = 2 \text{ mm}$, on obtient un comportement qui peut être assimilé à une interface collée pour E_{int} de l'ordre de 1000 MPa (ou supérieur à cette valeur) soit de façon plus intrinsèque pour k de l'ordre de 500 MPa/mm.

Dans cette étude, les interfaces généralisées et localisées seront ainsi modélisées avec CESAR par une fine couche de 2 mm de faible module. Le module de celle-ci dépend de la structure et de la profondeur du défaut. On supposera dans les calculs qu'une seule interface est glissante. Le Tableau III-4 présente les différents cas étudiés correspondant aux différentes configurations comportant une interface glissante. Le défaut peut être introduit à une seule profondeur sur la chaussée souple, à deux profondeurs différentes sur la chaussée bitumineuse et à trois profondeurs sur la chaussée mixte, ces profondeurs correspondant aux limites entre les couches.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Tableau III-4 : Positions possibles de l'interface glissante dans les chaussées étudiées

| | Profondeur du défaut localisé ou du défaut total avec, entre parenthèses, le module de cette couche mince. | | |
|----------------------|--|---|---|
| Chaussée souple | 0.06 m (10 MPa soit $k = 1.8 \text{ MPa/mm}$) | | |
| Chaussée bitumineuse | 0.06 m (4 MPa soit $k = 0.7 \text{ MPa/mm}$) | 0.14 m (3 MPa soit $k = 0.6 \text{ MPa/mm}$) | |
| Chaussée mixte | 0.08 m (10 MPa soit $k = 1.8 \text{ MPa/mm}$) | 0.15 m (4 MPa soit $k = 0.7 \text{ MPa/mm}$) | 0.23 m (2 MPa soit $k = 0.4 \text{ MPa/mm}$) |

Nous avons considéré une couche mince de 2 mm et pour fixer le module de cette couche représentant l'interface glissante, nous avons calé le bassin de déflexion pour correspondre à l'état « glissant » calculé avec ALIZE.

La Figure III-2 compare les bassins de référence simulés sous jumelage standard avec ALIZE et CESAR pour un glissement généralisé, (c'est-à-dire s'étendant sur toute la longueur de la chaussée), à 6 cm de profondeur pour la chaussée bitumineuse. Ces deux courbes sont semblables. Seul un léger écart de déflexion maximale est constaté avec un plus faible niveau déterminé avec CESAR. On a vérifié que les bassins simulés avec CESAR et ALIZE étaient également semblables dans les autres cas considérés. La modélisation de l'interface glissante est donc validée par comparaison entre les deux modèles.

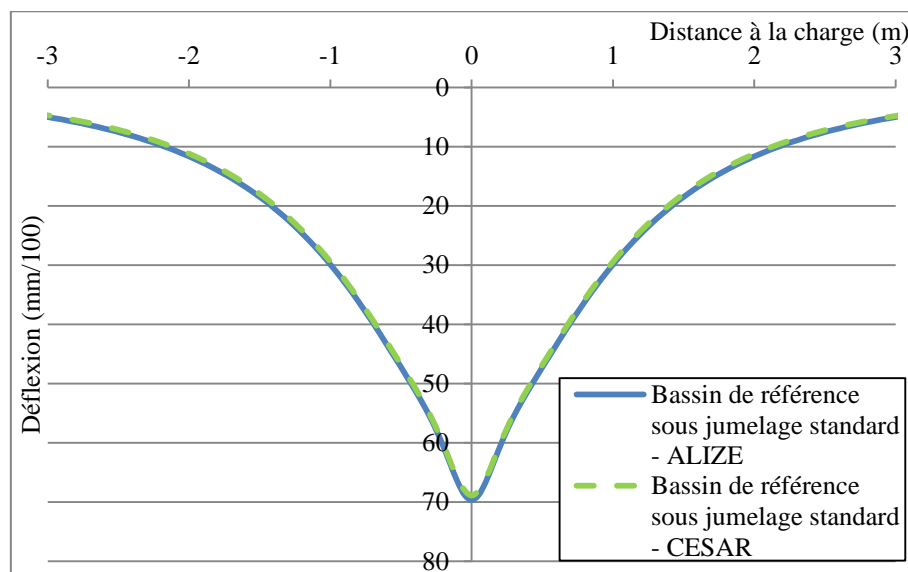


Figure III-2 : Comparaison des bassins de déflexion sous jumelage de référence simulés avec ALIZE et CESAR – défaut généralisé à 6cm de profondeur - Chaussée bitumineuse.

La Figure III-3 présente les simulations des bassins mesurés par chaque appareil pour différentes positions autour d'un décollement d'interface « localisé », d'une longueur de 1 m. Ce graphique montre que les bassins relevés à 1 m avant et après le bord de ce défaut (soit à 1.5 m avant ou après son centre), sont identiques au bassin mesuré sur chaussée saine. Seul le bassin obtenu au centre du défaut présente un écart avec les trois autres mesures. Cette remarque est vraie pour l'ensemble des cas étudiés. Ainsi, la première et la dernière mesures des appareils sont calculées pour une position du géophone (pour le curviamètre) ou du point

C d'appui de la poutre (pour le déflectographe) située à au moins ± 1 m des bords du défaut, comme expliqué sur les Figure III-4 et Figure III-5.

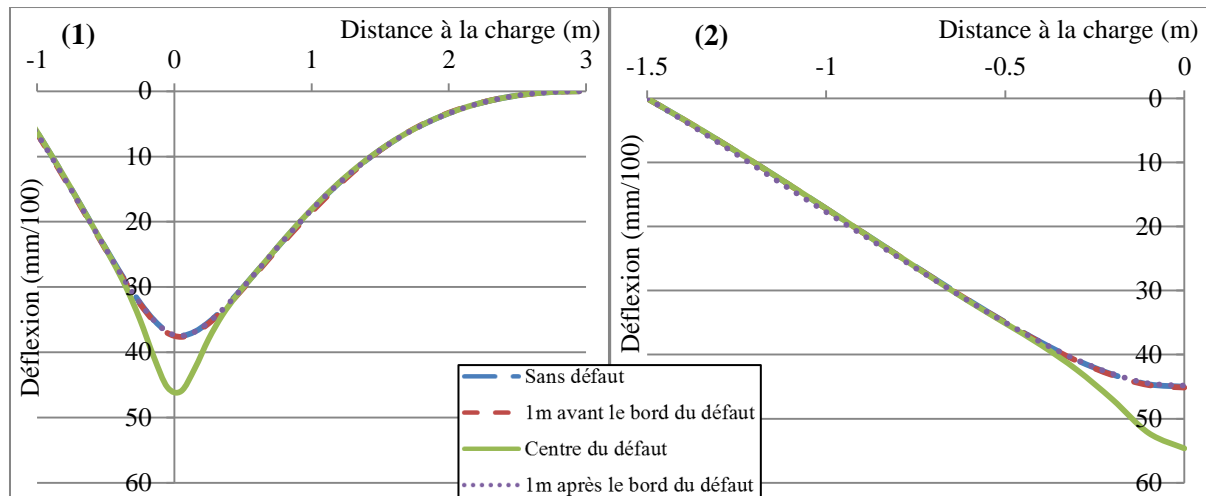


Figure III-3: Bassins de déflexion sous camion complet pour des chaussées sans défaut ou avec décollement localisé à 6cm de profondeur – Chaussée bitumineuse (1) Curviamètre – (2) Défectographe Flash.

Pour toutes les simulations de ce chapitre, le niveau de déflexion des bassins mesurés par le curviamètre est inférieur à celui du déflectographe Flash. Cette constatation s'explique par l'optimisation de la géométrie de la poutre du Flash qui est de conception plus récente (Vialletel & Simonin, 1997), et qui permet d'obtenir une mesure de déflexion maximale plus juste.

III.2.5 Simulation de l'avancement des appareils

Dans les modélisations par éléments finis, l'avancement de chaque appareil est simulé sur une distance de 11.4 m au maximum, par pas de 0.1 m. Pour les cas étudiés dans ce chapitre, la simulation d'une mesure de bassin de déflexion nécessite la prise en compte de 41 positions de charge pour le curviamètre (mesure sur 4 m par pas de 0.1 m) et de 16 positions pour le déflectographe Flash (mesure sur 1.5 m par pas de 0.1 m). On en déduit 73 bassins consécutifs mesurés par le curviamètre, espacés de 0.1 m, et 63 bassins pour le déflectographe Flash. Le temps de calcul est d'environ 10 h pour une structure donnée. La Figure III-4 et la Figure III-5 représentent respectivement une vue du dessus des positions de charges utilisées pour simuler l'avancement du curviamètre et du déflectographe Flash pour le cas d'un défaut d'interface localisé. Le point G indique la position du géophone au cours de la mesure pour le curviamètre. Les points A, B et C correspondent aux points d'appui de la poutre de mesure du déflectographe Flash.

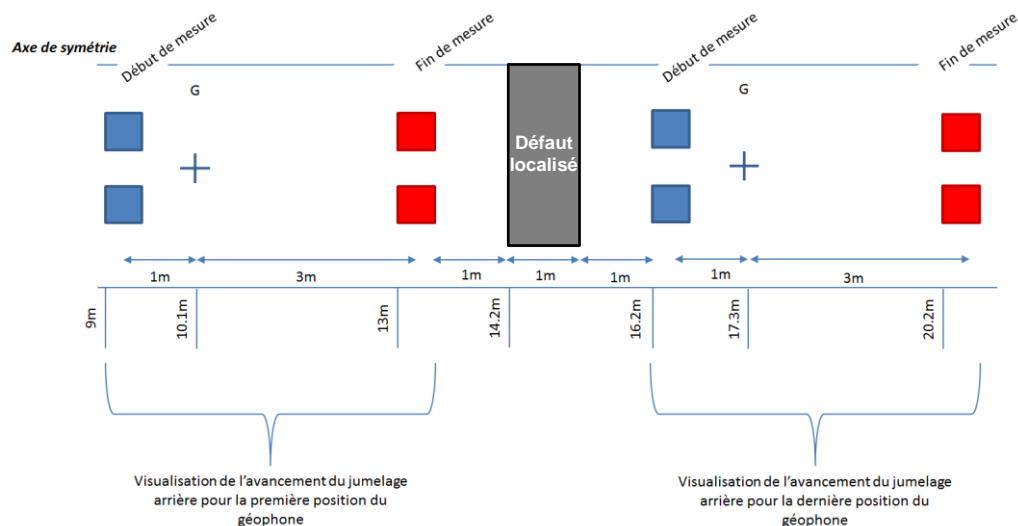


Figure III-4 : Vue du dessus des positions de charges du curviamètre en fonction de son avancement avec présence d'un défaut localisé (cas d'une interface glissante).

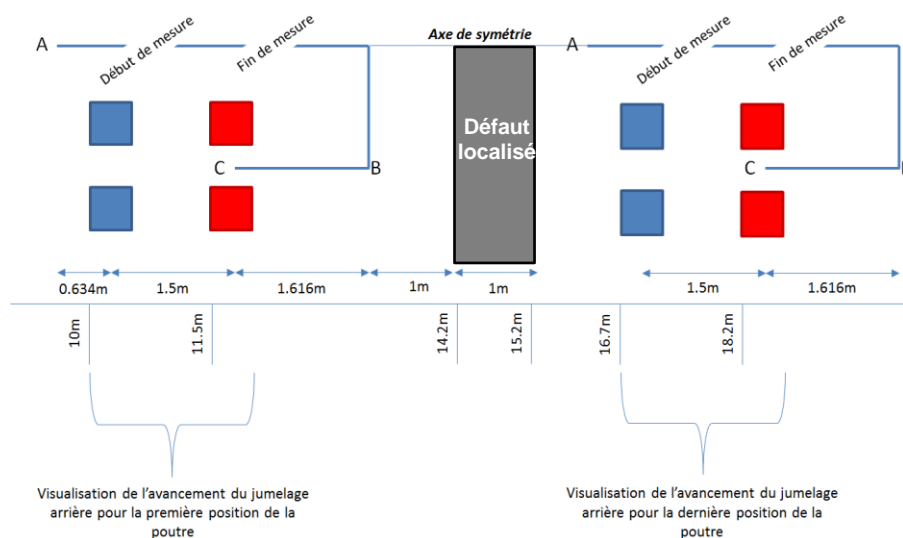


Figure III-5 : Vue du dessus des positions de charges du deflectographe Flash en fonction de son avancement avec présence d'un défaut localisé (cas d'une interface glissante).

L'obtention de la mesure des appareils se décompose en plusieurs phases. Elles sont automatisées par des programmes en C++.

- Calcul du bassin de déflexion absolu pour chaque position de l'appareil ;
- Pour chaque position, extraction de la déflexion absolue subie par le géophone du curviamètre ou les 3 points d'appui A, B, C de la poutre du deflectographe Flash ;
- A partir des déflexions précédentes, application du principe de mesure des appareils :
 - Déflexion et pente du bassin de déflexion nulles à 3 m après le jumelage arrière pour le curviamètre.
 - Calcul du bassin à l'aide des profils de déflexions des trois points d'appuis de la poutre A, B et C et de l'équation (II-8) du chapitre 2 (§II.2.2.1) pour le deflectographe Flash.

Dans ce chapitre, l'abscisse des mesures simulées correspond à la position du géophone du curviamètre ou à celle du point C pour le déflectographe Flash. L'ensemble des mesures permet de simuler les variations de niveau de mesure sur une distance de 7.3 m pour le curviamètre et de 6.3 m pour le déflectographe Flash, par pas de 10 cm. Ces distances de déplacement des appareils apparaissent suffisantes pour étudier l'effet d'un défaut localisé de 1 m de long sur la mesure de déflexion.

III.3 Etude de l'influence des défauts sur les indicateurs classiques de déflexion

A partir des modélisations précédentes, une étude de sensibilité des bassins simulés à la présence de défauts a été menée pour les mesures du curviamètre et du déflectographe Flash. On a modélisé un endommagement localisé, correspondant à une interface localement glissante. A chaque fois, on a d'abord analysé les mesures brutes de déflexion, puis les mesures corrigées en utilisant la procédure élaborée dans le Chapitre II. On s'est intéressé aux variations des indicateurs classiques issus de la bibliographie (voir chapitre I) estimés à partir d'un bassin de déflexion, comme la déflexion maximale, le rayon de courbe, la pente du bassin, ou les index associés au FWD (BLI, MLI, LLI). Pour ces derniers, ils n'ont pu être calculés qu'après correction de la mesure.

Des études complémentaires ont été conduites pour évaluer la sensibilité de ces indicateurs « classiques » à un défaut d'interface généralisé (sur toute la longueur de la structure) ou à des variations de module d'une couche, locales ou généralisées. Le détail de ces études est présenté en D.

III.3.1 Détermination des valeurs de référence des indicateurs classiques de la mesure de déflexion

On distingue dans cette partie les indicateurs de référence issus des mesures directes des appareils et les indicateurs estimés sous une charge standard de référence issus des mesures corrigées, suivant les procédures développées dans le Chapitre II.

III.3.1.1 Valeurs de référence des indicateurs pour les mesures directes des appareils

Le Tableau III-5 présente les valeurs des indicateurs classiques (déflexion maximale, courbure, rayon de courbure et valeur maximale de la pente du bassin) déterminées pour les trois chaussées de référence de l'étude. Les niveaux de déflexion maximale et de rayon de courbure sur chaussées souple et bitumineuse sont des valeurs couramment obtenues sur le terrain. Cependant, sur chaussée mixte, la déflexion maximale est très faible et le rayon de courbure très important. Le curviamètre et le déflectographe Flash ne sont pas à même de relever avec une précision suffisante de tels niveaux de valeurs.

Le tableau donne également l'intervalle de justesse dans lequel se situent 99 % des mesures correspondant à ce niveau de mesure et l'écart de répétabilité toujours à 99 %, représentatif de

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

la dispersion des mesures individuelles d'un appareil. Pour la déflexion maximale, ces valeurs font référence au paragraphe I.3.2 du Chapitre I relatif aux performances des appareils. Pour le rayon de courbure, ces valeurs sont déduites des limites en courbure définie dans la méthode LPC n°39 (Simonin, 1997). Celles-ci sont données uniquement pour des courbures supérieures à 0.003 m^{-1} (soit des rayons de courbure inférieurs à 333 m), qui correspondent à des chaussées souples, avec une mince épaisseur d'enrobés bitumineux. Les rayons de courbure de l'étude étant supérieurs à 600 m, les valeurs de justesse et de répétabilité utilisées ici ont été estimées en extrapolant les droites définies dans cette méthode d'essai. Aucune étude métrologique n'a été conduite pour évaluer la justesse et la répétabilité de la pente du bassin de déflexion. Enfin le tableau donne l'intervalle de justesse en valeur relative, normalisée par le niveau de référence ($\frac{I}{I_{ref}}$). La variation des différents indicateurs en présence d'un défaut sera comparée à cet intervalle, pour déterminer si la variation est significative et donc en déduire si les appareils sont capables de détecter ce défaut au vu de leurs performances métrologiques.

Tableau III-5 : Valeurs des indicateurs classiques de la mesure de déflexion pour les chaussées étudiées (sans défaut), et valeurs correspondantes de justesse et de répétabilité de la déflexion maximale et de la courbure.

| | | Déflexion maximale (mm/100) | | Courbure (10^{-4} m^{-1}) | | Rayon de courbure (m) | | Valeur maximale de la pente (10^{-5} m/m) | |
|----------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------------------------------|--------------|-----------------------|-----------------|---|----------|
| | | Curvia-mètre | D. Flash | Curvia-mètre | D. Flash | Curvia-mètre | D. Flash | Curvia-mètre | D. Flash |
| Chaussée souple | Niveau de référence | 42.8 | 50.4 | 16.6 | 15.4 | 602 | 647 | 43.2 | 40.2 |
| | Justesse | [34.2 ; 51.4] | [40.8 ; 60] | [10 ; 23.2] | [7.2 ; 23.6] | [431 ; 1000] | [423.7 ; 1389] | N.D | N.D |
| | Justesse normalisée | [0.8 ; 1.2] | [0.8 ; 1.2] | [0.6 ; 1.4] | [0.5 ; 1.5] | [0.7 ; 1.7] | [0.6 ; 2.1] | N.D | N.D |
| | Répétabilité | 9.1 | 6.5 | 5.8 | 5.4 | [446 ; 926] | [481 ; 999] | N.D | N.D |
| Chaussée bitumineuse | Niveau de référence | 37.5 | 45.1 | 11.2 | 9.4 | 889 | 1060 | 36.4 | 36.3 |
| | Justesse | [30 ; 45] | [33.5 ; 56.6] | [6.7 ; 16.7] | [2.1 ; 16.7] | [599 ; 1492] | [599 ; 4762] | N.D | N.D |
| | Justesse normalisée | [0.8 ; 1.2] | [0.7 ; 1.3] | [0.6 ; 1.5] | [0.2 ; 1.8] | [0.7 ; 1.7] | [0.6 ; 4.5] | N.D | N.D |
| | Répétabilité | 8.3 | 6.2 | 3.9 | 3.3 | [661 ; 1374] | [788 ; 1637] | N.D | N.D |
| Chaussée mixte | Niveau de référence | 2.6 | 7.6 | 2.2 | 2.2 | 4630 | 4460 | 10.4 | 6.6 |
| | Justesse | [1.6 ; 3.6] | [3.3 ; 11.9] | [0.5 ; 3.8] | [0.1 ; 6.6] | [2632 ; 20000] | [1515 ; 100000] | N.D | N.D |
| | Justesse normalisée | [0.6 ; 1.4] | [0.4 ; 1.6] | [0.2 ; 1.7] | [0.05 ; 3] | [0.6 ; 4.3] | [0.3 ; 22.4] | N.D | N.D |
| | Répétabilité | 2.7 | 3.5 | 0.8 | 0.8 | [3367 ; 6993] | [3367 ; 6993] | N.D | N.D |

III.3.1.2 Valeurs de référence des indicateurs pour les mesures corrigées sous une charge de référence

La méthode de correction permet ensuite de calculer des indicateurs sous la charge de référence (essieu à roues jumelées chargé à 130 kN). Outre les indicateurs précédents

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

(déflexion maximale, rayon de courbure et pente), les indicateurs généralement déduits des mesures du FWD (BLI, MLI et LLI) ont été également estimés. Le Tableau III-6 présente ces valeurs de référence.

Tableau III-6 : Indicateurs classiques déterminés suite à la procédure de correction sur les bassins de déflexion des structures de chaussées de référence.

| | $D_{max_{RefC}}$ (mm/100) | Rc_{RefC} (m) | $Pente_{max_{RefC}}$ (10^{-5} m/m) | BLI_{RefC} (mm/100) | MLI_{RefC} (mm/100) | LLI_{RefC} (mm/100) |
|----------------------|------------------------------|--------------------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Chaussée souple | 51.9 | 972 | 40 | 5 | 10.6 | 10.2 |
| Chaussée bitumineuse | 48.1 | 1535 | 31 | 3.3 | 7.8 | 8.7 |

III.3.2 Sensibilité des indicateurs à une interface glissante localisée

Cette partie vise à étudier la réponse des différents indicateurs sur une section de chaussée comportant une interface décollée. Pour cela, les calculs éléments finis ont été réalisés en simulant une interface décollée, située au centre du maillage, s'étendant sur une longueur de 1 m et une largeur de 3 m (Figure III-4 et Figure III-5). L'évolution des mesures du curviamètre et du déflectographe Flash le long de la section a été calculée. A partir de ces bassins de déflexion, l'évolution des différents indicateurs a été déterminée, et leur capacité à détecter le décollement localisé a été analysée.

III.3.2.1 Exploitation de la mesure des appareils

La Figure III-6 présente la succession des bassins simulés pour le curviamètre et le déflectographe Flash sur la chaussée bitumineuse épaisse, dont la zone d'interface glissante est située à une profondeur de 6 cm. A l'approche de la zone décollée (de 14.2 m à 15.2 m), la forme des bassins évolue et le niveau de déflexion maximale augmente de 37.5 mm/100 à 41.6 mm/100 pour le curviamètre et de 45.1 mm/100 à 49.6 mm/100 pour le déflectographe Flash. Le niveau de déflexion est maximal lorsque le géophone ou le point d'appui C de la poutre du déflectographe se situent au centre du défaut.

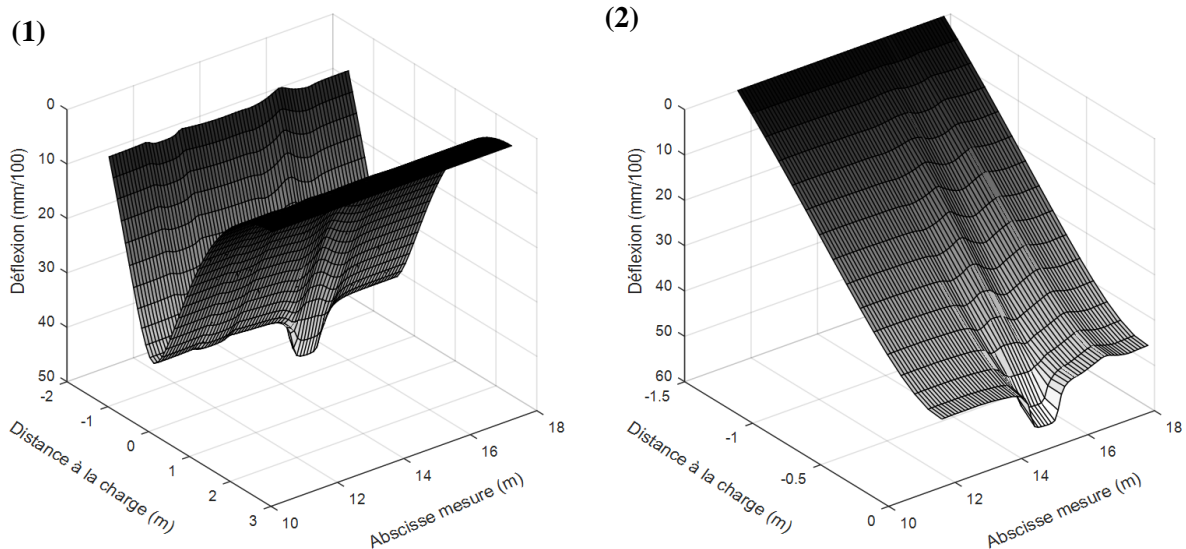


Figure III-6 : Simulation des bassins de déflexion mesurés le long de l'itinéraire dont l'interface glissante est localisée et se situe à 6cm de profondeur – Chaussée bitumineuse – (1) Curviamètre – (2) Défectographe Flash

La Figure III-7 présente les pentes calculées par dérivation des bassins mesurés par le curviamètre et le défectographe Flash. On présente la mesure sur la structure de référence (sans défaut) qui reste constante et pour la structure avec défaut, les mesures à différentes abscisses comprise entre 0.5 m avant et après le défaut. Les pentes calculées pour une chaussée sans défaut ou à 0.5 m avant et après le défaut sont très similaires. Leur valeur maximale est identique. L'effet du défaut sur la pente se fait ressentir seulement au voisinage et au-dessus du défaut, où la valeur maximale de la pente augmente légèrement. L'effet le plus important est observé pour la mesure située au centre du défaut, où la courbe d'évolution de la pente présente deux pics, proches du centre du bassin. Au voisinage de chaque pic, on observe un minimum local. Sa distance au centre du bassin de déflexion, indiquée par une flèche rouge, correspond à la demi-longueur du défaut (ici 0.5 m). Cette étude rejoint celle de Chea et Martinez (Chea & Martinez, 2005).

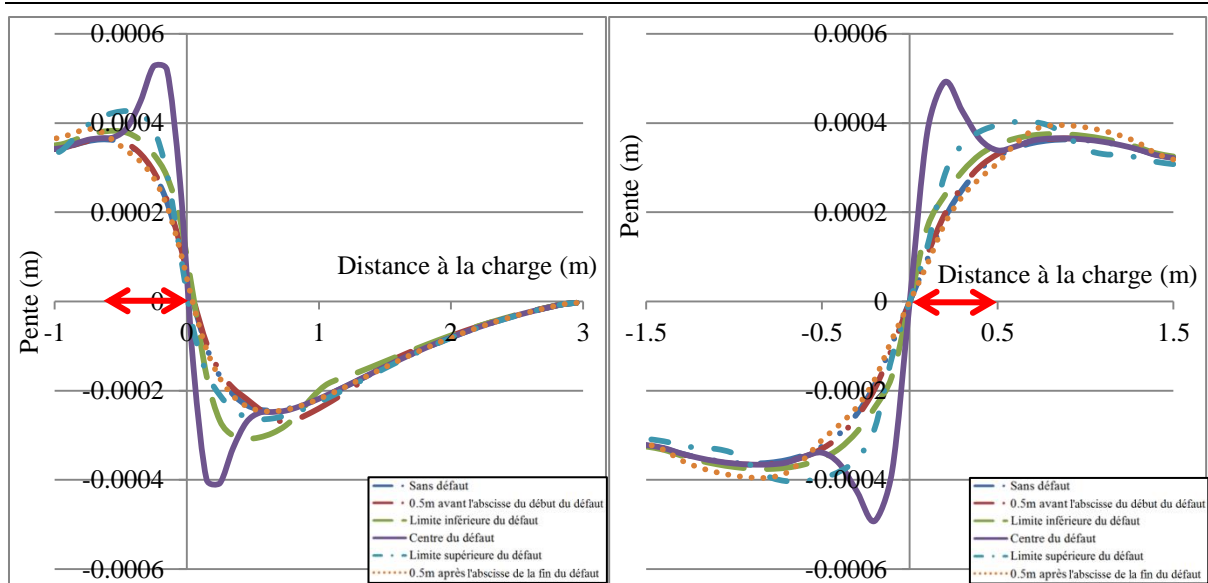


Figure III-7 : Comparaison des pentes pour différentes positions de mesure – Chaussée bitumineuse – (1) Curviamètre – (2) Déflectographe Flash.

III.3.2.2 Effet d'un décollement local sur les indicateurs classiques de la mesure de déflexion

La Figure III-8 présente, pour le curviamètre, l'évolution des indicateurs normalisés $\frac{D_{max}}{D_{max\ ref}}$, $\frac{Rc}{Rc_{Ref}}$ et $\frac{Pente_{max}}{Pente_{max\ ref}}$ le long de la section de chaussée. Chaque indicateur est normalisé par la valeur de référence obtenue pour les structures de référence sans défaut (cf Tableau III-5). La valeur normalisée reste proche de 1 dès que l'on s'éloigne du défaut. Au-delà de 0.5 m de part et d'autre du centre du défaut, l'écart entre le paramètre simulé et la valeur de référence est quasi nul. Pour détecter ce type de défaut, une densité importante de mesure sera donc nécessaire, ce qui n'est pas le mode de fonctionnement normal des appareils actuels, qui font des mesures tous les 5 mètres. A l'approche du défaut, les trois paramètres présentent un changement d'allure avec une augmentation de la déflexion maximale et de la valeur maximale de la pente mais à une diminution du rayon de courbure. Les variations les plus importantes sont obtenues pour la chaussée mixte avec un défaut à 0.15 m de profondeur, alors que les plus faibles variations apparaissent sur une chaussée souple.

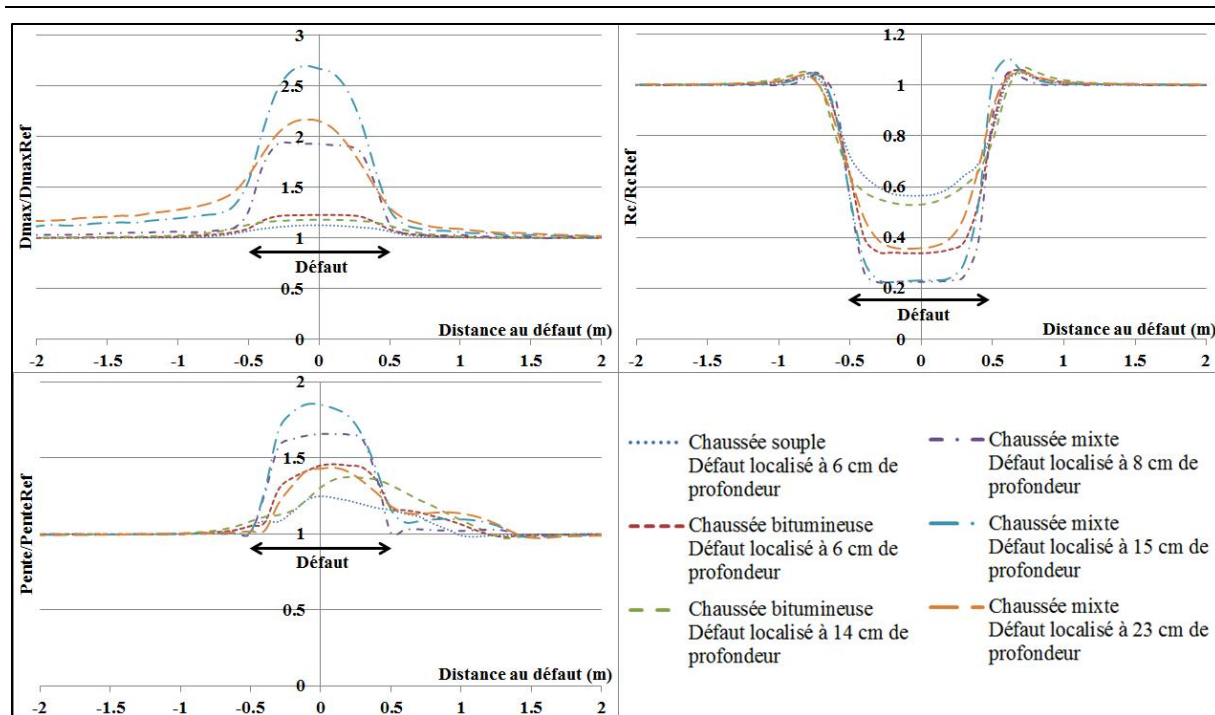


Figure III-8 : Evolution des indicateurs classiques à l'approche d'un décollement localisé – Curviamètre

Le Tableau III-7 vient compléter la Figure III-8 et présente pour les trois structures, les valeurs extrêmes (entre crochets) des indicateurs normalisés pour les deux appareils de mesure. Les valeurs de référence sont celles du Tableau III-5. Les valeurs maximales pour la déflexion maximale et pour la valeur maximale de la pente ainsi que les valeurs minimales pour le rayon de courbure sont obtenues au centre du défaut.

La valeur de la déflexion normalisée varie entre 1 et 1.2 sur les chaussées souple et bitumineuse épaisse. Au vu de la justesse des appareils, ces variations sont trop faibles pour être détectables. Ce paramètre présente des variations plus fortes sur chaussée mixte, allant jusqu'à 2.7. Cependant sur cette structure, cette augmentation relative correspond à un niveau de mesure inférieur à 5 mm/100. Cette variation de moins de 3 mm/100 n'est donc pas détectable avec ces appareils.

Les variations du rayon de courbure normalisé sont plus importantes que celle de la déflexion maximale. Elles sont comprises entre 0.2 et 1.7 selon les cas. Le niveau de rayon minimal (au centre du défaut) est inférieur à la limite inférieure de l'intervalle de justesse. Le défaut est donc détectable dans tous les cas par le rayon de courbure. Pour la chaussée souple, on se situe à la limite de détectabilité. Pour la chaussée bitumineuse le défaut est bien détectable. Pour la chaussée mixte, on passe d'un rayon non mesurable de 4400 m à un rayon mesurable de 880 m ou 1760 m selon les cas. . Pour les 3 types de structures, les variations du rayon de courbure permettent donc de détecter un décollement d'interface localisé.

Les valeurs maximales de la pente du bassin de déflexion présentent des variations plus importantes que la déflexion maximale pour les chaussées souple et bitumineuse. La détection de décollements à l'aide de ce paramètre paraît donc également possible, mais il s'avère un

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

peu moins sensible à ce type de défaut que le rayon de courbure. Sur la structure mixte la variation de la valeur maximale de la pente est grande, mais pour des bassins très plats, le calcul de la dérivée peut poser quelques problèmes.

Tableau III-7 : Comparaison des valeurs des indicateurs classiques obtenues pour différents cas de décollement local, pour le curviamètre et le déflectographe Flash, le long de l'itinéraire.

| | Curviamètre | | | Déflectographe Flash | | |
|----------------------|--|---|--|--|---|--|
| | Profondeur du décollement (6 cm : Chaussée souple et bitumineuse/ 8 cm : Chaussée mixte) | Profondeur du décollement (14 cm : Chaussée bitumineuse/ 15cm : Chaussée mixte) | Profondeur du décollement (23 cm : Chaussée mixte) | Profondeur du décollement (6 cm : Chaussée souple et bitumineuse/ 8 cm : Chaussée mixte) | Profondeur du décollement (14 cm : Chaussée bitumineuse/ 15cm : Chaussée mixte) | Profondeur du décollement (23 cm : Chaussée mixte) |
| | $\frac{D_{max}}{D_{maxRef}}$ | | | | | |
| Chaussée souple | [1 ; 1.1] | / | / | [1 ; 1.1] | / | / |
| Chaussée bitumineuse | [1 ; 1.2] | [1 ; 1.2] | / | [1 ; 1.2] | [1 ; 1.2] | / |
| Chaussée mixte | [1 ; 1.9] | [0.8 ; 2.7] | [0.8 ; 2.2] | [1 ; 1.4] | [1 ; 1.6] | [1 ; 1.4] |
| | $\frac{Rc}{RcRef}$ | | | | | |
| Chaussée souple | [0.6 ; 1] | / | / | [0.5 ; 1.3] | / | / |
| Chaussée bitumineuse | [0.3 ; 1] | [0.5 ; 1.1] | / | [0.2 ; 1.7] | [0.5 ; 2.1] | / |
| Chaussée mixte | [0.2 ; 1] | [0.2 ; 1.1] | [0.4 ; 1.1] | [0.2 ; 1.1] | [0.2 ; 1.6] | [0.2 ; 1.5] |
| | $\frac{Pente_{max}}{Pente_{maxRef}}$ | | | | | |
| Chaussée souple | [1 ; 1.4] | / | / | [1 ; 1.2] | / | / |
| Chaussée bitumineuse | [1 ; 1.5] | [1 ; 1.4] | / | [1 ; 1.4] | [1 ; 1.3] | / |
| Chaussée mixte | [1 ; 1.1] | [1 ; 1.9] | [1 ; 1.4] | [1 ; 1.9] | [1 ; 2.3] | [1 ; 1.6] |

III.3.2.3 Effet d'un décollement sur les indicateurs issus des mesures corrigées

La procédure de correction proposée au chapitre précédent consiste à transformer la mesure d'un appareil, en prenant en compte son mode de fonctionnement, pour se ramener à la mesure qui serait obtenue sous un jumelage standard. Le bassin de référence unique, pour les 2 appareils, est donc celui obtenu directement par le calcul sous la charge d'un jumelage standard. La procédure de correction a été appliquée sur les mesures simulées précédemment. Dans ce chapitre, la procédure a été appliquée à la fois aux mesures du curviamètre et du

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

défectographe Flash et dans l'ensemble des solutions possibles, on a retenu le triplet de paramètres « d_f, λ_f et n_f » qui satisfait à un indice $I \leq 5 \%$ pour les deux appareils (Chapitre II, équation II.19)). Cet indice, qui représente la qualité de l'ajustement, calcule l'écart entre le bassin mesuré par l'appareil et le bassin ajusté par la procédure de correction. La procédure de correction a été appliquée sur les bassins simulés obtenus au centre du défaut. C'est pour cette position que l'augmentation de la déflexion, ou la réduction du rayon de courbure sont les plus importantes. L'application de la procédure de correction sur chaussée mixte n'a pas permis d'obtenir un triplet unique satisfaisant au critère d'un indice I inférieur à 5 %. De plus, les indicateurs déduits de cette mesure corrigée sont aberrants (rayon de courbure > 17000 m). Pour ces raisons, seules les valeurs d'indicateurs obtenues sur les chaussées souple et bitumineuse épaisse sont analysées dans cette partie.

La Figure III-9 compare dans le cas d'un décollement localisé, à 6 cm et à 14 cm de profondeur dans la chaussée bitumineuse, les bassins au centre du défaut mesurés par les appareils le bassin corrigé et le bassin de référence sous jumelage standard. Les bassins corrigés sont plus proches des bassins de référence que ceux mesurés par les appareils. Ils se confondent pour une distance à la charge supérieure à 0.5 m. L'écart sur la déflexion maximale entre le bassin corrigé et le bassin de référence est réduit et reste inférieur à 15 % contre près de 40 % pour la mesure du curviamètre.

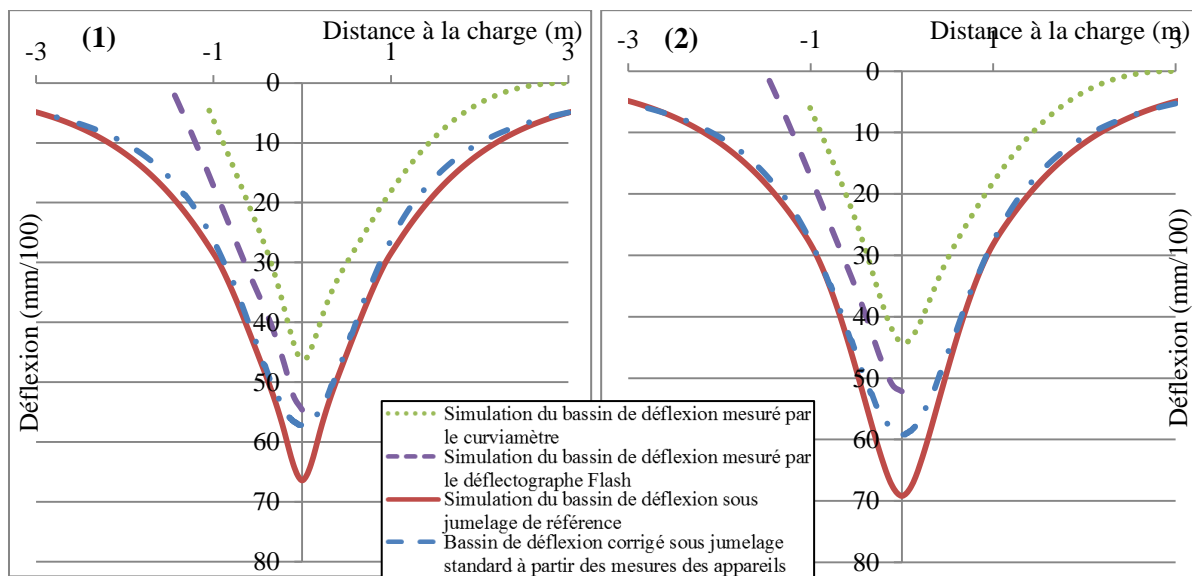


Figure III-9 : Bassins de déflexion avec décollement localisé à 6cm de profondeur (1) - décollement localisé à 14cm de profondeur (2) - Chaussée bitumineuse.

Suite à l'application de la procédure de correction sur les mesures du curviamètre et du déflectographe Flash, les indicateurs classiques de la mesure de déflexion ont été recalculés. En complément de ces indicateurs traditionnels, les indicateurs BLI, MLI et LLI ont été calculés. Le Tableau III-8 présente les valeurs normalisées des indicateurs issues de la procédure de correction par rapport aux indicateurs obtenus dans le Tableau III-6.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Pour les trois chaussées, les indicateurs normalisés (déflexion maximale, rayon et pente) issus de la procédure de correction présentent des variations du même ordre ou un peu plus faibles que ceux calculés à partir de la mesure directe (Tableau III-7). La détection d'un défaut localisé peut donc être légèrement plus difficile à partir des bassins corrigés avec ces indicateurs. L'écart sur la déflexion maximale qui n'était pas significatif auparavant, ne l'est toujours pas. L'écart sur le rayon de courbure a été réduit à 30 % pour la chaussée souple et à 40 % pour la chaussée bitumineuse contre plus de 50 % précédemment. Ces écarts restent néanmoins suffisamment significatifs pour pouvoir détecter les défauts d'interface. Les écarts sur les valeurs maximales de la pente compris entre 20 et 30 % sont tout juste suffisants pour détecter la présence des défauts.

Pour les indicateurs issus du FWD, le LLI présente des variations du même ordre que la déflexion maximale et n'est potentiellement que peu sensible à la présence du défaut. Les indicateurs BLI, MLI présentent des variations plus importantes qui pourraient renseigner sur l'état d'interface de la chaussée. L'indicateur BLI montre les variations les plus importantes notamment pour la structure bitumineuse, où sa variation atteint au moins 50 %. Cet indicateur présente des écarts légèrement supérieurs à ceux obtenus pour le rayon de courbure corrigé.

Tableau III-8 : Indicateurs classiques normalisés déterminés à partir des bassins corrigés sous jumelage standard pour des décollements localisés.

| | | $\frac{D_{maxc}}{D_{maxRefc}}$ | $\frac{Rc_c}{Rc_{Refc}}$ | $\frac{Pente_{maxc}}{Pente_{maxRefc}}$ | $\frac{BLI_c}{BLI_{Refc}}$ | $\frac{MLI_c}{MLI_{Refc}}$ | $\frac{LLI_c}{LLI_{Refc}}$ |
|----------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Chaussée souple | Défaut localisé 6 cm | 1.1 | 0.7 | 1.2 | 1.3 | 1.2 | 1.1 |
| Chaussée bitumineuse | Défaut localisé 6 cm | 1.1 | 0.6 | 1.3 | 1.6 | 1.4 | 1.2 |
| | Défaut localisé 14 cm | 1.1 | 0.6 | 1.3 | 1.5 | 1.4 | 1.2 |

III.3.3 Sensibilité des indicateurs à d'autres types de défauts

L'étude de sensibilité précédente a été complétée par d'autres études de sensibilité liées à d'autres défauts de la structure. Ainsi, on a envisagé des variations du module des couches bitumineuses dues soit à un endommagement soit à une variation de température ou des variations de module de la plateforme. Ces variations pouvant être généralisées (sur la longueur totale de la structure) ou localisées. L'endommagement généralisé de l'interface a également été étudié. A chaque fois la démarche a été identique en étudiant d'abord les variations des indicateurs issus des mesures brutes (déflexion maximale, rayon de courbure et pente), puis les indicateurs issus des bassins de déflexion corrigés en ajoutant également dans ce cas les indicateurs BLI, MLI et LLI. L'étude détaillée est présentée en Annexe D. On ne présente ici que les principaux enseignements.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Pour un décollement généralisé, l'écart sur les indicateurs est amplifié par rapport à un décollement localisé. Les défauts les plus profonds deviennent détectables par tous les paramètres y compris par la déflexion maximale qui présente un écart atteignant 50 % pour les mesures brutes des appareils et 30 % pour les mesures corrigées, ce qui est significatif. L'écart le plus important reste celui obtenu pour le rayon de courbure et pour l'indicateur BLI, pour lesquels le rapport avec la valeur de référence peut être supérieur à 2 (ou inférieur à 0.5).

Pour une importante variation de module d'une couche bitumineuse ou de plateforme, l'effet sur les paramètres dépend de la couche concernée :

- Pour une division par 2 du module d'une couche bitumineuse correspondant par exemple à une élévation de la température de 15 °C à 25 °C, tous les paramètres sont sensibles. Sur les paramètres mesurés, la déflexion maximale est la plus sensible avec une augmentation pouvant atteindre 50 %. Parmi les indicateurs issus de la mesure corrigée, les paramètres BLI, MLI et LLI sont les plus sensibles avec une augmentation plus importantes de BLI qui atteint 60 %. La différence entre ces 3 paramètres reste cependant assez faible.
- Une importante variation de la plateforme est plus facilement détectable sur les paramètres mesurés pente et déflexion maximale. L'écart de plus de 50 % est significatif. Parmi les paramètres calculés à partir du bassin corrigés, l'écart le plus significatif est obtenu pour la déflexion maximale qui peut doubler. Parmi les paramètres BLI, MLI et LLI, l'écart le plus important est obtenu sur le paramètre LLI pour lequel il atteint 40 %.

L'étude des variations de l'ordre de 15 % du module d'une couche bitumineuse le long de l'itinéraire conduit à des bassins mesurés trop similaire. Les écarts sont trop faibles pour obtenir des indicateurs significativement différents le long de l'itinéraire. Les faibles variations de module de la plateforme le long d'un itinéraire conduisent à des différences de bassin plus significatives. L'écart le plus important est obtenu pour la déflexion maximale du bassin corrigé avec une augmentation de 14 %. L'écart sur la déflexion maximale et la pente mesurées est compris entre 6 et 8 %. Les écarts pour les autres paramètres sont inférieurs à 5 %.

A partir des études réalisées en Annexe D, le Tableau III-9 présente les indicateurs « classiques » pertinents à la détection d'un type de défaut. L'indicateur de la déflexion maximale est souvent pertinent pour la détection de ces types de défaut mais également, les indicateurs associés au FWD (BLI, MLI et LLI) issus des mesures corrigées.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Tableau III-9 : Indicateurs classiques pertinents à la détection d'un type de défauts.

| Type de défauts | Indicateurs « classiques » | Indicateurs classiques de la mesure corrigée |
|---|---|--|
| Décollement généralisé de l'interface | Déflexion maximale Rayon de courbure | Déflexion maximale BLI |
| Fortes variations du module d'une couche bitumineuse | Déflexion maximale | BLI |
| Fortes variations du module de la plateforme | Déflexion maximale Pente | Déflexion maximale LLI |
| Faibles variations du module d'une couche bitumineuse ou de la plateforme | / | / |

III.3.4 Conclusion de la première partie

Cette première partie du chapitre III a étudié la sensibilité des mesures de déflexion réalisées avec le curviamètre et le deflectographe Flash à différents types de défauts de la chaussée. Ceux-ci pouvaient être localisés ou généralisés et être représentatifs d'un endommagement de matériau (chute de module) ou d'interface. L'étude a comparé les indicateurs issus du bassin de déflexion mesuré par les appareils, Flash ou curviamètre, mais aussi ceux calculés après correction de ce bassin de déflexion pour obtenir le bassin sous un jumelage de référence.

L'étude d'un défaut d'interface localisé sur une longueur de 1 m a d'abord montré que le bassin de déflexion ne varie qu'à proximité de ce défaut. Sa détection nécessite donc une densité de mesure importante (tous les 10 cm) pour visualiser la variation de mesure et localiser les limites du défaut. Les appareils actuels ne permettent pas d'obtenir cette densité de mesure. La détection de ces défauts reste donc aléatoire.

La comparaison des résultats entre un décollement localisé et un décollement généralisé montre que l'écart des indicateurs avec leur valeur de référence est plus important dans le cas d'un décollement généralisé. Un décollement généralisé, ou de grande longueur, sera donc plus aisément détectable.

La présence de défauts d'interface affecte plus particulièrement le rayon de courbure mesuré directement par l'appareil. En revanche la déflexion maximale est peu sensible à la présence de ce type de défaut. Parmi les indicateurs calculés après correction du bassin de déflexion, le rayon de courbure reste le plus sensible à la présence d'un défaut d'interface avec cependant des écarts légèrement inférieurs à ceux obtenus à partir de la mesure directe. L'indicateur BLI se montre également très sensible à la présence de défauts d'interface. Les indicateurs MLI, LLI et pente sont sensibles à un moindre degré tandis que la déflexion maximale corrigée ne varie pas suffisamment pour détecter ce type de défaut.

Une variation du module d'une couche affecte les indicateurs de façon différente selon la couche concernée. Le paramètre le plus sensible aux variations de module est la déflexion maximale, et notamment celle calculée après correction du bassin de déflexion. Les indicateurs BLI, MLI et LLI apparaissent un peu moins sensibles que la déflexion maximale.

Pour ces 3 indicateurs, l'écart le plus important est obtenu sur l'indicateur BLI pour les couches supérieures et sur l'indicateur LLI pour la plateforme.

Au final, il apparaît que le rayon de courbure (mesuré ou corrigé) est principalement sensible à la présence de défaut d'interface et doit être utilisé pour détecter ce type de défaut. Il ne permettra cependant pas de localiser la profondeur du défaut dans la structure. La déflexion maximale, notamment après correction du bassin de déflexion, est l'indicateur le plus sensible à la diminution du module d'une couche. Le calcul des paramètres BLI, MLI et LLI, également sensibles aux valeurs de module, peut permettre de localiser approximativement le dommage, sans pouvoir en quantifier l'importance.

III.4 Création d'indicateurs optimisés à grand rendement spécifiques d'un type de défaut donné

L'utilisation d'indicateurs classiques, dans la première partie de ce chapitre, a montré qu'il existait des seuils de variation de ces indicateurs, liés à la précision des mesures de déflexion, en dessous desquels un défaut ou une modification de la structure de chaussée ne peuvent pas être identifiés. De plus, ces indicateurs classiques ne permettent pas de distinguer la nature des défauts rencontrés. Pour remédier à cela, on a cherché ici à construire des indicateurs optimisés, capables d'abaisser les seuils de détection des défauts et de mieux en déterminer l'origine.

A partir des mesures de déflexion relevées par le curviamètre ou le déflectographe Flash, l'étude propose plus précisément une méthode de construction d'indicateurs optimisés pour la détection :

- -d'une part de variations des modules des couches bitumineuses ou de la plateforme ;
- -d'autre part de défauts d'interface.

Ces indicateurs seront testés sur les trois structures théoriques avec défauts définies en début de chapitre, dans la partie III.3, ce qui permettra également de dégager une méthodologie pour leur utilisation. Celle-ci porte notamment sur l'ordre d'application de différents indicateurs.

III.4.1 Mise en place d'indicateurs optimisés

III.4.1.1 *Indicateurs relatifs aux modules des couches : positionnement du problème*

Comme montré dans la bibliographie, le fonctionnement sous trafic d'une structure de chaussée sans défaut majeur peut être vu, avec une bonne approximation, comme celui d'une structure élastique linéaire multicouche définie par les épaisseurs h_i , les modules d'Young E_i^0 (et les coefficients de Poisson ν_i^0) de ses différentes couches, supposées homogènes et par les états glissants ou collés de ses interfaces. On prendra également en compte, dans la partie III.4.1.2, l'existence d'états d'interface à « rigidité intermédiaire » ni nulle, ni infinie.

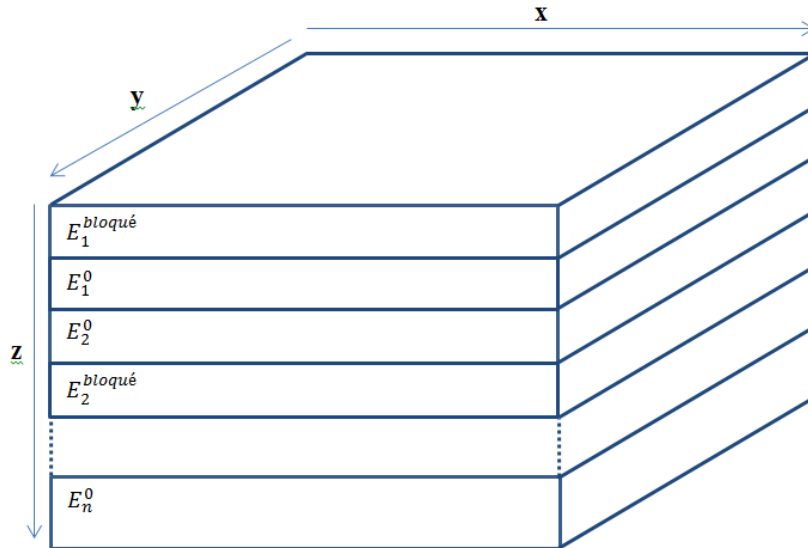


Figure III-10 : Structure multicouche sans défaut composée de N couches de modules $E_i^0, i = 1, \dots, n$ ou $E_i^{bloqué}, i = 1, \dots, N - n$ appelée aussi structure de référence.

Ces couches seront caractérisées par leur module élastique E_i et on distinguera par la suite des couches dont le module sera considéré fixe (noté $E_i^{0\ bloqué}$) et des couches dont le module sera considéré variable (noté $E_i^0 + \Delta E_i(x, y)$) et pour lesquelles les indicateurs seront mis en place. Dans le cas de structures comportant un nombre élevé de couches, il est en effet nécessaire de limiter le nombre d'inconnues $\Delta E_i(x, y)$ pour obtenir des indicateurs d'une précision suffisante. Les valeurs $E_i^0(\theta) + \Delta E_i(x, y), E_i^{0\ bloqué}(\theta)$ en place sont ici à bien distinguer des valeurs des modules de dimensionnement E_i^{dim} . Elles sont fonction des matériaux réellement mis en œuvre, de leurs conditions d'application et varient en fonction du profil de température dans la chaussée. Dans la thèse, on considère que les modules E_i^0 et $E_i^{0\ bloqué}$ prennent la valeur de E_i^{dim} . Nous aurons a priori à nous servir de ces valeurs pour construire les indicateurs optimisés à grand rendement I_{OGR} . Nous allons donc supposer à ce stade ces valeurs connues, en fonction des températures des campagnes d'auscultation. Cette structure de modules $E_i^0, E_i^{0\ bloqué}$ est appelée par la suite « structure de référence ».

A partir de la Figure III-10, nous pouvons considérer qu'une structure avec défauts peut être modélisée en première approximation par le même multicouche dont les modules E_i sont localement variables, notamment en fonction des coordonnées d'espace (x, y) . Sur la Figure III-11, on note ΔE_i les fluctuations de module liées aux défauts. Nous allons alors rechercher des indicateurs permettant d'estimer par couche l'amplitude de ces fluctuations. Afin toutefois de focaliser les indicateurs sur les couches structurelles et de les rendre à cet égard plus robustes, il peut être souhaitable de considérer certaines couches (ex : les couches de surface) à valeurs de module bloquées (fonction toutefois de la température).

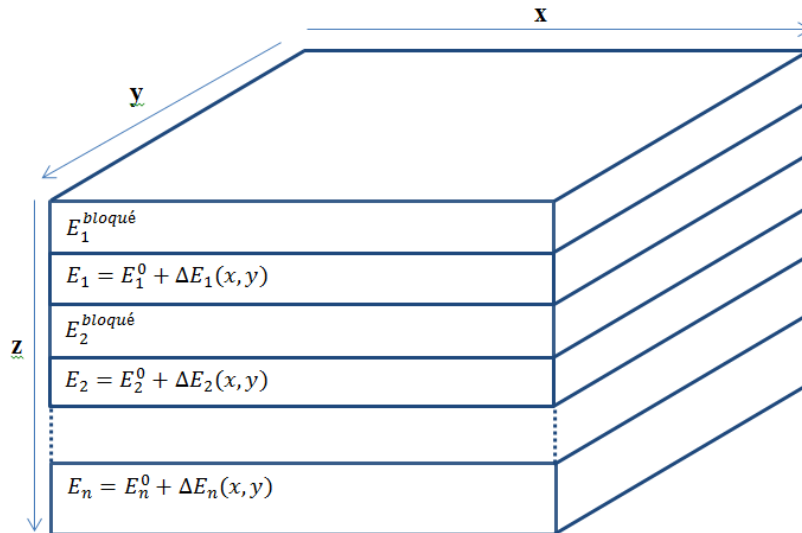


Figure III-11 : Structure multicouche avec défaut composée de n couches de modules $E_i = E_i^0 + \Delta E_i(x, y)$.

De plus, nous allons supposer les fonctions $\Delta E_i(x, y)$ à variations spatiales lentes par rapport à l'échelle d'un bassin de déflexion et sensiblement constantes et égales à leurs valeurs $\Delta E_i(x_c, y_c)$ au voisinage d'un point de mesure de la déflexion. Nous considérons alors le bassin obtenu pour les variations $\Delta E_i(x_c, y_c)$ supposées homogènes par couche voisin du bassin réel associé aux variations $\Delta E_i(x, y)$.

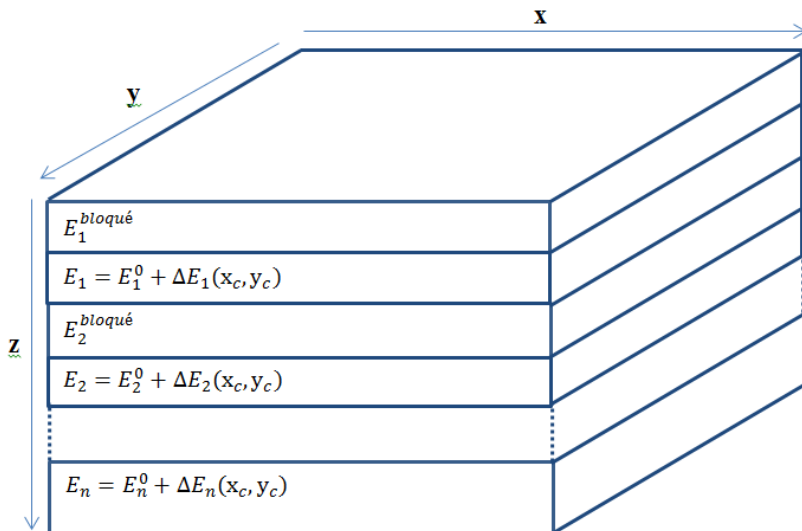


Figure III-12 : Structure multicouche avec défaut composée de n couches de modules $E_i = E_i^0 + \Delta E_i(x, y)$.

Nous allons ainsi rechercher au final des indicateurs à grand rendement I_j permettant de déterminer « au mieux » les valeurs $\Delta E_i(x_c, y_c)$.

III.4.1.1.1 Définition et calcul des indicateurs optimisés

Nous allons nous appuyer pour la recherche de ces indicateurs optimisés à grand rendement sur le calcul d'intégrales Λ_j de la forme :

$$\Lambda_j(\mathbf{w}_{mes}(x_c, \bullet)) = \int_a^b p_j(x'_v) \mathbf{w}_{mes}(x_c, x'_v) dx'_v \quad (\text{III.6})$$

avec :

- j = numéro de couche spécifique associée plus loin à l'indicateur I_j ;
- x_c = abscisse du point de mesure ;
- x'_v = abscisse du véhicule de mesure ;
- $\mathbf{w}_{mes}(x_c, x'_v)$ = déflexion mesurée en x_c pour la position relative capteur/véhicule définie par x'_v ;
- $\mathbf{w}_{mes}(x_c, \bullet)$ = fonction qui associe à x'_v la valeur $\mathbf{w}_{mes}(x_c, x'_v)$;
- a, b = positions extrêmes de x'_v ;
- $p_j(x'_v)$ = fonction de pondération de l'indicateur I_j .

Pour \mathbf{w}_{mes} et p_j connues, on peut observer que le calcul de telles intégrales en tout point de mesure x_c est immédiat par intégration numérique (ex : méthode des trapèzes) et permet donc de construire des indicateurs à grand rendement.

De façon à obtenir des indicateurs spécifiques de défauts dans une couche, nous allons donc chercher les fonctions $p_k(x'_v)$ de façon à ce que pour $k = j$ la fonction $p_j(x'_v)$ soit la plus sensible possible à un défaut présent dans la couche j mais la moins sensible possible aux défauts éventuels des autres couches ($k \neq j$).

Pour ce faire, repartons de la modélisation de la chaussée avec défauts proposée sur la Figure III-12 et appliquons l'expression (III.6) de l'intégrale Λ_j au bassin de déflexion théorique \mathbf{w}_{cal} issu de ce modèle et fonction de l'appareil d'auscultation considéré.

Notons plus précisément celui-ci $\mathbf{w}_{cal}(x'_v, \{E_k\}) = \mathbf{w}_{cal}(x'_v, E_1, E_2, \dots, E_k, \dots, E_n)$ en faisant apparaître les modules homogènes E_k du multicouche et la position relative capteur/véhicule x'_v . Elle est par contre indépendante de x_c .

Pour le modèle de la Figure III-12, l'intégrale Λ_j devient ainsi une fonction de l'ensemble de modules $\{E_k\}$:

$$\Lambda_j(\mathbf{w}_{cal}(\bullet, \{E_k\})) = \int_a^b p_j(x'_v) \mathbf{w}_{cal}(x'_v, \{E_k\}) dx'_v \quad (\text{III.7})$$

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

dont la sensibilité à la présence de variations de modules ΔE_k au voisinage des valeurs E_k^0 est donnée au premier ordre par la différentielle :

$$\delta \Lambda_j(\{E_k\}) = \sum_{k=1}^n \left(\int_a^b p_j(x'_v) \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_k}(x'_v, \{E_k^0\}) dx'_v \right) \Delta E_k \quad (\text{III.8})$$

Nous allons alors rechercher $p_j(x'_v)$ de façon à ce que les « produits scalaires » $\int_a^b p_j(x'_v) \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_k}(x'_v, \{E_k^0\}) dx'_v$ dans l'espace des fonctions à carré sommable $L^2([a, b])$ soient nuls pour $k \neq j$ et de façon à ce que pour $k = j$ le terme $\int_a^b p_j(x'_v) \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_j}(x'_v, \{E_k^0\}) dx'_v$, facteur de ΔE_j soit « maximum ». Pour donner toutefois un sens à cette dernière condition et éviter des fonctions $p_j(x'_v)$ pouvant tendre vers l'infini, nous imposons à p_j d'appartenir à une sphère de rayon borné de $L^2([a, b])$ soit :

$$\int_a^b p_j^2(x'_v) dx'_v = \text{constante} \quad (\text{III.9})$$

Nous sommes ainsi conduits à résoudre le problème de maximisation suivant :

trouver $p_j(x'_v)$ dans $L^2([a, b])$ qui :

- maximise la quantité $\int_a^b p_j(x'_v) \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_j}(x'_v, \{E_k^0\}) dx'_v$;
- sous les contraintes :
 - $\int_a^b p_j(x'_v) \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_k}(x'_v, \{E_k^0\}) dx'_v = 0$ pour $k \neq j$
 - $\int_a^b p_j^2(x'_v) dx'_v = \text{constante}$.

Introduisons pour cela le Lagrangien défini par :

$$\begin{aligned} & \mathcal{L}(p_j, \{\lambda_k\}_{k \neq j}, \mu) \\ &= \int_a^b p_j(x'_v) \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_j}(x'_v, \{E_k^0\}) dx'_v + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \lambda_k \left(\int_a^b p_j(x'_v) \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_k}(x'_v, \{E_k^0\}) dx'_v \right) \\ &+ \mu \left(\int_a^b p_j^2(x'_v) dx'_v - \text{constante} \right) \text{ avec } \{\lambda_1, \dots, \lambda_{j-1}, \mu, \lambda_j, \dots, \lambda_n\} \in \mathbb{R}^n \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

Exprimons la stationnarité de \mathcal{L} par rapport à p_j ; on doit avoir pour toute variation élémentaire $\delta p_j(x'_v)$ de la fonction $p_j(x'_v)$:

$$\int_a^b \delta p_j(x'_v) \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_j}(x'_v, \{E_k^0\}) dx'_v + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \lambda_k \left(\int_a^b \delta p_j(x'_v) \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_k}(x'_v, \{E_k^0\}) dx'_v \right) + 2\mu \int_a^b \delta p_j(x'_v) p_j(x'_v) dx'_v = 0 \quad (\text{III.11})$$

soit encore :

$$\int_a^b \delta p_j(x'_v) \left[\frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_j}(x'_v, \{E_k^0\}) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \lambda_k \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_k}(x'_v, \{E_k^0\}) + 2\mu p_j(x'_v) \right] dx'_v = 0 \quad (\text{III.12})$$

ce qui implique :

$$\frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_j}(x'_v, \{E_k^0\}) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \lambda_k \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_k}(x'_v, \{E_k^0\}) + 2\mu p_j(x'_v) = 0 \quad \forall x'_v \in [a, b] \quad (\text{III.13})$$

Cette expression montre que $p_j(x'_v)$ est à choisir dans l'espace vectoriel sous-tendu par les fonctions $\frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_k}(x'_v, \{E_k^0\})$ pour $k \in \{1, \dots, n\}$.

Dès lors, réécrivons $p_j(x'_v)$ sous la forme :

$$p_j(x'_v) = \sum_{l=1}^n a_{jl} \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_l}(x'_v, \{E_m^0\}) \quad \text{avec } \{a_{jl}\} \in \mathbb{R}^n \quad (\text{III.14})$$

et ré-exprimons les conditions d'orthogonalité précédentes pour $k \neq j$, soit :

$$\int_a^b p_j(x'_v) \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_k}(x'_v, \{E_k^0\}) dx'_v = 0 \quad (\text{III.15})$$

$$\Rightarrow \sum_{l=1}^n a_{jl} \int_a^b \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_l}(x'_v, \{E_m^0\}) \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_k}(x'_v, \{E_m^0\}) dx'_v$$

Imposons par ailleurs la condition :

$$\sum_{l=1}^n a_{jl} \int_a^b \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_l}(x'_v, \{E_m^0\}) \frac{\partial \mathbf{w}_{cal}}{\partial E_j}(x'_v, \{E_m^0\}) dx'_v = 1 \quad (\text{III.16})$$

de façon à ce que la variation de l'intégrale Λ_j soit égale à la variation de module de la couche j :

$$\delta\Lambda_j(\{E_k\}) = \Delta E_j \quad (\text{III.17})$$

Notons :

- \mathcal{B} la matrice symétrique de coefficients $b_{kl} = \int_a^b \frac{\partial w_{cal}}{\partial E_l}(x'_v, \{E_m^0\}) \frac{\partial w_{cal}}{\partial E_k}(x'_v, \{E_m^0\}) dx'_v$
- \mathcal{A}_j le vecteur colonne des coefficients a_{jl} pour $l \in \{1, \dots, n\}$
- \mathbb{I}_j le vecteur colonne $\{\delta_{jl}\}$ tel que $\delta_{jj}=1, \delta_{jl} = 0$ si $l \neq j$

Les équations précédentes sont alors équivalentes au système linéaire $n \times n$:

$$\mathcal{B}\mathcal{A}_j = \mathbb{I}_j \quad (\text{III.18})$$

dont la résolution, en le supposant inversible ($\text{Det } \mathcal{B} \neq 0$), livre les valeurs des coefficients a_{jl} et donc l'expression de la fonction $p_j(x'_v)$.

A partir des intégrales Λ_j , introduisons alors les indicateurs optimisés à grand rendement I_j définis par :

$$I_j(\mathbf{w}_{mes}(x_c, \bullet)) = \Lambda_j(\mathbf{w}_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_j(\mathbf{w}_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \quad (\text{III.19})$$

Par construction, ces indicateurs prennent une valeur nulle pour le bassin théorique calculé sur la structure de référence. De manière générale, ils fournissent le long d'un itinéraire une estimation des écarts à l'ensemble de modules $\{E_j^0\}$ de la structure auscultée et par là même, à travers notamment leur variation en fonction de x_c une estimation de l'homogénéité de l'état structural (ou de température) de la chaussée.

III.4.1.1.2 Normalisation des indicateurs I_j

L'indicateur calculé est lié à la variation « absolue » de module d'une couche au voisinage de l'ensemble $\{E_j^0\}$. Compte tenue toutefois de la vaste étendue des valeurs possibles des modules E_j^0 définissant le fonctionnement d'une chaussée, il est souhaitable d'utiliser des indicateurs des variations *relatives* de module. Ainsi, une variation de quelques dizaine de MPa est significative pour une plateforme mais négligeable pour un matériau lié comme les matériaux bitumineux ou hydrauliques. A l'intérieur même d'une couche bitumineuse, le module peut également varier le long d'un itinéraire au cours d'une même campagne du simple au double pour une variation de température de quelques degrés en plus ou en moins.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Nous proposons d'introduire à cet effet, des indicateurs I_{Nj} que nous appellerons « normalisés », construits à partir des indicateurs I_j et tels que leurs variations s'inscrivent de -0.5 à 1 pour ΔE_j^0 allant de $\frac{E_j^0}{2}$ à E_j^0 ou encore pour E_j compris entre $\frac{E_j^0}{2}$ et $2E_j^0$ (Figure III-13).

L'indicateur normalisé est défini par les expressions :

Si $I_j(\mathbf{w}_{mes}(x_c, \bullet)) > 0$ alors :

$$I_{Nj}(\mathbf{w}_{mes}(x_c, \bullet)) = \frac{I_j(\mathbf{w}_{mes}(x_c, \bullet))}{\Lambda_j(\mathbf{w}_{cal}(\bullet, \{E_k^0(1 + \delta_{kj})\})) - \Lambda_j(\mathbf{w}_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}))} \quad (\text{III.20})$$

Si $I_j(\mathbf{w}_{mes}(x_c, \bullet)) < 0$ alors :

$$I_{Nj}(\mathbf{w}_{mes}(x_c, \bullet)) = -0.5 \frac{I_j(\mathbf{w}_{mes}(x_c, \bullet))}{\Lambda_j(\mathbf{w}_{cal}(\bullet, \{E_k^0(1 - \frac{\delta_{kj}}{2})\})) - \Lambda_j(\mathbf{w}_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}))} \quad (\text{III.21})$$

avec $\delta_{kj}=0$ pour $k \neq j$ et $\delta_{jj} = 1$

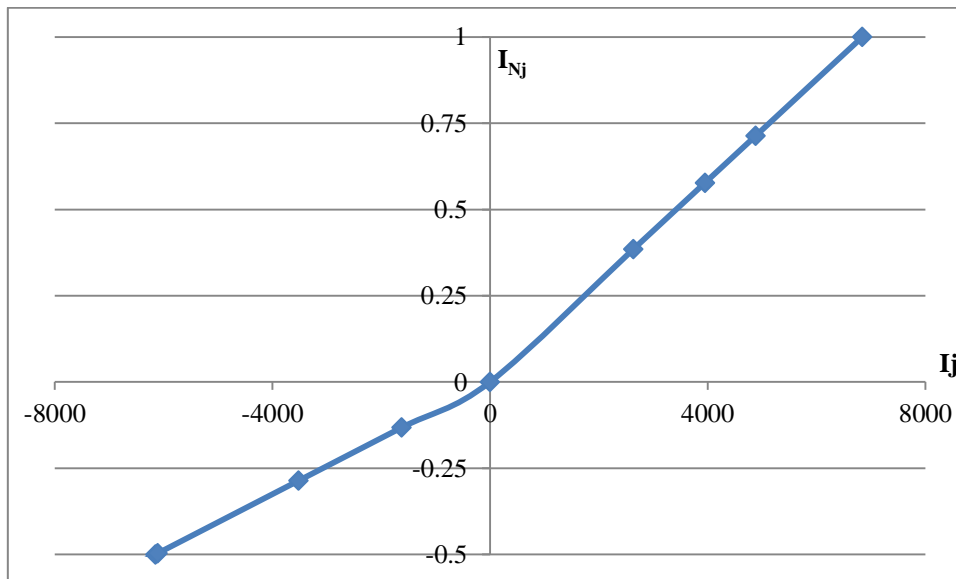


Figure III-13 : Visualisation de l'indicateur normalisé I_{Nj} en fonction de l'indicateur I_j

Ces indicateurs présentent l'avantage de couvrir d'assez larges plages de variations de module. Par contre, il est à noter que leur définition s'écarte sensiblement du cadre de construction des intégrales Λ_j défini au départ pour de faibles variations relatives de modules autour de $\{E_j^0\}$. Il ne faut donc pas s'attendre à ce que la propriété d'orthogonalité entre de tels indicateurs soit bien respectée sur la totalité de telles plages de variations de modules. Le

caractère « affine » des variations de I_{Nj} avec E_j ne peut également être satisfait (Figure III-14).

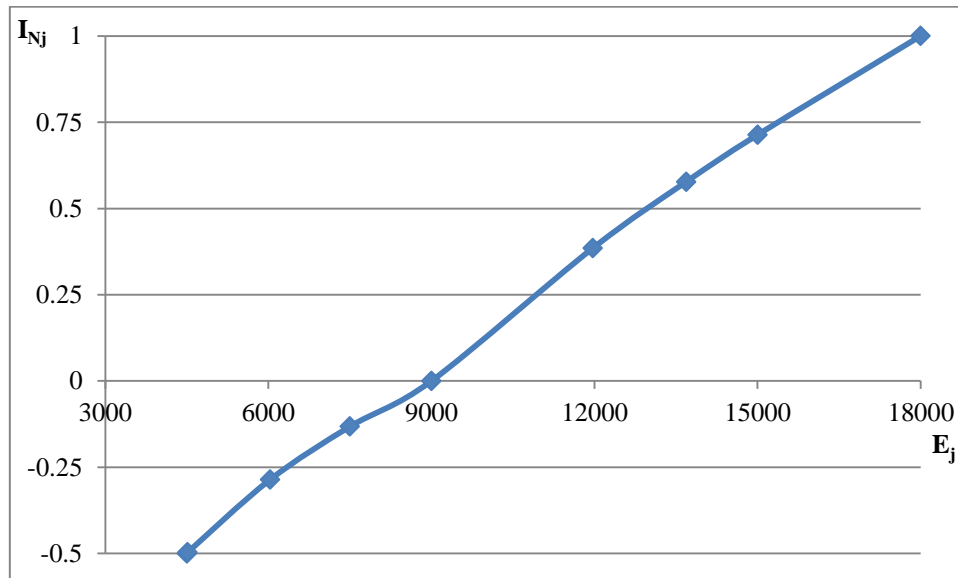


Figure III-14: Exemple de variations de I_{Nj} en fonction de E_j (Calcul effectué pour $I_{Nj}(w_{cal}(\bullet, \{E_1^0, \dots, E_{j-1}^0, E_j, E_{j+1}^0, \dots, E_n^0\}))$ chaussée bitumineuse.

III.4.1.1.3 Calcul effectif des fonctions p_j associées aux modules de couches

Afin de procéder au calcul effectif des fonctions p_j et des indicateurs I_j et I_{Nj} pour une structure de chaussée et des modules $\{E_k^0\}$ donnés, nous nous sommes appuyés sur les logiciels ALIZE et CESAR et avons développé, pour chacun d'entre eux, des scripts de mise en œuvre automatique en VBA sous Excel (script « Ind_ALIZE ») ou en VBA et C++ (script « Ind_CESAR »).

Les données d'entrée de ces scripts sont :

- N = nombre de couches de la structure de référence ;
- n = nombre d'indicateurs considéré, égal à N ou inférieur à celui-ci si l'on décide de ne pas faire varier le module de certaines couches (couches à modules bloqués);
- $\{E_i^0, E_i^{bloqué}\}$ = valeurs des modules de la structure de référence;
- $\{h_i\}$ = valeurs des épaisseurs des couches ;
- Type_appareil = *Cur*(curviamètre), *F*(déflectoraphe Flash) ou *FWD* en fonction de l'appareil considéré;
- n_b = nombre de bassins de déflexion mesurés à exploiter;
- Pour chacun des bassins précédents : $x_c, \{w_{mes}(x_c, x'_v \alpha)\}$ pour α variant de 1 au nombre de mesures n_{mesure} enregistrées par l'appareil à chaque position du capteur de mesure.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Par ailleurs, les scripts contiennent les valeurs numériques des paramètres attachés à chacun des appareils, à savoir :

- a, b = abscisses extrêmes du positionnement du véhicule dans le repère du capteur de déflexion ;
- $\Delta x'_v$ = pas de mesure longitudinal de l'appareil ;
- Les éléments nécessaires aux calculs des bassins mesurés par les appareils (principe de mesure des appareils, positionnement des centres de charges dans le repère (O, x'_v, y) et leurs intensités (cf Chapitre II), ...).

Les scripts Ind_ALIZE et Ind_CESAR comportent chacun un programme principal et un certain nombre de sous-programmes.

Le programme principal effectue en première opération le calcul des fonctions $\{p_j\}$ puis le calcul des valeurs des indicateurs $\{I_j\}$ et $\{I_{Nj}\}$ pour chacun des bassins mesurés.

Les sous-programmes permettent entre autre :

- de déterminer le bassin de déflexion $w_{cal}(\bullet, \{E_i\})$ tel que mesuré par les appareils pour un jeu de valeurs $\{E_i\}$ quelconque.
- de déterminer les bassins $\frac{\partial w_{cal}}{\partial E_j}$ par différences finies entre les bassins calculés pour $\{E_k^0(1 + \varepsilon\delta_{jk})\}$ et pour $\{E_k^0\}$ soit :

$$\frac{\partial w_{cal}}{\partial E_j} \approx \frac{w_{cal}(\bullet, \{E_k^0(1 + \varepsilon\delta_{jk})\}) - w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})}{E_j^0 \varepsilon}$$

Les champs de modules $\{E_i\}$ considérés dans ces calculs étant homogènes par couche, les calculs peuvent être effectués indifféremment par ALIZE ou CESAR (le script faisant appel à CESAR va toutefois servir plus loin à examiner l'incidence théorique sur les indicateurs de défauts localisés et également servir à construire précisément des indicateurs spécifiques de défauts localisés).

Pour la génération des bassins de déflexion utiles aux calculs, le script Ind_ALIZE construit automatiquement les jeux de données utiles au programme ALIZE, lance l'exécutable de ce programme et récupère les données ainsi générées sous forme de fichiers Excel pour leur traitement ultérieur.

Pour la même opération, le script Ind_CESAR commence par générer le maillage de la structure de référence par appel à la procédure LICESAR du LAMES puis génère le jeu de données de calcul CESAR avant de lancer l'exécutable CESAR.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

La résolution des systèmes linéaires $\mathcal{BA}_j = \mathbb{I}_j$ est effectuée par appel aux fonctions proposées dans VBA.

Les calculs d'intégrales sont effectués par la méthode des trapèzes à pas constants.

Les scripts incluent la vérification systématique de l'orthogonalité des fonctions p_j ainsi que la vérification des conditions $I_j \left(\mathbf{w}_{cal}(\bullet, \{E_k^0(1 + \varepsilon\delta_{jk})\}) \right) \approx E_j^0 \varepsilon$.

III.4.1.2 Indicateurs optimisés à grand rendement pour interfaces : positionnement du problème

Précédemment, on a considéré les interfaces collées ou glissantes en supposant donnés leurs états. Cependant, cette information n'est pas nécessairement vraie et les interfaces peuvent se situer dans un état intermédiaire entre ces deux états extrêmes.

Nous allons donc nous intéresser ici au développement d'indicateurs d'état spécifiques aux interfaces qui jouent un rôle crucial dans le comportement global des chaussées. On verra plus loin l'articulation de leur usage avec celui des indicateurs de couches développés précédemment.

Au final, nous avons adopté cette approche dans les deux scripts pour le calcul des indicateurs d'interfaces.

III.4.1.2.1 Définition et calcul des indicateurs optimisés

On considère à présent le modèle de chaussée multicouche considéré en section III.4.1.1 supposé représentatif des chaussées réelles, enrichi par la présence de « couches d'interfaces élastiques » d'épaisseur forfaitaire h_{int} . Le positionnement et le nombre de celles-ci peuvent être limités aux interfaces pour lesquelles des désordres sont soupçonnés. Les autres interfaces peuvent continuer à être considérées comme collées ou glissantes et modélisées en tant que tel. Nous allons alors chercher à développer des indicateurs d'interfaces destinés à évaluer les raideurs k_{int} des interfaces modélisées par couches minces et à situer celles-ci entre états collé et décollé.

Pour ce faire, on adopte des définitions et principes de calcul similaires à ceux des indicateurs de couches. On raisonne sur la structure multicouche de référence de la Figure III-10 au voisinage d'un jeu de paramètres $\{E_j^0\}, \{E_j^{bloqué}\}, \{k_{int j}^0\}$ supposé représentatif du comportement de la chaussée auscultée (Figure III-15).

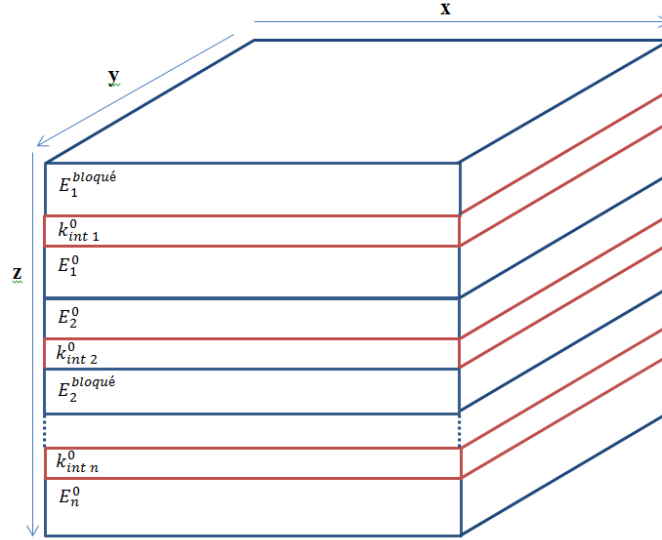


Figure III-15 : Structure multicouche de référence au voisinage d'un jeu de paramètres $\{E_j^0\}, \{E_j^{bloqué}\}, \{k_{int j}^0\}$.

On introduit pour l'interface n° j la forme linéaire $\Lambda_{int j}$, fonction des bassins mesurés:

$$\Lambda_{int j}(\mathbf{w}_{mes}(x_c, \bullet)) = \int_a^b p_{int j}(x'_v) \mathbf{w}_{mes}(x_c, x'_v) dx'_v \quad (\text{III.22})$$

dont on va chercher à maximiser la sensibilité vis-à-vis de la raideur $k_{int j}$ et à la minimiser vis-à-vis des autres paramètres de la structure de référence.

$p_{int j}(x'_v)$ est la fonction de pondération de l'indicateur $I_{int j}$ à déterminer.

Le calcul de ces fonctions suit la même démarche que celle du calcul des fonctions p_j . Les dérivées partielles par rapport aux raideurs $k_{int j}$ sont calculées par différences finies en faisant varier les modules $E_{int j}$.

Par construction, la quantité $\Lambda_{int j}$ est insensible au voisinage du jeu de données $\{E_k^0\}, \{E_k^{bloqué}\}, \{k_{int k}^0\}$ aux variations de ces paramètres autres que $\Delta k_{int j}$ et est telle que :

$$\Lambda_{int j}(\mathbf{w}_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}, \{E_k^{bloqué}\}, \{k_{int k}^0 + \Delta k_{int j} \delta_{kj}\})) - \Lambda_{int j}(\mathbf{w}_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}, \{E_k^{bloqué}\}, \{k_{int k}^0\})) \approx \Delta k_{int j}$$

pour $\Delta k_{int j}$ petit.

Dans les applications suivantes, les valeurs de référence $k_{int j}^0$ sont choisies pour représenter des états collés.

III.4.1.2.2 Normalisation des indicateurs d'interfaces

Afin de mieux cerner les états d'interface à partir des valeurs des quantités $\Lambda_{int j}$, il est possible de définir par relation affine à partir de celles-ci, des indicateurs d'interfaces normalisés entre 0 et 1 tendant vers 1 à l'état glissant et vers 0 à l'état collé.

Ces indicateurs sont définis à partir des valeurs $\Lambda_{int j}(collé)$ et $\Lambda_{int j}(glissant)$ de $\Lambda_{int j}$, calculées pour les structures collée $\{E_k^0\}, \{E_k^{bloqué}\}, \{k_{int k} = k_{int k}^0 \text{ pour } k \neq j; k_{int j} = "+ \infty"\}$ et glissante $\{E_k^0\}, \{E_k^{bloqué}\}, \{k_{int k} = k_{int k}^0 \text{ pour } k \neq j; k_{int j} = "0"\}$.

On pose ainsi :

$$I_{Nint j}(\mathbf{w}_{mes}(x_c, \bullet)) = \frac{\Lambda_{int j}(collé) - \Lambda_{int j}(\mathbf{w}_{mes}(x_c, \bullet))}{\Lambda_{int j}(collé) - \Lambda_{int j}(glissant)}$$

III.4.2 Etude du comportement des indicateurs sur des bassins de déflexion théoriques

III.4.2.1 Exemple de calcul de fonctions p_j et comparaison de l'indicateur I_j avec les indicateurs classiques

L'objectif de cette partie est d'illustrer la validation des indicateurs sur des cas théoriques et d'étudier leur domaine de validité. Dans ce chapitre, la variation de module des couches de chaussées et l'évaluation du glissement d'interface sont effectuées pour les trois structures de chaussées étudiées (souple, bitumineuse épaisse, mixte). Dans un premier temps, on s'intéresse aux fonctions de pondération p_j générées, utiles à la construction des indicateurs. Ensuite, l'étude se penche sur la sensibilité des indicateurs optimisés I_j , sur la comparaison avec les indicateurs classiques et sur l'influence d'un changement de modules de couches sur ces indicateurs et sur leur ordre d'utilisation.

III.4.2.1.1 Sensibilité des indicateurs à une Variation générale ou locale de modules

Cette étude décrit la construction d'indicateurs capables de détecter des variations généralisées ou locales de module d'une couche bitumineuse ou de la plateforme. Le travail est conduit à partir des structures étudiées dans la partie 1 de ce chapitre

III.4.2.1.1.1 Effet d'une variation générale de module de la couche bitumineuse ou de la plateforme

Dans cette partie, on s'intéresse à la variation de module de la couche bitumineuse $n^{\circ}2$ ou de la plateforme. On suppose que les modules de la couche bitumineuse varient entre 3000 MPa (module à 30 °C) et 13685 MPa (module à 5 °C) et les modules de la plateforme varient de 20 MPa (PF1) à 200 MPa (PF4).

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

La Figure III-16 présente les fonctions de pondération générées pour la construction de l'indicateur pour la structure bitumineuse. $P_B(x)$ représente la fonction de pondération pour une variation de module de la couche bitumineuse $n^{\circ}2$ et $P_P(x)$ celle obtenue pour une variation de module de la plateforme. Ces fonctions sont construites d'après l'équation (III.14) en considérant les quatre couches de la structure bitumineuse et les modules de référence du Tableau III-1. Bien que les niveaux de valeurs soient différents, les deux fonctions de pondération présentent des formes à peu près inversées. Elles mettent davantage de poids sur les niveaux de déflexion sous le centre de la charge et également à environ 1 m de distance de la charge. Les hypothèses des appareils influencent ces fonctions puisque celles-ci sont nulles soit à 3 m de la charge (pour le curviamètre) soit à 1.5 m (pour le déflectographe Flash).

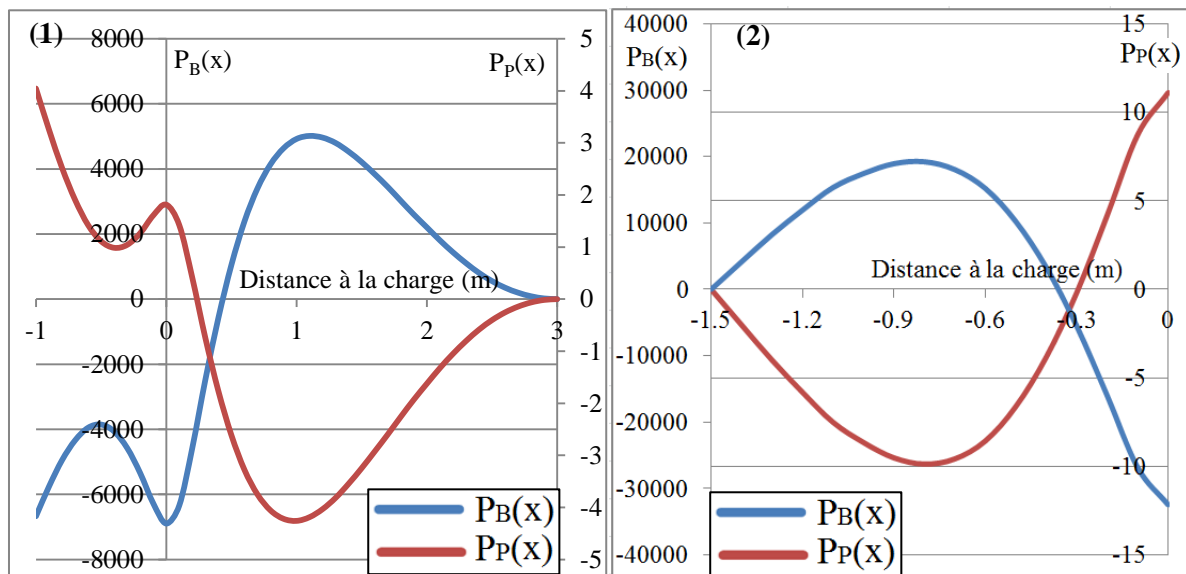


Figure III-16 : Fonctions de pondération créées pour les variations de module des couches – (1) Curviamètre – (2) Déflectographe Flash.

La Figure III-17 compare les fonctions de pondération $P_P(x)$, liées à la plate-forme, déterminées pour les trois structures de l'étude, pour le déflectographe Flash et le curviamètre. Les fonctions de pondération construites pour les chaussées bitumineuses et souples ont des formes très semblables et des valeurs légèrement différentes pour les deux appareils. Les courbes paraissent bien stables sur l'ensemble du bassin de déflexion.

En ce qui concerne la chaussée mixte, les fonctions de pondération déterminées sont nettement moins stables, avec la présence de nombreuses fluctuations. De plus, les niveaux des fonctions de pondération obtenus pour la chaussée mixte sont nettement différents de ceux obtenus pour les deux autres chaussées. Cela s'explique largement par les bassins de déflexions obtenus sur ce type de chaussées, qui présentent des niveaux de déflexion très faibles et pour lesquelles les biais de mesure engendrés par les appareils peuvent même conduire à des déflexions négatives sur une partie du bassin.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Des conclusions similaires ont été obtenues pour les fonctions de pondération $P_B(x)$, construites pour la couche bitumineuse n°2.

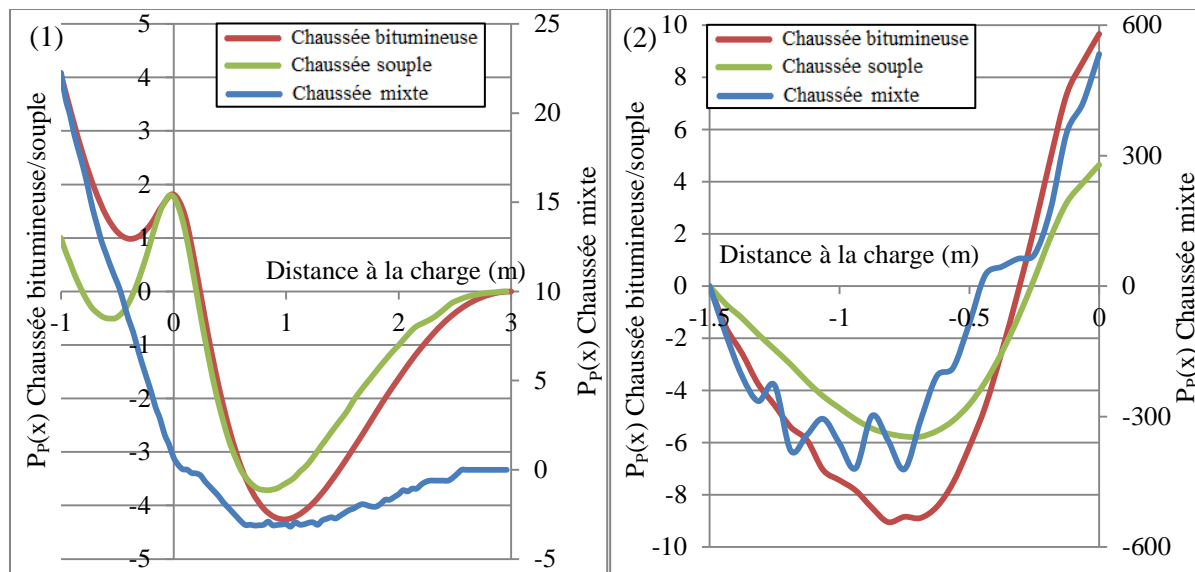


Figure III-17 : Comparaison des fonctions de pondération $P_P(x)$ calculées sur chaussée bitumineuse, souple et mixte – Curviamètre (1) – Déflectographe Flash (2).

La Figure III-18 présente les valeurs des indicateurs normalisés I_{NB} et I_{NP} pour le curviamètre (rouge) et le déflectographe Flash (bleu) pour la chaussée bitumineuse. Par construction, les indicateurs calculés pour la structure de référence (avec des modules de 9000 MPa et 50 MPa respectivement pour la couche bitumineuse et pour la plateforme) sont nuls. De même, pour des modules égaux à deux fois le module de référence (soit 18000 MPa pour la couche bitumineuse et 100 MPa pour la plateforme), les indicateurs sont égaux à 1. Enfin, pour des modules deux fois plus faibles que ceux de référence, (4500 MPa pour la couche bitumineuse et 25 pour la plateforme), I_{NB} ou I_{NP} sont égaux à -0.5 . On peut voir que les indicateurs normalisés évoluent dans le même sens que les valeurs des modules des couches. Une diminution de l'indicateur est corrélée avec une diminution du module de la couche. Pour les deux appareils, les indicateurs normalisés sont environ du même ordre. La sensibilité des indicateurs aux variations de module des couches est satisfaisante, puisque pour un module de la couche bitumineuse de 13685 MPa , I_{NB} varie entre 0.58 et 0.61 selon l'appareil ce qui correspond à un module variant entre 14220 MPa et 14490 MPa . L'écart avec le module théorique est donc inférieur à 6% . Les mêmes constatations sont observées pour les modules de la plateforme.

Pour un module de 3000 MPa , l'indicateur I_{NB} est égal à -0.83 pour le curviamètre et -0.92 pour le déflectographe Flash. Ceci correspond à un module de la couche bitumineuse de 1530 MPa ou 720 MPa selon l'appareil. L'écart avec le module est supérieur à 48% . Cependant, au-delà de 1 ou en deçà de -0.5 , on n'est plus dans l'hypothèse de construction de l'indicateur qui suppose que l'on se situe au voisinage du module de référence et que la variation de l'indicateur est linéaire. Cela peut expliquer pourquoi on obtient des valeurs moins précises.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Pour les structures souple et mixte, on obtient des profils comparables des indicateurs normalisés I_{NB} et I_{NP} pour le déflectographe Flash et le curviamètre.

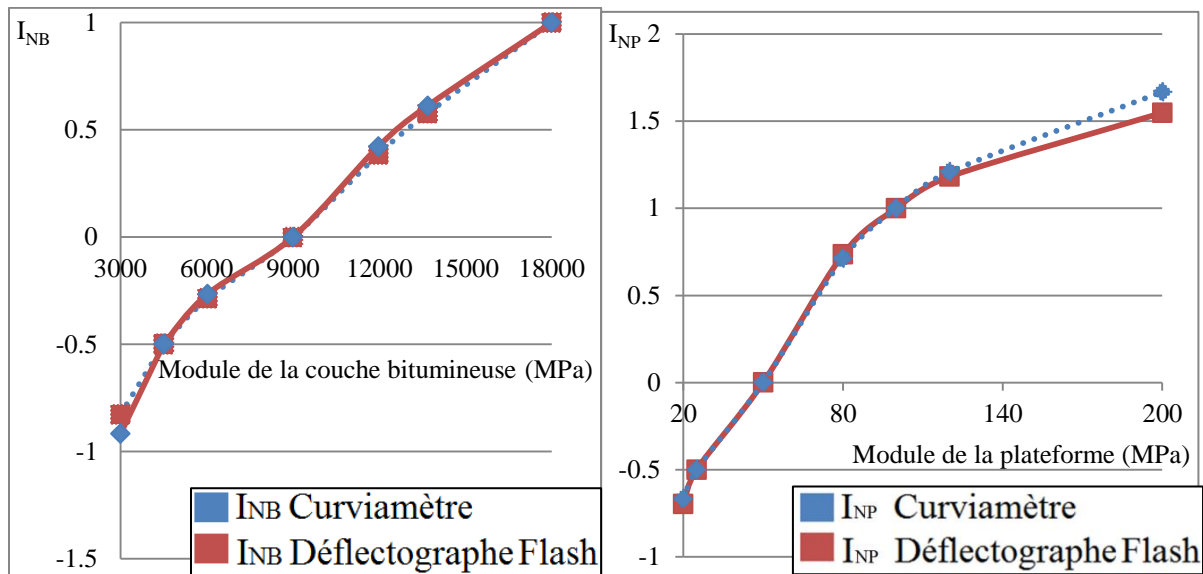


Figure III-18 : Comparaison des indicateurs normalisés calculés avec les deux appareils pour la chaussée bitumineuse – I_{NB} (1) et I_{NP} (2)

L'étude a été poursuivie en étudiant l'évolution des indicateurs pour des variantes des structures précédentes. On a ainsi fait varier les modules de la couche bitumineuse pour différents niveaux de plateforme. On a gardé les mêmes fonctions de pondération, et on a cherché à observer l'effet conjugué de la variation des deux modules. Bien que le travail ait été réalisé pour les deux appareils, seules les données relatives au curviamètre sont présentées.

La Figure III-19 présente, pour différents niveaux de plateforme, l'évolution de l'indicateur I_B correspondant à une modification du module de la couche bitumineuse et pour différentes valeurs de module du matériau bitumineux, l'évolution de I_P en fonction d'une variation de module de la plateforme.

Les courbes d'évolution de l'indicateur I_B dépendent du module de la plateforme. Si pour une plateforme de 50 MPa, on retrouve la structure de référence avec un indicateur nul pour une valeur de module de la couche bitumineuse de 9000 MPa, une augmentation de portance de la plateforme conduit à une translation vers le haut des courbes. Celles-ci surestiment ainsi le module apparent de la couche bitumineuse. Ce décalage peut néanmoins être évité si on dispose d'une bonne estimation du module de la plateforme.

Les courbes de l'indicateur I_P se superposent pour les différents modules de matériau bitumineux. L'indicateur est donc bien indépendant du module de ce matériau. On vérifie que l'indicateur I_P est nul pour un module de la plateforme de 50 MPa, considéré comme référence.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Dans la pratique, il faudra sans doute ajuster d'abord le niveau de plateforme à partir de l'indicateur I_P puis calculer l'indicateur I_B . Pour cela, il faudra recalculer les fonctions de pondération avec ce niveau de portance de plateforme corrigé. Ainsi, l'indicateur I_B sera effectivement représentatif des variations de modules de la couche bitumineuse autour de cette référence.

On peut également noter qu'en dehors du domaine de linéarité $\left[\frac{1}{2}E_j^0, 2E_j^0\right]$, les valeurs de I_j ne peuvent plus s'interpréter en variation de module car nous ne sommes plus au voisinage de la structure de référence.

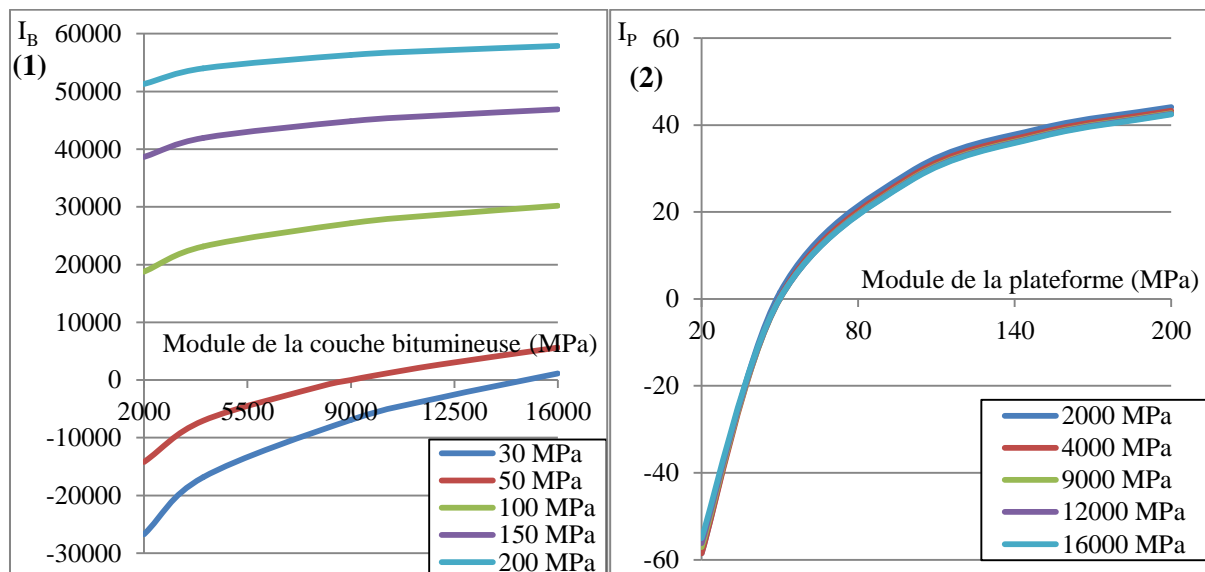


Figure III-19 : Evolution de (1) - l'indicateur I_B en fonction d'une modification du module de la couche bitumineuse pour différents modules de la plateforme et de (2) - l'indicateur I_P en fonction d'une modification de la plateforme pour différents modules de la couche bitumineuse- Chaussée bitumineuse .

La Figure III-20 présente la sensibilité des indicateurs normalisés I_{NB} et I_{NP} à des changements de modules des autres couches de la chaussée. Cette figure montre que l'indicateur normalisé I_{NP} , déjà insensible aux variations des modules de la seconde couche bitumineuse, n'est pratiquement pas affecté par des modifications de la valeur du module de la couche de surface ou de la troisième couche bitumineuse. Ceci est en accord avec la construction des indicateurs, qui suppose l'orthogonalité des fonctions de pondération.

Par contre, on peut voir que l'indicateur I_{NB} , déjà sensible à des variations de module de la plateforme, est également affecté par une modification des modules de la couche de surface ou de la couche bitumineuse n°3. Ces conclusions sont vraies pour les deux appareils d'auscultation de l'étude. Il semble donc nécessaire d'évaluer la sensibilité des indicateurs à des variations de modules des couches et ainsi de définir un ordre d'utilisation des indicateurs.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

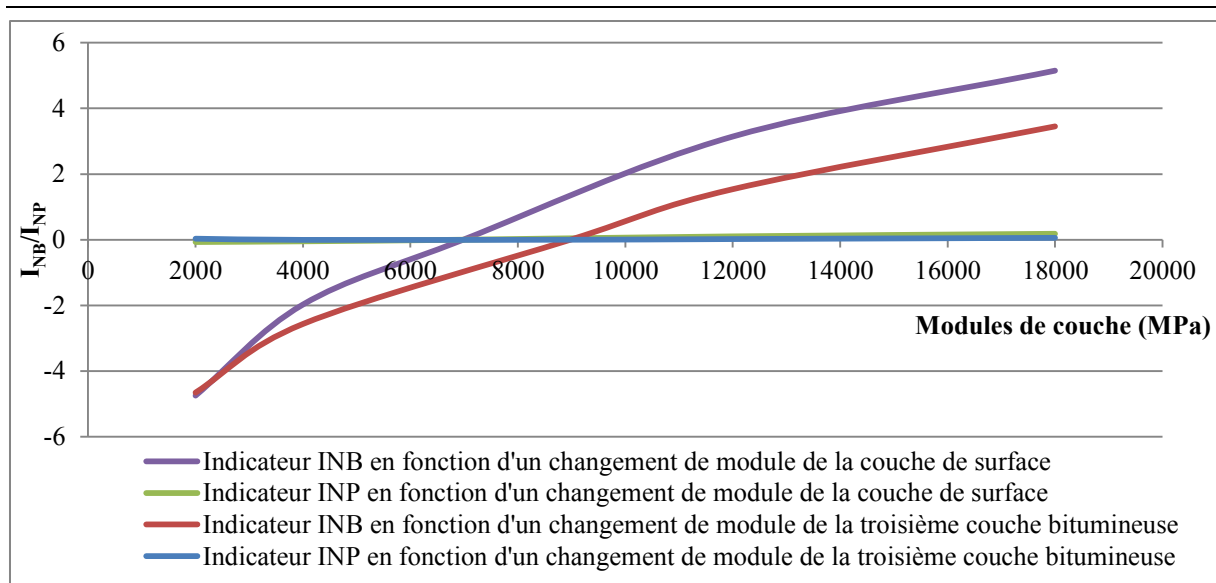


Figure III-20 : Sensibilité des indicateurs normalisés à un changement de modules des couches de la chaussée bitumineuse étudiée.

Pour l'exemple de la Figure III-20, l'indicateur I_{NP} , insensible aux variations de modules de toutes les couches de chaussée, sera calculé en premier puis il sera nécessaire de caler les modules de la couche de surface et de la couche bitumineuse n°3 pour correctement déterminer l'indicateur I_{NB} .

On observe les mêmes phénomènes sur les trois structures. L'indicateur portant sur le module de la couche bitumineuse est sensible à un écart de module de la plateforme ou des autres couches bitumineuses.

Une fois le calage de la plateforme effectué, le signe de l'indicateur I_B est cohérent avec l'état des trois couches bitumineuses présentes. Ainsi, un signe négatif est bien révélateur d'un module plus faible de l'une des couches et un signe positif montre bien une rigidité plus grande de l'ensemble de ces trois couches.

Enfin, une dernière analyse a été conduite pour comparer la sensibilité des indicateurs classiques et des nouveaux indicateurs optimisés proposés dans cette thèse, à une variation de module de couche. La Figure III-21 présente une comparaison des indicateurs I_P et I_B calculés pour le curviamètre et le deflectographe Flash avec les indicateurs « classiques » : déflexion maximale, valeur maximale de la pente du bassin, rayon de courbure, BLI, MLI et LLI. Ces indicateurs classiques ont été calculés à partir des mesures de déflexion corrigées. Les indicateurs ont tous été normalisés pour être égaux à 1 pour la valeur de module la plus faible considérée.

D'après cette figure, les variations de l'ensemble des indicateurs sont plus importantes pour un changement de module de la plateforme que pour un changement du module de la couche bitumineuse. On observe également que les indicateurs classiques sont nettement moins sensibles aux variations de modules que les indicateurs optimisés. En effet, alors que les valeurs des indicateurs classiques varient entre 1 et 0.72 pour un défaut des matériaux

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

bitumineux et entre 1 et 0.12 pour un défaut de plateforme, celles des indicateurs optimisés sont largement supérieures et vont jusqu'à -1 avec le curviamètre pour un changement de module de la plateforme.

Cette comparaison prouve donc l'intérêt des indicateurs développés et leur sensibilité accrue à la présence de défauts dans les structures de chaussées.

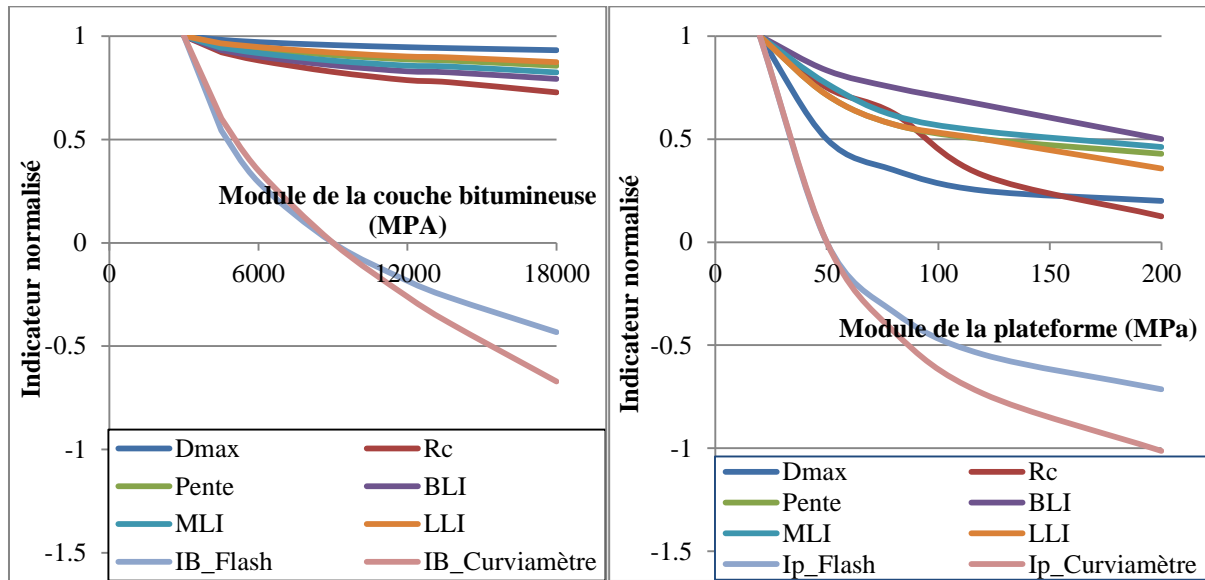


Figure III-21 : Comparaison des variations des indicateurs classiques avec les indicateurs optimisés calculés pour le curviamètre et le déflectographe Flash – (1) Comparaison pour un changement de module de la couche bitumineuse – (2) Comparaison pour un changement de module de la plateforme.

III.4.2.1.1.2 Effet d'une variation locale de module de la couche bitumineuse ou de la plateforme

Le long d'un itinéraire, on a simulé des mesures du curviamètre et du déflectographe Flash réalisées par pas de 0.1 m sur une structure bitumineuse. Pour cette structure, on a supposé que le module de la plateforme ou de la couche bitumineuse n°2 diminue avec l'avancement de l'appareil (de 9900 MPa à 8400 MPa pour la couche bitumineuse et de 59 MPa à 44 MPa pour la plateforme). La Figure III-22 présente les variations des modules dans les couches le long de la section. Les modules des deux couches varient tous les 2 m entre 5 m et 25 m.

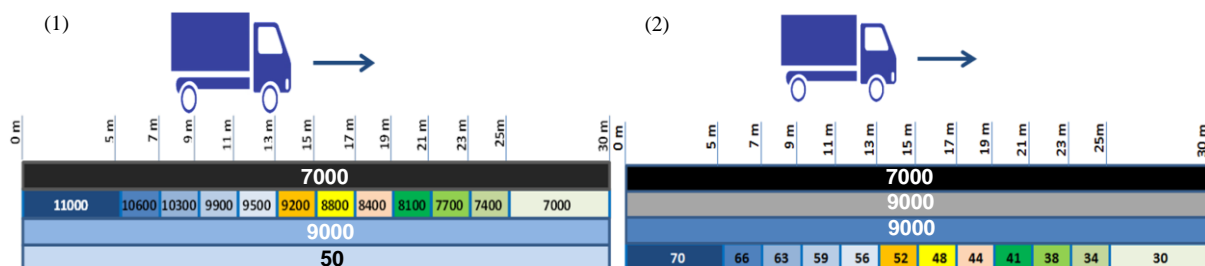


Figure III-22 : Hypothèses d'évolution des modules des couches de la couche bitumineuse (1) et de la plateforme (2) – Structure bitumineuse.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Cette hypothèse de variation de modules des couches a été définie pour valider les indicateurs, mais n'est pas forcément représentative de l'état de chaussées réelles. Pour ces structures, les variations du bassin de déflexion sont très faibles et la détection de ces variations de module par les indicateurs classiques n'est pas possible.

Les mêmes fonctions de pondération, définies dans la Figure III-16, ont été utilisées ici pour déterminer les indicateurs correspondant à une variation locale de module.

La Figure III-23 présente l'évolution des indicateurs I_B et I_P calculés pour le curviamètre et le déflectographe sur l'itinéraire. I_B est déterminé à l'aide de la fonction de pondération $P_B(x)$ et des bassins mesurés pour une variation du module de la couche bitumineuse. I_P est construit à l'aide de la fonction de pondération $P_P(x)$ et des bassins mesurés pour une variation du module de la plateforme.

Les indicateurs I_B calculés pour le curviamètre et le déflectographe sont presque semblables sur l'itinéraire. Ils suivent très bien les paliers de module de la couche bitumineuse et décroissent le long de la section. Par construction, les indicateurs I_B sont nuls pour la valeur de module de référence (9000 MPa). Cette hypothèse est respectée pour les deux appareils, puisqu'ils sont égaux à 0 à 15 m, soit dans la zone où le module varie entre 9200 MPa et 8800 MPa. D'autre part, cette variation de 400 MPa de module de la couche bitumineuse se traduit par un écart de 400 de I_B . Contrairement aux indicateurs classiques, l'indicateur optimisé permet donc de détecter les zones de variations de module et même de les quantifier.

L'indicateur I_P décroît avec la baisse de module de la plateforme. Pour I_P , les courbes obtenues avec les deux appareils présente un décalage de 2 m correspondant à l'écart de la position du capteur en fin de mesure. Le changement de plateforme affecte une zone plus étendue du bassin de déflexion. De plus, pour le Flash, le bassin de déflexion est relevé avant l'essieu arrière tandis que celui du curviamètre est principalement relevé après l'essieu arrière. Ceci peut expliquer pourquoi l'indicateur I_P est nul pour des positions différentes des appareils. Il est nul pour un module de la plateforme de 52 MPa pour le curviamètre et pour 48 MPa pour le déflectographe Flash. En prenant en compte le centre du palier, une variation du module entre 52 MPa et 48 MPa conduit à une variation d'environ 4 de I_P . Même si les variations de l'indicateur ne présentent pas une forme en escalier (contrairement à ce qui est observé pour I_B), la tendance générale d'une diminution du module est respectée.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

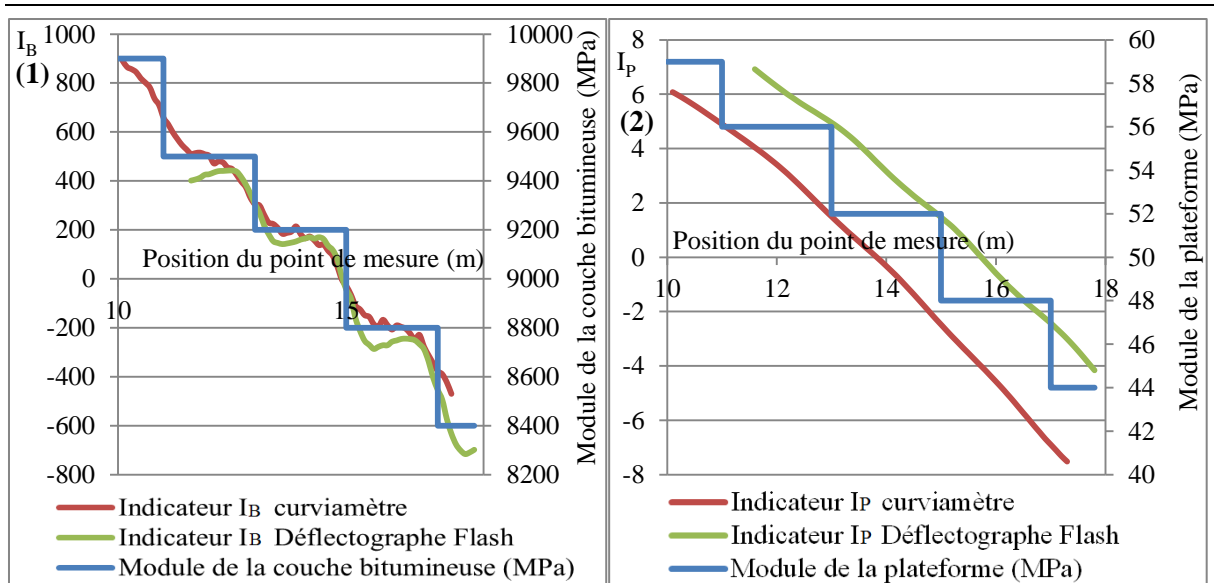


Figure III-23 : Variation de l'indicateur en fonction de l'évolution du module – (1) I_B – (2) I_P - Structure bitumineuse.

La Figure III-24 présente les variations des indicateurs normalisés I_{NB} et I_{NP} pour les mesures du déflectographe Flash. On étudie premièrement les variations des indicateurs I_{NB} pour un changement du module de la couche bitumineuse n°2 et de la plateforme puis de celles et I_{NP} pour ces mêmes changements de module.

Dans le cas d'une variation de la couche bitumineuse n°2, l'indicateur I_{NB} présente une courbe d'allure similaire à celle déterminée dans la Figure III-23. C'est normal puisque I_{NB} résulte de la normalisation de cette courbe I_B . On retrouve ainsi que pour un module de la couche bitumineuse n°2 de 9500 MPa, I_{NB} est égal à 0.05 soit un module supérieur de 5 % à celui de référence. C'est cohérent avec la valeur de 9450 MPa obtenue pour l'indicateur I_B . Dans le cas d'une variation de plateforme, la courbe représentant I_{NB} présente des fluctuations le long de l'itinéraire. Ce résultat confirme que I_{NB} est sensible aux variations de module de la plateforme et qu'il faut caler ce module au préalable.

Dans cette configuration, les oscillations de I_{NB} pour un changement de plateforme peuvent également être liées à l'éloignement de l'hypothèse de variations lentes des modules de chaussées.

Pour une variation de module de la plateforme, l'allure de I_{NP} est comparable à celle de I_P déterminé dans la Figure III-23. La diminution de cet indicateur est bien liée à une diminution du module. Dans le cas d'une variation de couche bitumineuse, l'indicateur I_{NP} , reste nul tout au long de l'itinéraire. Cet indicateur est donc bien orthogonal au module de la couche bitumineuse n°2.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

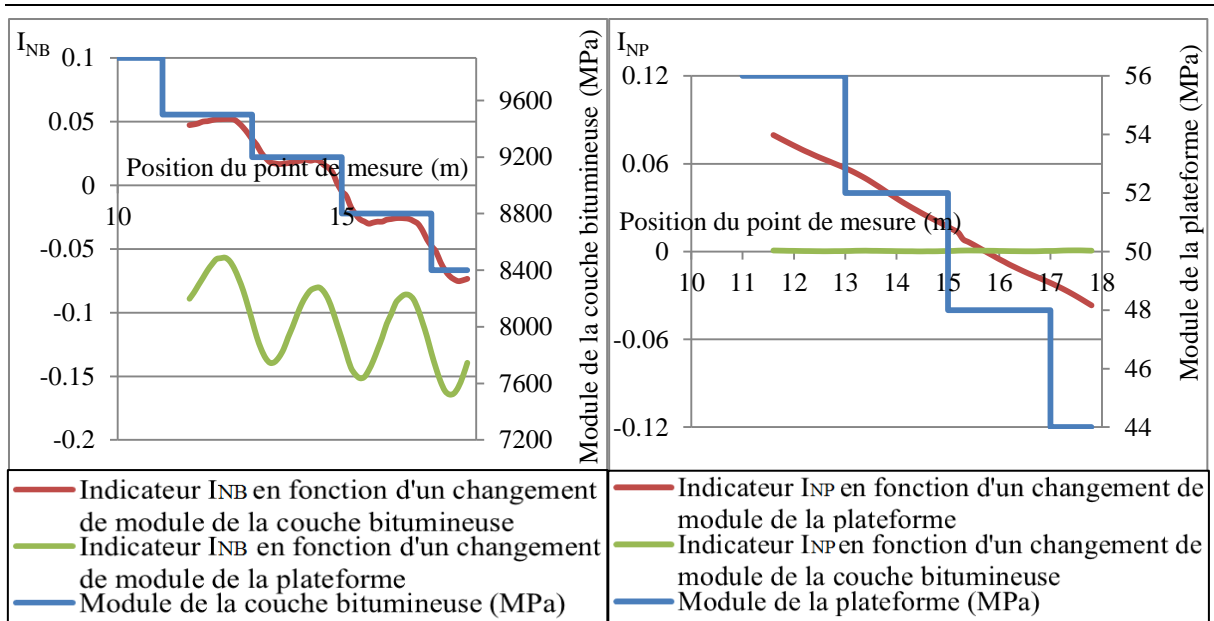


Figure III-24 : Variation de l'indicateur normalisé en fonction de l'évolution du module – (1) I_{NB} – (2) I_{NP} – Défectographe Flash - Structure bitumineuse.

Pour le curviamètre, on obtient des résultats similaires montrant que I_{NP} est quasi indépendant du module des couches bitumineuses mais que I_{NB} est sensible aux variations de module de plateforme.

Les conclusions obtenues ici rejoignent celles émises pour les défauts généralisés :

- Les indicateurs optimisés ont été développés pour détecter des évolutions de modules d'une couche donnée de la structure de chaussée.
- L'indicateur relatif à la plateforme permet de détecter une variation de portance de la plateforme tout en étant très peu sensible à une variation de module des différentes couches bitumineuses.
- L'indicateur relatif à la couche bitumineuse n°2 (couche de base), lui, garde une certaine sensibilité aux modules des autres couches bitumineuses et de la plateforme. Pour obtenir un indicateur I_B satisfaisant, un bon calage du module de la couche de surface, de la couche bitumineuse n°3 et de la plateforme est nécessaire au préalable.

L'étude a été conduite en parallèle pour les deux appareils et conduit à des conclusions similaires. Théoriquement, les deux appareils donnent des résultats tout aussi satisfaisants l'un que l'autre.

III.4.2.1.2 Effet d'une interface décollée

Cette dernière étude concerne l'évaluation des indicateurs relatifs à un décollement d'interface, et reprend le cas de décollement localisé déjà étudié dans le paragraphe §III.3.1.2. On a simulé des mesures du curviamètre et du défectographe Flash, réalisées par pas de 10 cm, sur une zone de 1 m de longueur. Des décollements d'interface ont été positionnés entre 14.2 m et 15.2 m, et à différentes profondeurs suivant la structure. Le Tableau III-10 présente les structures étudiées ainsi que les positions des plans de glissement, matérialisées par un

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

trait rouge. Un seul plan de glissement a été considéré dans chaque simulation, les autres interfaces étant supposées collées. Les indicateurs de variations de modules et d'état d'interface ont été normalisés.

Tableau III-10 : Structures de chaussée étudiées, avec plans de glissement d'interface en rouge.

| Chaussée souple | | | Chaussée bitumineuse | | | Chaussée mixte | | |
|-----------------|---------------|--------------|----------------------|---------------|--------------|----------------|---------------|--------------|
| Matériau | Epaisseur (m) | Module (MPa) | Matériau | Epaisseur (m) | Module (MPa) | Matériau | Epaisseur (m) | Modules(MPa) |
| BBSG | 0.06 | 7000 | BBSG | 0.06 | 7000 | BBSG | 0.08 | 7000 |
| GB | 0.1 | 9000 | GB | 0.08 | 9000 | GB | 0.07 | 9000 |
| GNT | 0.1 | 360 | GB | 0.08 | 9000 | GB | 0.08 | 9000 |
| GNT | 0.25 | 150 | Sol | 6 | 50 | GC | 0.23 | 23000 |
| Sol | 6 | 50 | Substratum | Infinie | 55000 | Sol | 6 | 50 |
| Substratum | Infinie | 55000 | | | | Substratum | Infinie | 55000 |

Les indicateurs reposent sur la construction des fonctions de pondération. L'interface a été modélisée par une couche mince, de 2 mm d'épaisseur, et s'étendant sur toute la longueur de la structure. Le module de ces interfaces est défini dans le Tableau III-4. Les indicateurs ont été calculés pour chacun des six cas d'interfaces décollées, et ce pour le curviamètre et le déflectographe Flash.

Ils sont déterminés suivant la méthode de calcul de fonctions de pondération donnée par l'équation (III.14).

- L'indicateur relatif à l'interface a été construit de façon à obtenir $I_{NINT j} = 1$ lorsque l'interface est parfaitement glissante sur toute la surface et $I_{NINT j} = 0$ lorsque l'interface est collée ;

La Figure III-25 présente les fonctions de pondération déterminées pour les deux profondeurs de défauts d'interface considérées. $P_{INT 1}(x)$ représente la fonction de pondération pour un décollement à la profondeur n°1 (6 cm) et $P_{INT 2}(x)$ la fonction correspondant à un défaut à la profondeur n°2 (14 cm), pour la chaussée bitumineuse. Les valeurs des deux fonctions de pondération sont différentes, mais leur forme est très semblable ; elles changent en particulier de signe à peu près à la même abscisse et donnent davantage de poids aux niveaux de déflexion obtenus sous la charge, et à environ 1 m de distance à la charge. Les fonctions dépendent aussi de l'appareil utilisé, puisqu'elles prennent une valeur nulle à 3 m de la charge pour le curviamètre et à 1.5 m de la charge pour le déflectographe Flash.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

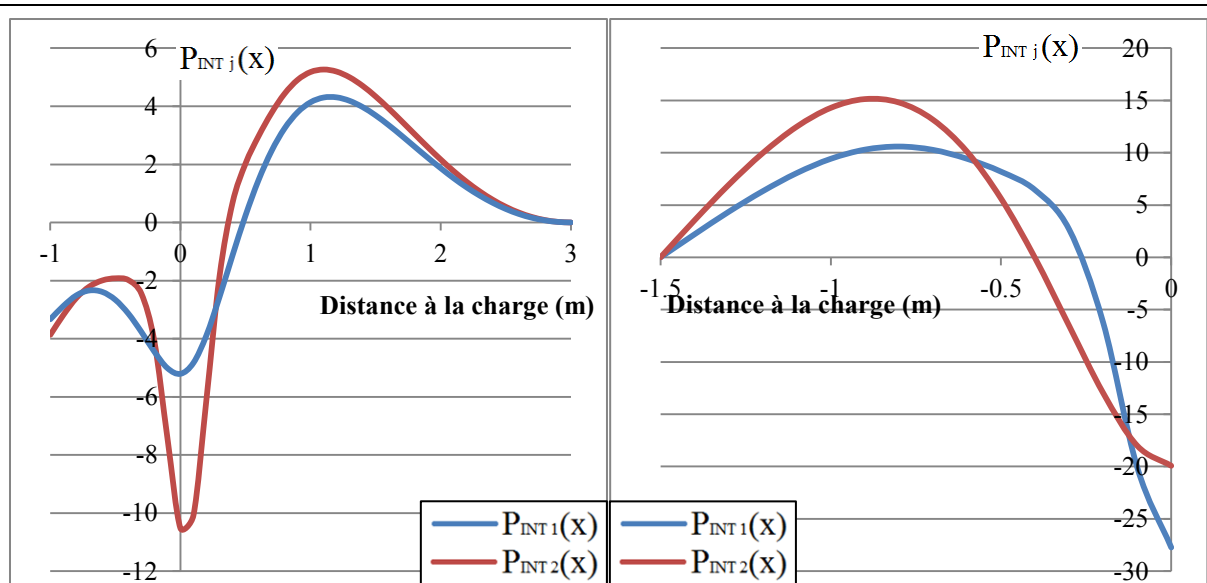


Figure III-25 : Fonctions de pondération créées pour les défauts d'interfaces – (1) Curviamètre – (2) Déflectographe Flash.

La Figure III-26 présente pour les mesures du curviamètre et du déflectographe Flash, les fonctions de pondérations déterminées pour les trois chaussées pour le défaut à la profondeur n°1 (6 cm pour les chaussées souple et bitumineuse et 8 cm pour la chaussée mixte). Pour les deux appareils d'auscultation on voit que :

- Les fonctions de pondération obtenues pour les chaussées souple et bitumineuse présentent des formes similaires, avec cependant des niveaux différents.
- Pour la chaussée mixte, la forme des fonctions de pondération est un peu différente, et elles présentent des variations plus rapides, sans doute liées à des bassins de déflexion de forme différente sur cette structure.

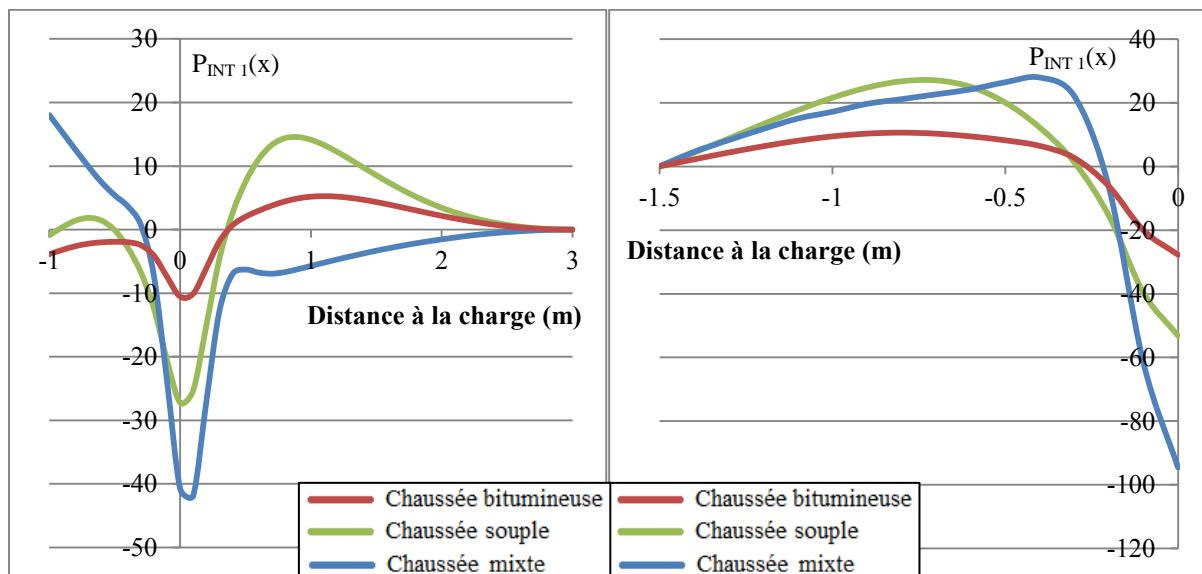


Figure III-26 : Comparaison des fonctions de pondération $P_{INT D1}$ pour les trois structures étudiées – (1) Curviamètre – (2) Déflectographe Flash (2).

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Dans un second temps, on a étudié les indicateurs calculés pour la chaussée bitumineuse avec défaut d'interface. La Figure III-27 présente les variations des deux indicateurs $I_{NINT j}$ (correspondant aux deux appareils), pour les deux cas d'interfaces dégradées.

Dans tous les cas, les indicateurs sont voisins de 0 à plus de 1 m du défaut, et leur valeur augmente et passe par un maximum dans la zone d'interface dégradée. Le maximum atteint par l'indicateur diffère selon le défaut. Ce maximum est plus faible pour le décollement le plus profond. Ce résultat est logique, car plus le décollement est proche de la surface, plus il modifie le bassin de déflexion, et donc plus l'indicateur y sera sensible. Enfin, on observe pour ces exemples que le déflectographe Flash semble plus sensible à la présence de défaut d'interface localisé que le curviamètre, conduisant à des valeurs plus élevées des indicateurs normalisés.

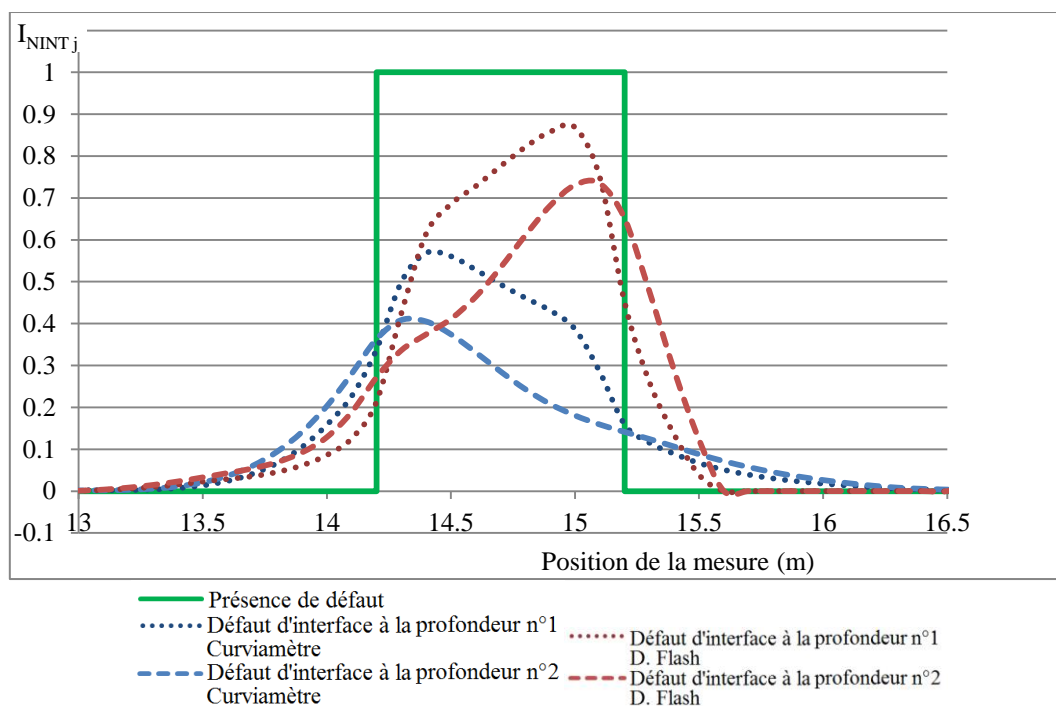


Figure III-27 : Variation de l'indicateur caractérisant un décollement d'interface en fonction de la profondeur – Curviamètre – Structure bitumineuse.

Le Tableau III-11 résume les valeurs d'indicateurs $I_{NINT j}$ calculées pour les trois structures et pour les différents défauts. Il rejoint les observations de la Figure III-27 :

- Les indicateurs $I_{NINT j}$ calculés à l'aide des fonctions de pondération restent toujours inférieurs à 1. La présence de défauts localisés est moins dommageable qu'un défaut généralisé affectant toute la structure.
- Les valeurs de l'indicateur varient entre 0 et 0.98 selon la structure et le défaut, plus le défaut est profond, moins la valeur maximale de $I_{NINT j}$ est élevée.
- Les valeurs des indicateurs obtenues pour le déflectographe Flash sont supérieures à celles obtenues pour le curviamètre.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Tableau III-11 : Indicateurs $I_{NINT j}$ calculés pour un défaut localisé pour les trois structures et pour les différentes profondeurs de défauts.

| | Curviamètre | | | Déflectographe Flash | | |
|----------------------|--|---|---|--|---|---|
| | Profondeur du décollement (6 cm : Chaussée souple et bitumineuse/ 8 cm : Chaussée mixte) $I_{NINT 1}$ | Profondeur du décollement (14 cm : Chaussée bitumineuse/ 15cm : Chaussée mixte) $I_{NINT 2}$ | Profondeur du décollement (23 cm : Chaussée mixte) $I_{NINT 3}$ | Profondeur du décollement (6 cm : Chaussée souple et bitumineuse/ 8 cm : Chaussée mixte) $I_{NINT 1}$ | Profondeur du décollement (14 cm : Chaussée bitumineuse/ 15cm : Chaussée mixte) $I_{NINT 2}$ | Profondeur du décollement (23 cm : Chaussée mixte) $I_{NINT 3}$ |
| Chaussée souple | [0;0.68] | / | / | [0;0.84] | / | / |
| Chaussée bitumineuse | [0;0.61] | [0;0.42] | / | [0;0.86] | [0;0.73] | / |
| Chaussée mixte | [0;0.71] | [0;0.42] | [0;0.18] | [0;0.98] | [0;0.85] | [0;0.63] |

III.4.2.1.2.1 Etude de la sensibilité des indicateurs à une variation de module des couches ou de l'état d'interface

On s'intéresse ici à la sensibilité des indicateurs à une variation de module ou d'état d'interface des autres couches de la chaussée. Dans un premier temps, on s'est intéressé à l'effet d'un décollement d'interface positionné à 14 cm de profondeur sur l'indicateur $I_{NINT 1}$ puis à l'effet d'un défaut d'interface positionné à 6 cm sur l'indicateur $I_{NINT 2}$.

Le Tableau III-12 présente les valeurs obtenues pour les indicateurs $I_{NINT 1}$ pour une interface glissante positionnée à 14 cm et $I_{NINT 2}$ pour une interface positionnée à 6 cm.

D'après ce tableau, on constate que l'indicateur $I_{NINT 1}$ est peu sensible à la présence d'un défaut d'interface situé à 14 cm (les valeurs obtenues sont seulement de 0.1 pour le curviamètre et de 0.18 pour le déflectographe). Par contre, l'interface positionnée à 6 cm influence plus fortement l'indicateur $I_{NINT 2}$ (les valeurs obtenues sont de l'ordre de 0.4 pour le curviamètre et de 0.3 pour le déflectographe Flash). Il semble donc nécessaire de déterminer correctement l'indicateur $I_{NINT 1}$ avant de déterminer $I_{NINT 2}$.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Tableau III-12 : Variation de l'indicateur normalisé en fonction de l'évolution du module –Structure bitumineuse.

| | Curviamètre | Défectographe Flash |
|---|-------------|---------------------|
| $I_{NINT\ 1}$ pour un changement d'état d'interface entre les couches bitumineuses 2 et 3 | 0.1 | 0.15 |
| $I_{NINT\ 2}$ pour un changement d'état d'interface entre les couches bitumineuses 1 et 2 | 0.4 | 0.3 |

Dans un second temps, on s'est intéressé à l'influence de changements de modules des couches sur les indicateurs $I_{NINT\ 1}$ et $I_{NINT\ 2}$, relatifs aux deux interfaces. La Figure III-28 présente l'évolution des indicateurs $I_{NINT\ 1}$ et $I_{NINT\ 2}$ en fonction d'un changement de module de la couche de surface, de la couche bitumineuse n°2, de la couche bitumineuse n°3 et également de la plateforme. A travers cette figure, on remarque que les indicateurs relatifs aux interfaces $I_{NINT\ 1}$ et $I_{NINT\ 2}$ sont sensibles à des variations de modules des couches bitumineuses et de la plateforme. Seules les variations de modules de la couche bitumineuse n°2 ont peu d'influence sur les valeurs des indicateurs relatifs aux interfaces.

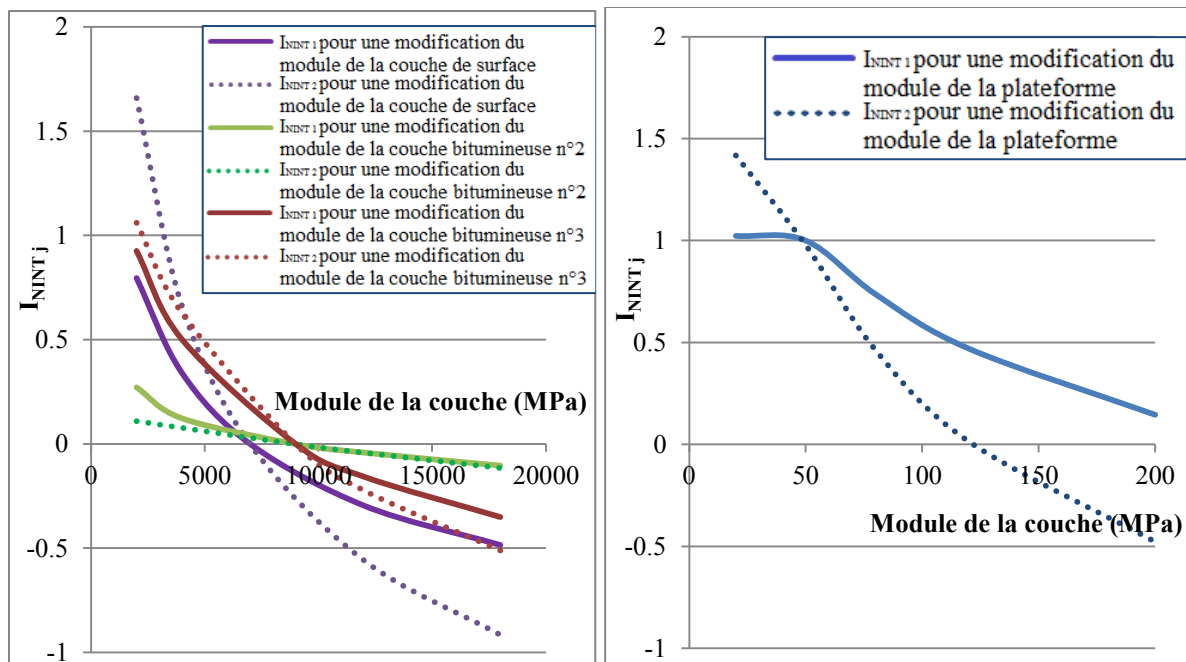


Figure III-28 : Evolution de (1) l'indicateur $I_{NINT\ j}$ en fonction d'une modification du module des couches de chaussée. (1) Couche de surface, couche bitumineuse n°2, couche bitumineuse n°3 (2) Plateforme – Curviamètre.

L'étude montre que malgré le caractère orthogonal des fonctions de pondération donné à la construction, certains indicateurs sont dépendants les uns des autres. On préconise donc d'étudier la sensibilité des indicateurs à la variation de module des couches ou de l'état de l'interface et de mettre en place un ordre de calage des indicateurs. Il semblerait tout de même que l'indicateur de portance de la plateforme est très peu sensible à des variations de modules des couches de chaussée, et peut donc toujours être déterminé en premier.

De même, sur chaussées souple et mixte, les indicateurs d'interface sont aussi influencés par une variation de module de la couche de surface ou de la plateforme.

Finalement, on s'est intéressé à l'apport des indicateurs normalisés par rapport aux indicateurs classiques. On a considéré les indicateurs issus de la procédure de correction déterminés dans l'Annexe D pour la chaussée bitumineuse. La Figure III-29 compare, pour chaque indicateur, l'écart entre la valeur de l'indicateur calculée sur chaussée saine et avec un défaut localisé.

D'après cette figure, on note que les nouveaux indicateurs optimisés sont nettement plus sensibles à la présence d'un décollement local que les indicateurs classiques. Pour les indicateurs classiques, les valeurs de l'indicateur augmentent dans un rapport 1.1 et 1.6 pour le défaut à 6 cm et dans un rapport de 1.1 à 1.5 pour le défaut à 14 cm. Pour les indicateurs optimisés, les rapports sont nettement plus importants puisqu'ils atteignent 2.4 pour le défaut à 6 cm et 2.2 pour le défaut à 14 cm. On peut aussi noter que le déflectographe Flash est un peu plus sensible à la présence de ce type de défaut que le curviamètre.

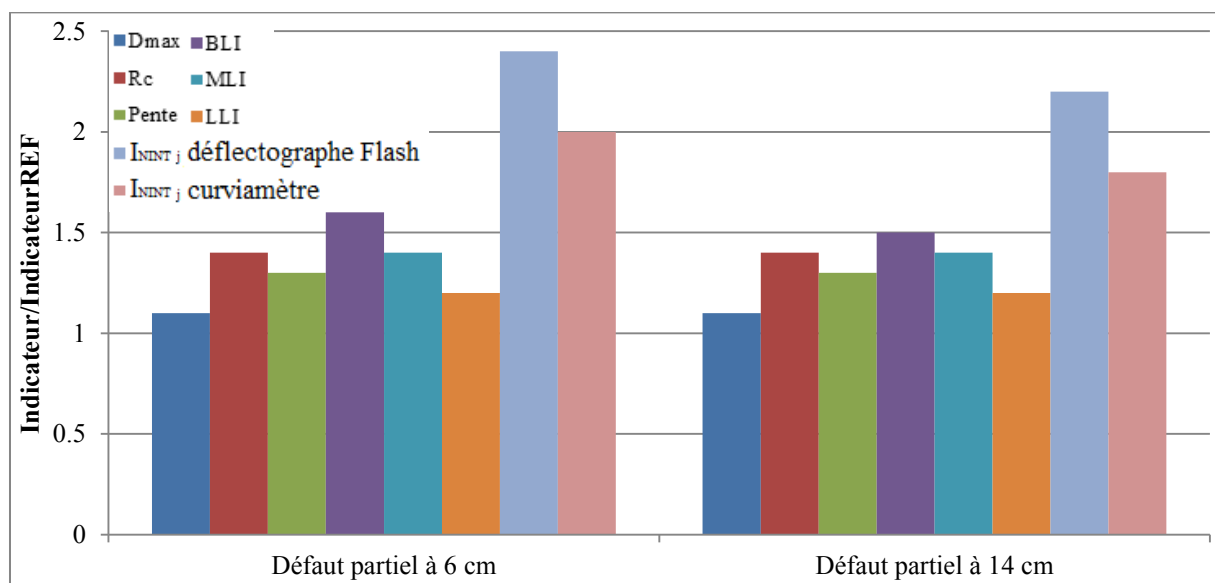


Figure III-29 : Evaluation de la sensibilité des indicateurs classiques et optimisés à la présence de défauts d'interface.

III.4.3 Conclusion de la partie 2

Dans la deuxième partie de ce chapitre, on a proposé une méthode de calcul de nouveaux indicateurs optimisés, conçus pour identifier un type de défaut donné, dans une structure de chaussée, à partir des mesures de bassin de déflexion. Deux types de défauts ont été considérés : des variations des modules des couches de chaussées, et des décollements d'interfaces. Le calcul de ces indicateurs nécessite de définir une structure de chaussée de référence, sans défaut, qui sert à la construction des fonctions de pondération. Ces indicateurs peuvent être normalisés, pour faciliter leur interprétation, et la comparaison de différentes structures de chaussées

Ces indicateurs ont ensuite été testés, par des calculs théoriques, sur différents cas de structures de chaussées. Ces tests ont montré la pertinence des indicateurs destinés à détecter des variations de module des couches bitumineuses ou de la plateforme. On a montré que ces indicateurs permettaient de détecter non seulement des endommagements généralisés, avec de

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

fortes variations de modules, mais également des endommagements locaux avec des variations de modules plus faibles, avec une meilleure sensibilité que les indicateurs existants, issus de la bibliographie.

Les indicateurs destinés à caractériser l'état des interfaces ont été construits en décrivant l'interface par une couche mince, de faible module. Les tests ont montré que ces indicateurs peuvent détecter un décollement local, de faible longueur (1 m). Toutefois, pour cela, la mesure des appareils doit être réalisée au-dessus du défaut.

Ces tests ont été réalisés sur plusieurs types de chaussées (souple, bitumineuse, mixte), et dans tous les cas, les nouveaux indicateurs optimisés se sont montrés plus efficaces que les indicateurs classiques, pour détecter des endommagements. Cette évaluation montre également que ces indicateurs sont aussi sensibles à des défauts sur chaussées mixtes, avec de faibles niveaux de déflexion. Enfin, malgré le caractère orthogonal des fonctions de pondération, on a constaté que certains indicateurs sont dépendants des variations de modules des autres couches de chaussée ou de l'état d'autres interfaces. Il est donc souhaitable de faire une étude de sensibilité des indicateurs à ces autres facteurs, avant d'interpréter leurs résultats, et également de choisir un ordre d'application des indicateurs, en calculant en premier ceux qui sont le moins sensibles aux perturbations apportées par d'autres couches.

L'analyse de la dispersion des indicateurs, pour des mesures réalisées sur chaussées réelles, sera étudiée dans le chapitre IV.

III.5 Conclusion générale du chapitre

Le chapitre III s'intéresse à la détection des endommagements à partir des mesures de déflexion réalisées avec le curviamètre et le déflectographe Flash. Cette étude a été conduite à partir de plusieurs cas de structures de chaussées, avec des niveaux de déflexion différents (chaussée souple, bitumineuse épaisse, mixte). Après avoir modélisé la chaussée en 3D par éléments finis et simulé la mesure des appareils le long d'une section, l'étude s'est penchée sur l'influence de certains défauts sur la mesure de déflexion.

A partir des mesures directes des appareils, une première analyse a été menée sur les indicateurs « classiques » de la mesure de déflexion issus de la bibliographie. Cette évaluation a été réalisée pour deux types de défauts : des variations de module et des décollements d'interface, et deux tailles de défauts : des défauts localisés, de faible longueur (1 à 2 m), ou des défauts généralisés, affectant l'ensemble de la structure. Au vu des performances métrologiques du curviamètre et du déflectographe Flash, on a montré qu'un endommagement généralisé est plus facilement détectable qu'un endommagement local. On a également montré que parmi les indicateurs classiques c'est la déflexion maximale qui est la plus sensible à une variation de modules des couches. En ce qui concerne les décollements d'interfaces, c'est le rayon de courbure qui s'avère l'indicateur le plus sensible.

Chapitre III : Détection de l'endommagement à partir des mesures de déflexion

Par la suite, les mesures des appareils ont été corrigées à l'aide de la procédure de correction mise en place dans le Chapitre II. Les résultats obtenus sont satisfaisants puisqu'on a montré les bassins corrigés étaient plus proches des bassins de référence à la fois par leur forme et par le niveau de déflexion maximale. Cependant, les indicateurs classiques déterminés à partir des mesures corrigées sont du même ordre de grandeur que ceux déterminés sur les mesures directes. Les indicateurs BLI, MLI et LLI, qui ont également été calculés à partir des déflexions corrigées, peuvent donner des indications complémentaires : l'indicateur BLI est sensible au décollement des interfaces, et aux valeurs de module des couches supérieures de la chaussée. L'indicateur LLI s'avère, lui, sensible au module de la plateforme.

Dans un second temps, nous avons proposé une approche permettant de construire de nouveaux indicateurs, optimisés pour un type de défaut donné (variation de module des couches de chaussée ou état d'une d'interface). Leur construction repose sur une variation de modules des couches et prend en compte les mesures directes des appareils d'auscultation. Leur utilisation sur des cas théoriques de structures de chaussées a donné des résultats très satisfaisants. On a mis en évidence une bonne relation entre les valeurs prises par l'indicateur, et les valeurs de module des couches, ou de rigidité des interfaces. Pour les défauts d'interface localisés, les mesures des appareils doivent cependant se situer à proximité du centre du défaut, pour permettre sa détection. Une étude de sensibilité a également montré que certains indicateurs restent sensibles à des variations des caractéristiques des autres couches de chaussée. Une telle étude de sensibilité s'avère utile pour vérifier la pertinence des indicateurs utilisés, et choisir leur ordre d'application. Les indicateurs proposés peuvent également être normalisés (pour se ramener par exemple à des valeurs entre 0 et 1), pour faciliter leur interprétation.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

| | | |
|-----------|---|------------|
| IV | Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites | 177 |
| IV.1 | Introduction | 178 |
| IV.2 | Principe de validation des procédures mises en place..... | 178 |
| IV.3 | Présentation des sites de mesure | 179 |
| IV.3.1 | Site de mesure du STAC | 180 |
| IV.3.2 | Site de mesure de GAP..... | 187 |
| IV.4 | Evaluation de la procédure de correction des mesures du curviamètre | 190 |
| IV.4.1 | Résultats pour le Site du STAC..... | 190 |
| IV.4.2 | Résultats pour le site de GAP..... | 195 |
| IV.4.3 | Conclusions sur la procédure de correction des mesures du curviamètre | 198 |
| IV.5 | Evaluation des indicateurs optimisés du bassin de déflexion sur les deux sites expérimentaux | 199 |
| IV.5.1 | Résultats pour le site du STAC | 200 |
| IV.5.2 | Résultats pour le site de GAP..... | 201 |
| IV.6 | Bilan des procédures développées pour l'amélioration de l'interprétation des mesures du curviamètre..... | 208 |
| IV.7 | Application de la méthode des indicateurs à un site test présentant des défauts d'interfaces | 209 |
| IV.7.1 | Description du site du manège de fatigue | 209 |
| IV.7.2 | Réalisation et analyse préliminaire des mesures | 210 |
| IV.7.3 | Modélisation de la structure de chaussée | 212 |
| IV.7.4 | Comparaison des mesures réelles et des simulations numériques. | 217 |
| IV.7.5 | Calcul des indicateurs pour la détection des défauts dans la structure de chaussée | 220 |
| IV.7.6 | Bilan de l'évaluation des indicateurs pour la détection de défauts | 230 |
| IV.8 | Conclusion..... | 231 |

IV.1 Introduction

Dans le chapitre II, une procédure de correction des mesures du curviamètre et du déflectographe Flash a été mise en place et validée de façon théorique, par des calculs avec le logiciel ALIZE. On a montré que la forme des bassins et le niveau de déflexion maximale corrigés sont plus proches des valeurs de référence sous un jumelage standard de 65 kN. Le calcul inverse à partir de ces mesures corrigées conduit également à l'obtention de modules plus réalistes que ceux calculés à partir des mesures non corrigées.

Le chapitre III a conduit à proposer une procédure de construction d'indicateurs optimisés basés sur l'ensemble du bassin de déflexion. On a montré l'intérêt de ces indicateurs optimisés pour détecter des défauts structurels, tels que des variations de modules des couches de chaussées ou des décollements d'interfaces, là où les indicateurs usuels basés sur la mesure de déflexion ne le permettent pas.

Ce chapitre vise à valider les travaux théoriques précédents en se basant sur des mesures réelles. Dans la première partie, on a appliqué les procédures sur des mesures réalisées avec le curviamètre sur deux sites expérimentaux. Le premier site concerne des mesures réalisées sur une planche instrumentée du STAC (Service Technique de l'Aviation Civile) en 2016 qui constitue une structure relativement rigide. Le second site correspond à deux planches tests situées vers GAP, représentatives de niveaux de déflexion plus élevés. Ces mesures ont permis de valider la procédure de correction et d'évaluer, sur des mesures réelles, la dispersion des indicateurs, et leur sensibilité à des défauts de chaussée réels.

Dans la dernière partie du chapitre, on a analysé des mesures au FWD réalisées sur un anneau du manège de fatigue de l'IFSTTAR de Nantes, comportant des défauts d'interface. Le calcul d'indicateurs optimisés pour la détection de défauts d'interface a permis de valider ces indicateurs sur un cas réel.

IV.2 Principe de validation des procédures mises en place

La Figure IV-1 présente la démarche de validation des procédures utilisées dans ce chapitre. Elle repose sur l'utilisation des bassins mesurés par le curviamètre.

La première étape consiste à définir la structure de référence et le bassin de référence obtenu sous un jumelage standard. Ils sont indispensables pour valider les procédures proposées. Pour les sites choisis, on ne disposait pas de valeurs précises de modules. Nous avons donc dû estimer les valeurs de référence à partir des bassins de déflexion mesurés et du bassin moyen, tout en tenant compte du principe de mesure de l'appareil.

Dans un second temps, la procédure de correction des mesures est évaluée, en se basant sur deux critères :

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

- Les bassins de déflexion : les bassins corrigés sous jumelage standard sont comparés au bassin de référence.
- Les modules obtenus par calcul inverse : des calculs inverses sont réalisés sur l'ensemble des bassins de déflexion corrigés, sous jumelage standard. A partir de ces bassins, des valeurs moyennes des modules de chaque couche sont déterminées. Finalement, un bassin sous jumelage standard est calculé avec ces valeurs de module, et comparé au bassin de référence.

La dernière étape consiste à calculer les indicateurs optimisés, pour l'ensemble des mesures. La structure de référence sert à définir les fonctions de pondération. Le calcul des indicateurs optimisés permet d'en estimer la variabilité d'une part, et de vérifier leur aptitude à détecter un dommage effectif de la chaussée, d'autre part.

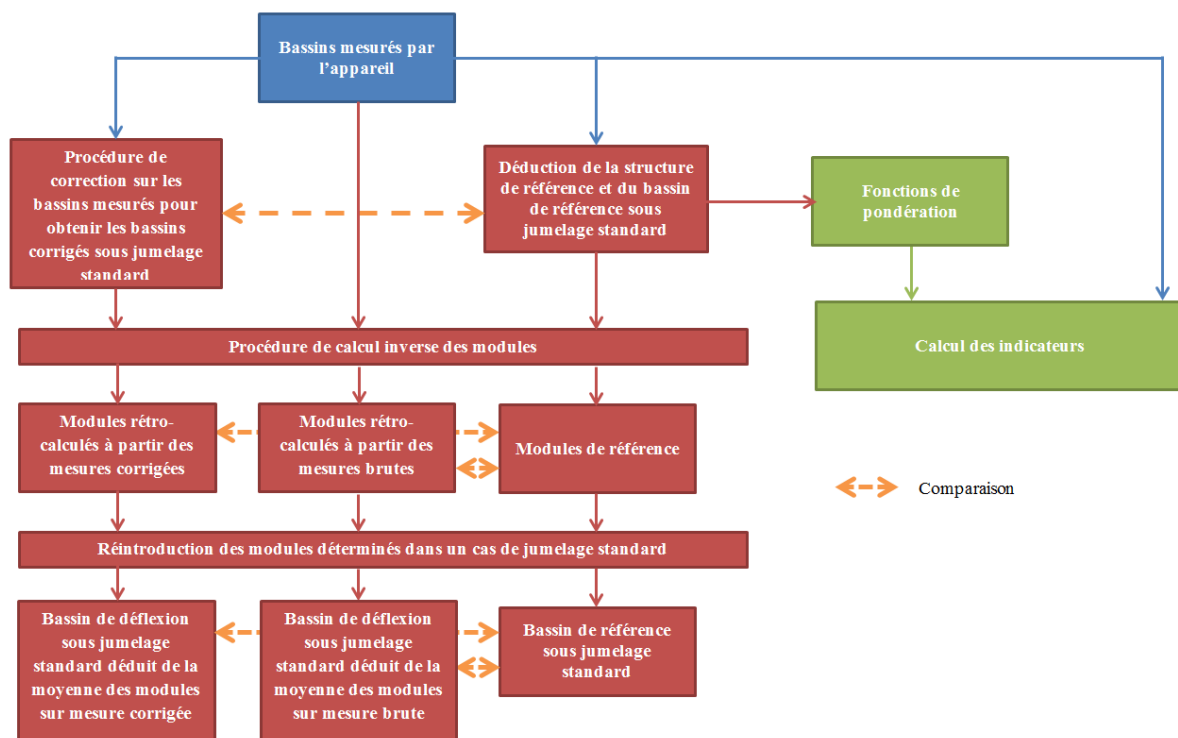


Figure IV-1 : Méthode suivie dans ce chapitre pour la validation des procédures de correction et d'analyse des mesures du curviamètre.

IV.3 Présentation des sites de mesure

Dans cette partie, les procédures mises en place dans les chapitres II et III sont évaluées sur des mesures réalisées avec le curviamètre. Pour cela des mesures recueillies sur deux sites instrumentés ont été exploitées. Sur chaque site, les mesures ont été répétées entre trois et cinq fois sur chaque point, ce qui permet d'évaluer leur répétabilité.

IV.3.1 Site de mesure du STAC

Du 12 au 13 avril 2016, le Service Technique de l'Aviation Civile (STAC) a organisé des essais croisés de mesure de déflexion sur une section de chaussée aéronautique instrumentée. L'objectif de cette campagne d'essais était la comparaison des mesures relevées par différents appareils. Le Curviamètre (Centre de Recherche Routière Belge), le Défectographe Flash (CEREMA) et le HWD (STAC) ont pris part à ces essais comme le montre la Figure IV-2. Malheureusement, lors des essais, le géophone central du HWD, qui permet d'obtenir la déflexion maximale, ne fonctionnait pas. De plus, les signaux du défectographe Flash étaient très bruités, sans doute à cause de la présence de la chaussée béton qui transmettait les vibrations du moteur des véhicules. L'analyse s'est donc concentrée sur les mesures du curviamètre.



Figure IV-2 : Appareils de mesure de déflexion étudiés durant les essais croisés du STAC.

IV.3.1.1 Description du site d'essai

La Figure IV-3 présente les dimensions de la planche instrumentée du STAC. Celle-ci est scindée en une structure rigide (béton) et une chaussée bitumineuse (souple au sens aéronautique). La campagne d'essais a été menée sur la chaussée bitumineuse. La section rigide a permis au curviamètre de s'élancer pour atteindre sa vitesse de mesure (18 km/h).

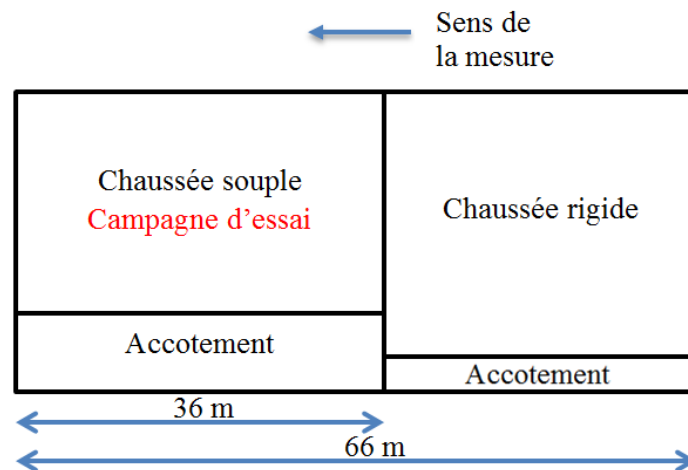


Figure IV-3 : Dimensions de la planche instrumentée du STAC.

La structure est composée de 32 cm de matériaux bitumineux dont les caractéristiques ont été déterminées par des essais de module complexe en laboratoire. La couche de roulement fait partie intégrante de la couche de BB. Celle-ci repose sur une plateforme granulaire. Son module a été déduit d'essais de chargement dynamique à la plaque, réalisés lors de la construction. Le Tableau IV-1 donne les caractéristiques de la structure de chaussée, et les valeurs de module d'élasticité des différentes couches de chaussée, issues des essais de laboratoire, pour les conditions standard (15 °C et 10 Hz) et pour les conditions correspondant aux mesures du curviamètre (24 °C dans la couche de base et 14 °C dans la couche de fondation, fréquence de 3 Hz correspondant à la vitesse du curviamètre). Ce tableau donne également les valeurs de déflexion maximale de référence sous jumelage standard calculées avec ALIZE, pour chaque jeu de modules. On peut noter que les niveaux de déflexion maximale sont faibles pour cette structure, dont les couches bitumineuses sont épaisses.

Tableau IV-1 : Caractéristiques des couches de chaussée.

| Matériaux | Epaisseur (m) | 15 °C/10 Hz | Conditions de test |
|---------------|---------------|--------------|--------------------|
| | | Module (MPa) | Module (MPa) |
| BB | 0.14 | 15597 | 6433 |
| GB | 0.18 | 10503 | 8574 |
| Sol + GNT | 4 | 160 | 160 |
| Substratum | Infinie | 55000 | 55000 |
| Dmax (mm/100) | | 13.4 | 16.4 |

IV.3.1.2 Description des essais

La Figure IV-4 représente la position des sept points de mesure (de A à G) sur la planche d'essai. Pour chaque passage, les trois géophones espacés tous les 5 m sur la chaîne de mesure du curviamètre ont toujours été positionnés de la même façon. Le géophone rouge a été utilisé pour mesurer le premier point (point A), le géophone orange pour le second point (B), le géophone ambre pour le troisième point (C) et ainsi de suite.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

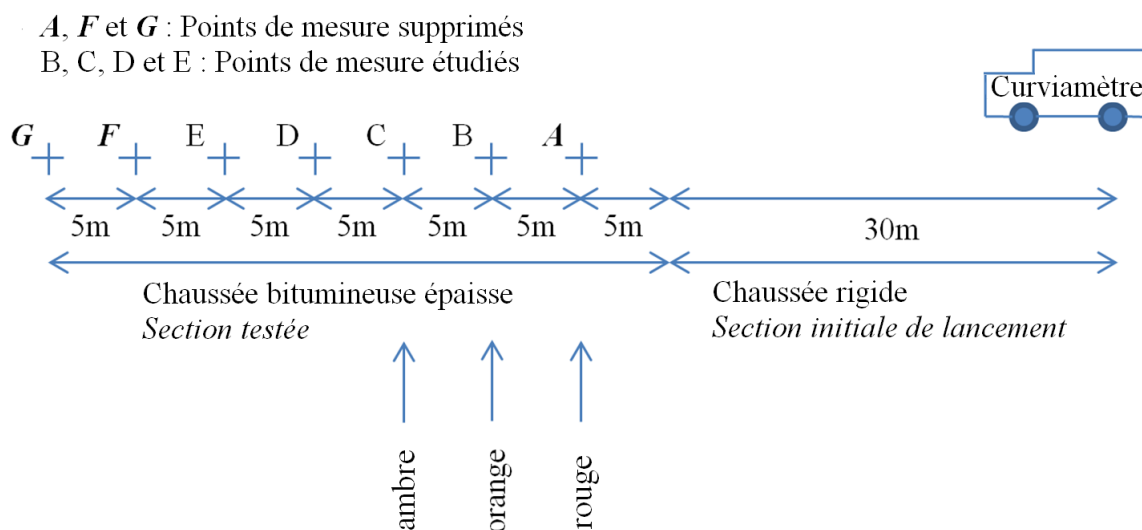


Figure IV-4 : Réalisation des mesures du curviamètre sur la planche instrumentée du STAC.

Parmi les sept points de mesure initialement relevés, le premier et les deux derniers ont été retirés. En effet l'analyse des mesures a montré que pour ces points, situés trop près de limites de la planche, les mesures étaient perturbées. Le point A est situé trop près de la structure rigide, ce qui modifie la répartition des charges. Les points F et G sont situés dans la zone de freinage du curviamètre, où la vitesse de mesure n'est plus de 18 km/h. Ainsi, seuls quatre points de mesure ont été étudiés. Le curviamètre a réalisé six passages l'après-midi sur ces points.

IV.3.1.3 Analyse des mesures

Le système d'acquisition du curviamètre réalise une analyse systématique des mesures. Par un traitement automatique, il identifie les mesures invalides ou douteuses sur des critères de bruit de mesure. Celles-ci sont soumises à l'acceptation ou au rejet de l'opérateur. Ainsi, seulement trois mesures par point ont finalement été retenues pour cette étude.

IV.3.1.3.1 Dispersion des mesures

La Figure IV-5 représente les bassins de déflexion mesurés et étudiés pour le point B et pour les trois passages du curviamètre. Un faible écart entre les bassins mesurés est constaté et leur niveau de déflexion maximale est similaire.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

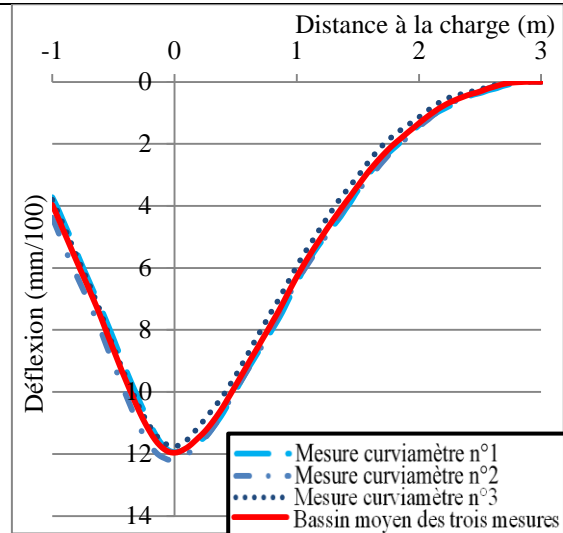


Figure IV-5: Bassins de déflexion mesurés par le curviamètre – Mesures au point B.

Pour évaluer la variabilité des mesures de déflexion, on a d'abord calculé le coefficient de variation de la déflexion maximale (rapport entre l'écart type et la valeur moyenne). Toutefois, ce coefficient de variation ne permet pas d'évaluer la variabilité de la forme du bassin de déflexion. Pour caractériser également la forme des bassins de déflexion, on a calculé, pour l'ensemble des bassins mesurés, un indice $I_{moybassin}$ défini par :

$$I_{moybassin} = \frac{\sum_{x=-1}^3 (d_{bassin}(x) - d_{moy}(x))^2}{\sum_{x=-1}^3 (d_{moy}(x))^2} \quad (IV.1)$$

Avec :

$d_{bassin}(x)$: la déflexion mesurée à l'abscisse x pour un bassin mesuré;

$d_{moy}(x)$: la déflexion moyenne à l'abscisse x .

Le Tableau IV-2 présente les paramètres calculés à partir des mesures du curviamètre, pour caractériser la dispersion des mesures. Pour tous les points de mesure, les coefficients de variation $\frac{\sigma}{Moyenne}$ de la déflexion maximale sont très faibles, aux alentours de 3 %. De même, la forme des bassins de déflexion varie très peu, avec des valeurs de l'indicateur $I_{moybassin}$ inférieures à 0.52 %. Cependant, si pour chaque point de mesure, les bassins sont très proches les uns des autres, il existe des différences significatives entre les points de mesures. Ainsi, la déflexion maximale moyenne varie entre 10 mm/100 (point E) et 17 mm/100 (point C). Ces fortes variations peuvent en partie être expliquées par des modifications des caractéristiques de la section d'essai (changement d'épaisseur ou de modules des matériaux).

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Tableau IV-2 : Analyse de la dispersion des mesures du curviamètre.

| Points | $I_{moybassin}$ (%) | | Moyenne Dmax (mm/100) | Ecart-type σ (mm/100) | coefficient de variation ($\sigma/moyenne$) (%) |
|--------|---------------------|------|-----------------------|------------------------------|---|
| | min | max | | | |
| B | 0.09 | 0.36 | 11.96 | 0.23 | 1.9 |
| C | 0.09 | 0.12 | 16.93 | 0.13 | 0.07 |
| D | 0.05 | 0.52 | 12.23 | 0.3 | 2.4 |
| E | 0.21 | 0.38 | 10.59 | 0.29 | 2.7 |

IV.3.1.3.2 Détermination de la structure de référence et du bassin de référence sous un jumelage standard

La détermination d'une structure de référence est une étape primordiale pour valider les procédures de correction et pour le calcul des indicateurs.

IV.3.1.3.2.1 *Algorithme pour la détermination des modules de référence*

La Figure IV-6 présente les étapes suivies pour déterminer la structure et le bassin de référence sous le jumelage standard. Les valeurs de module de la structure de référence sont ajustées pour que le bassin de déflexion simulé relevé par le curviamètre (en tenant compte de son principe de mesure) corresponde à moins de 1 % près au bassin moyen relevé par cet appareil, et à moins de 5 % à chaque bassin mesuré.

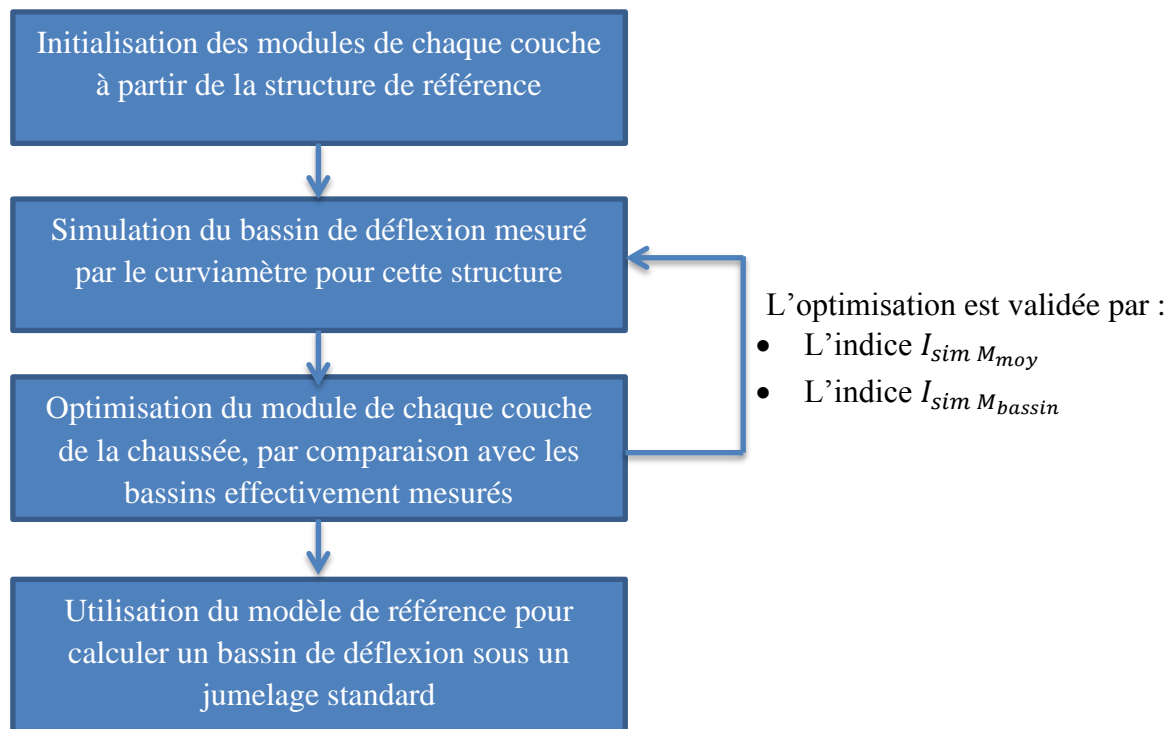


Figure IV-6: Algorithme pour la détermination des modules de la structure de référence.

La construction de la structure de référence se fait en plusieurs étapes :

1. La première phase consiste à définir des modules initiaux des couches de chaussée. Dans cet exemple, ces valeurs proviennent du Tableau IV-1.
2. Ensuite, un bassin de déflexion mesuré par l'appareil est simulé par l'utilisation du logiciel ALIZE (Balay, 2013) ou du logiciel d'éléments finis CESAR (Balay, 2001). Il prend en compte les hypothèses des appareils.
3. Les modules de chaque couche sont ensuite ajustés en utilisant la méthode des moindres carrés. Une comparaison est réalisée entre le bassin simulé, les différents bassins mesurés et le bassin moyen mesuré. L'optimisation est considérée satisfaite si :

- $I_{sim M_{moy}} = \frac{\sum_{x=-1}^3 (d_{moy}(x) - d_{sim M}(x))^2}{\sum_{x=-1}^3 (d_{sim M}(x))^2} \leq 1\%$ pour le bassin moyen ;
- $I_{sim M_{bassin}} = \frac{\sum_{a=-1}^{b=3} (d_{bassin}(x) - d_{sim M}(x))^2}{\sum_{a=-1}^{b=3} (d_{sim M}(x))^2} \leq 5\%$ pour chacun des bassins mesurés ;

avec M = indice représentant le modèle de calcul utilisé pour la simulation de la déflexion (A pour ALIZE et C pour CESAR) ;
avec $d_{sim M}(x)$ = simulation de la déflexion mesurée par l'appareil au point x sur la structure de référence.

Si $I_{sim M_{moy}}$ et $I_{sim M_{bassin}}$ sont supérieurs aux limites fixées, les modules de chaque couche sont ajustés et on retourne à l'étape 2.

4. La structure de référence obtenue après convergence du processus est utilisée pour calculer le bassin de référence sous jumelage standard.

IV.3.1.3.2.2 Détermination de la structure de référence

La Figure IV-7 présente les trois bassins de déflexions mesurés au point B par le curviamètre, le bassin moyen et la simulation du bassin mesuré sur la structure de référence après convergence. Tous ces bassins sont très similaires et la valeur maximale de $I_{simAbassin}$ est inférieure à 0.4 %. L'écart relatif entre la déflexion maximale mesurée par les appareils et celle simulée est inférieur à 0.3 mm/100. Ces résultats valident les modules des couches de chaussée déterminés pour la structure de référence. Le bassin de déflexion de référence est déduit de ce modèle en appliquant la charge d'un jumelage standard. La même procédure, pour déterminer un bassin de déflexion de référence, a été appliquée pour les points de mesure C, D et E, et des résultats comparables ont été obtenus.

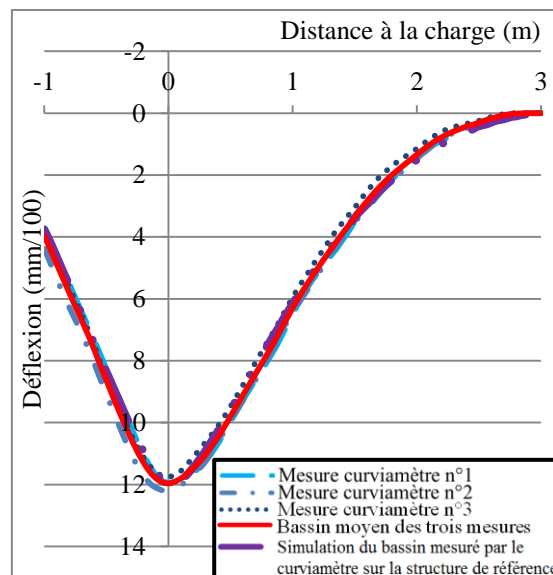


Figure IV-7 : Comparaison entre les bassins de déflexion mesurés par le curviamètre et le bassin de déflexion simulé, sur la structure de référence – Point B.

Dans ces essais, le niveau de déflexion maximale est très différent pour les différents points de mesure. On a donc déterminé une structure et un bassin de référence pour chaque point de mesure. Le Tableau IV-3 indique les modules de référence déterminés en chaque point de mesure. Tous les modules des matériaux bitumineux ont été ajustés indépendamment pour chaque point de mesure. Pour les points B, D et E, le module du sol a été supposé identique, mais il a été ajusté pour le point C (où la déflexion moyenne était nettement plus grande que sur les autres points). Les températures de mesure sont homogènes pour tous les points et sont égales à 24 °C dans la couche de base et 14 °C dans la couche de fondation, la fréquence de mesure est de 3 Hz correspondant à la vitesse du curviamètre.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Tableau IV-3 : Modules de référence des couches de chaussée pour chaque point de mesure.

| | Point B | Point C | Point D | Point E |
|---|---------|---------|---------|---------|
| BB (MPa) | 12000 | 8500 | 15000 | 18000 |
| GB (MPa) | 10500 | 8000 | 8000 | 10500 |
| Sol + GNT (MPa) | 160 | 105 | 160 | 160 |
| Moyenne des Dmax mesurées par le curviamètre (mm/100) | 12 | 16.9 | 12.2 | 10.6 |
| Dmax mesurée par le curviamètre à partir de la simulation avec le logiciel ALIZE (mm/100) | 12.2 | 17.2 | 12.3 | 10.5 |

IV.3.2 Site de mesure de GAP

Une campagne d'essai a été menée du 19 au 22 avril 1993 sur des sections de chaussées situées sur les RN94, RN85, RN75 et RD994 près de GAP. Cette campagne avait pour objectif d'évaluer la justesse et la répétabilité de mesure du curviamètre et du FWD, par comparaison avec des mesures de référence réalisées avec des capteurs de déplacement ancrés. Les essais ont été réalisés sur quatre sections de route rectilignes d'environ 200 m avec 41 points de mesure par section. Les deux premières sections sont des chaussées rigides avec un faible niveau de déflexion. La section 3 est une chaussée bitumineuse reposant sur une ancienne structure et la section 4 est une chaussée traditionnelle souple. Seules les mesures réalisées sur ces deux dernières sections sont exploitées ici.

Les justesses des mesures de déflexion et de courbure ont été évaluées sur le onzième point de mesure de chaque tronçon dit « point test », équipé d'un capteur ancré. Tous les appareils ont réalisé cinq passages sur chaque section. Sur les cinq bassins relevés par section, seul le premier bassin mesuré de la section 4, significativement différent des autres, a été supprimé par le traitement automatique des signaux du curviamètre.

Les bassins de déflexion étant exclusivement tracés sur papier, un travail de numérisation des mesures a été effectué pour déterminer les coordonnées des points de chaque bassin de déflexion (100 points par bassin).

IV.3.2.1 Analyse des mesures

Dans ce travail, l'ensemble des mesures du curviamètre sont analysées pour les deux sections.

IV.3.2.1.1 Dispersion des mesures

La Figure IV-8 présente pour les deux sections, l'ensemble des bassins mesurés par le curviamètre ainsi que le bassin moyen. Le niveau de déflexion mesuré est de l'ordre de 30 mm/100 pour la section 3 (bitumineuse épaisse) et de 90 mm/100 pour la section 4 (souple). Les bassins mesurés sont peu dispersés. Les températures de l'air sont de 23 °C pour la section 3 et de 18 °C pour la section 4. Elles sont de 14 °C et de 23 °C à 12 cm de profondeur respectivement pour la section 3 et la section 4.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

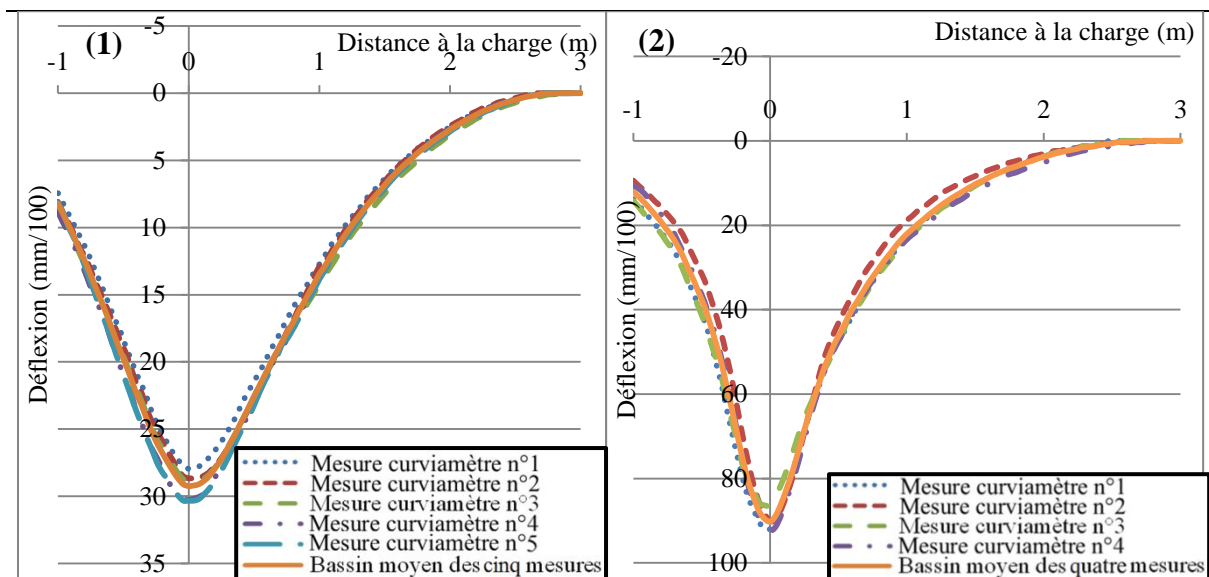


Figure IV-8: Bassins de déflexion mesurés par le curviamètre - (1) Section 3– (2) Section 4.

Le Tableau IV-4 présente les indicateurs de dispersion des mesures, identiques à ceux calculés précédemment pour le site du STAC, pour les deux sections. Les coefficients de variation pour la déflexion maximale sont faibles, de l'ordre de 3 %. Concernant la forme des bassins de déflexion, le calcul de l'indice $I_{moybassin}$ qui compare le bassin moyen avec les bassins mesurés conduit à des écarts compris entre 0.03 % et 0.52 %. Les relevés sur la section 3 apparaissent un peu plus homogènes, notamment pour ce qui concerne la forme du bassin.

Tableau IV-4 : Analyse de la dispersion des mesures du curviamètre

| | $I_{moybassin}$ (%) | | Moyenne Dmax (mm/100) | Ecart-type σ (mm/100) | Coefficient de variation (σ /Moyenne) (%) |
|-----------|---------------------|------|-----------------------|------------------------------|---|
| | min | max | | | |
| Section 3 | 0.03 | 0.32 | 28.65 | 1.04 | 3.63 |
| Section 4 | 0.03 | 0.52 | 90.22 | 2.76 | 3.06 |

IV.3.2.1.2 Détermination du bassin de référence

Les informations disponibles concernant les structures de chaussées du site de Gap étaient partielles. La Figure IV-9 présente les structures de chaussée retenues pour la modélisation. Seules les épaisseurs et caractéristiques des matériaux mis en place lors du renforcement étaient connues. La nature et l'épaisseur des matériaux des anciennes structures proviennent d'hypothèses s'appuyant sur les informations figurant dans l'article de cette étude (Lepert, et al., 1997). Les modèles de structures ainsi constitués ont permis de simuler la réponse de la chaussée à la sollicitation du curviamètre et à la température de mesure avec le logiciel ALIZE.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

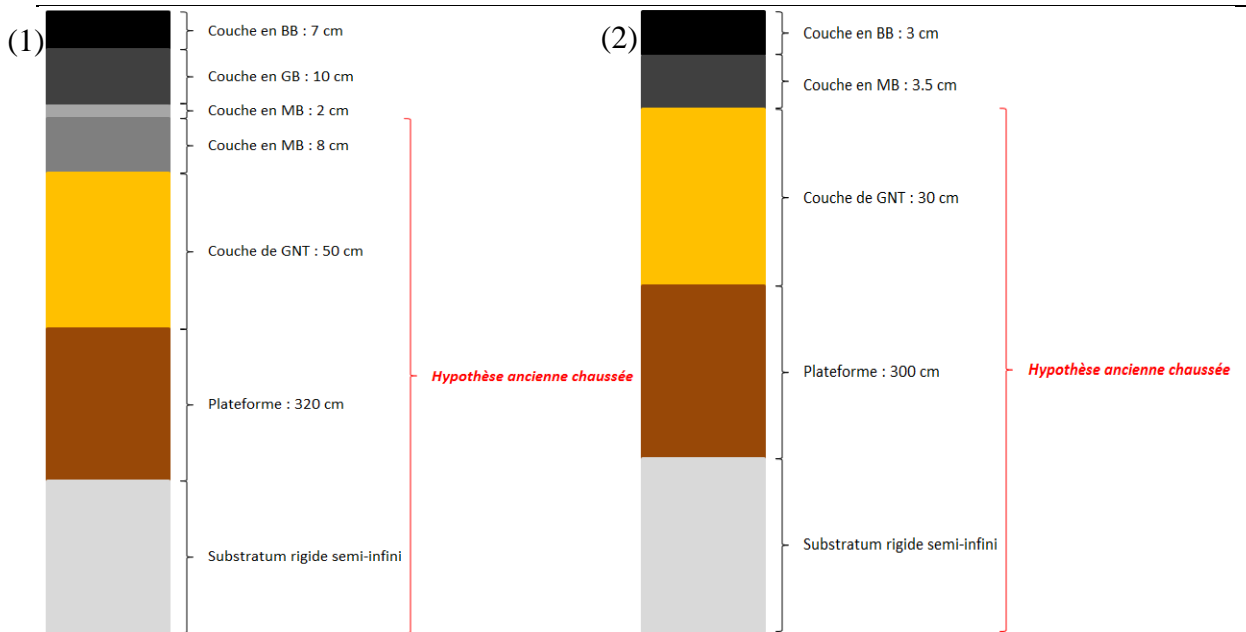


Figure IV-9: Structures des chaussées du site de Gap - (1) Section 3 - (2) Section 4.

La géométrie des structures étant définie, l'étape suivante a consisté à déterminer les modules des couches de chaque section de chaussée. Ces structures comportent des couches bitumineuses de faible épaisseur. Pour faciliter la détermination des modules, les deux couches de MB pour la section 3 et les couches de MB et BB pour la section 4 ont été regroupées. Le calage des modules a été effectué en utilisant la même procédure que pour le site du STAC (Figure IV-6). Les modules déterminés pour les sections 3 et 4 sont résumés dans le Tableau IV-5.

Tableau IV-5 : Calage des modules des couches de chaussées du site de GAP.

| Section 3 (3 Hz/T°C air: 23 °C/T°C 12 cm: 14 °C) | | Section 4 (3 Hz/T°C air: 23 °C/T°C 12 cm: 14 °C) | |
|--|--------------|--|--------------|
| Epaisseur (m) | Module (MPa) | Epaisseur (m) | Module (MPa) |
| 0.07 | 7000 | 0.065 | 6000 |
| 0.1 | 8500 | 0.3 | 200 |
| 0.1 | 2500 | 3 | 50 |
| 0.5 | 140 | Semi-infini | 55000 |
| 3.2 | 65 | | |
| Semi-infini | 55000 | | |

La Figure IV-10 compare pour les sections 3 et 4, les bassins mesurés par le curviamètre, le bassin moyen mesuré par le curviamètre et la simulation avec ALIZE du bassin mesuré. Pour la section 3, les bassins sont très proches les uns des autres. De plus, pour l'ensemble des bassins, l'indice $I_{simA_{bassin}}$ est inférieur à 0.29 % et $I_{simA_{moy}}$ est égal à 0.03 %. Pour la section 4, les bassins sont un peu plus dispersés. L'indice $I_{simA_{bassin}}$ est inférieur à 1.7 % pour l'ensemble des bassins mesurés. L'indice $I_{simA_{moy}}$ est égal à 0.7 % pour le bassin moyen.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

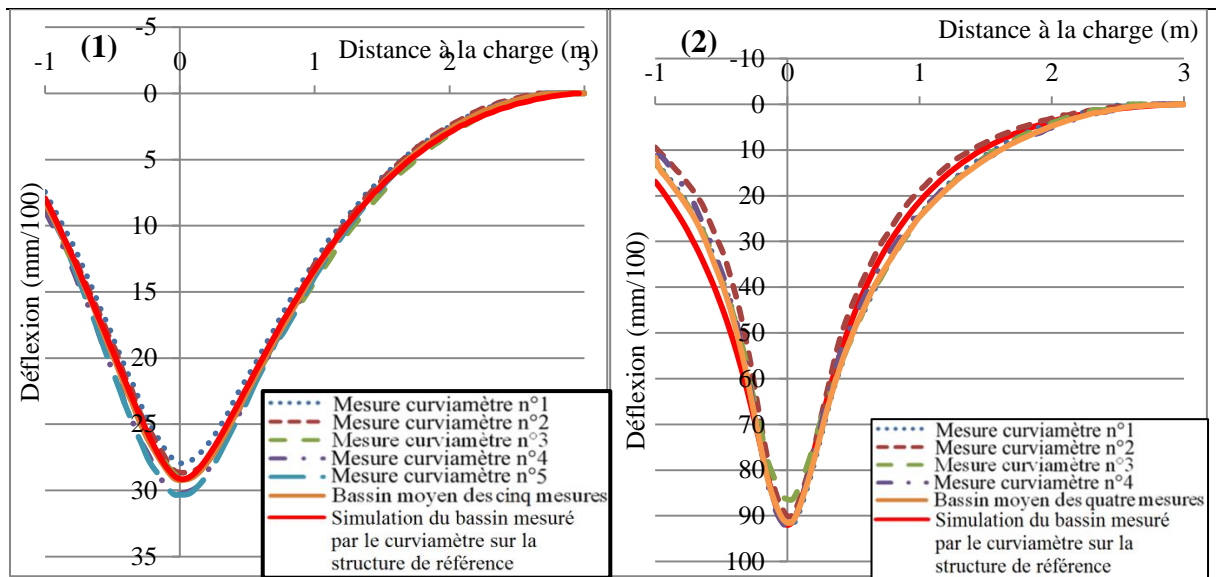


Figure IV-10 : Comparaison du bassin moyen mesuré et du bassin du modèle simulé par ALIZE et mesuré par le curviamètre – (1) Section 3 – (2) Section 4.

IV.4 Evaluation de la procédure de correction des mesures du curviamètre

Pour les deux sites, la procédure de correction des mesures du curviamètre, basée sur le modèle de Jouve et Martinez, a été appliquée sur les 4 points sélectionnés pour le site du STAC, et sur les 2 sections sélectionnées pour le site de GAP. La comparaison a été menée en comparant les bassins de déflexion mesurés, les bassins corrigés sous jumelage standard et ceux de référence sous jumelage standard (ces derniers sont calculés avec ALIZE, à partir des caractéristiques de chaque structure).

IV.4.1 Résultats pour le Site du STAC

La Figure IV-11 compare, pour le point B, le bassin de référence sous jumelage standard, ceux mesurés par le curviamètre et les bassins corrigés sous jumelage standard, issus des mesures. Cette figure montre que :

- Les bassins de déflexion mesurés directement par le curviamètre sous-estiment la déflexion de référence sous jumelage standard. Les hypothèses de l'appareil imposent une déflexion et une pente nulles du bassin à 3 m de la charge ce qui influence sur le niveau de déflexion et sur la forme du bassin.
- La méthode de correction permet d'obtenir des bassins corrigés beaucoup plus proches du bassin de référence. La forme du bassin est mieux respectée et le bassin est symétrique. La déflexion maximale est correctement estimée (écart inférieur à 1 mm/100). Des conclusions très similaires ont été obtenues pour les points C, D et E.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

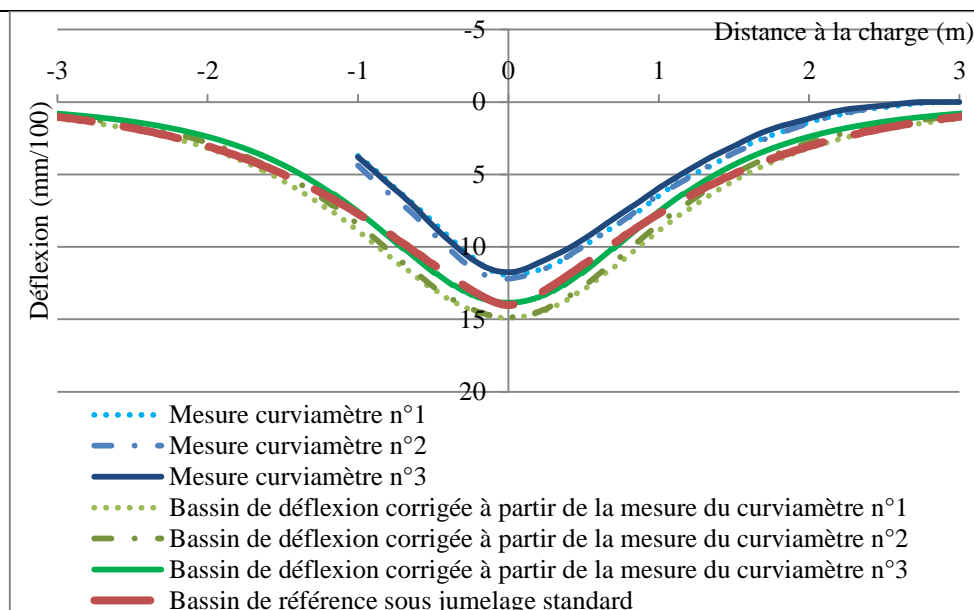


Figure IV-11 : Comparaison entre le bassin de référence sous jumelage de référence, et les bassins mesurés par le curviamètre avec et sans correction – Point B.

En complément de la Figure IV-11, le Tableau IV-6 compare pour les quatre points de mesure, les moyennes des déflexions maximales mesurées par le curviamètre avec et sans correction ainsi que les valeurs des paramètres optimisés du modèle de Jouve & Martinez. Pour les déflexions maximales, le tableau précise :

- La déflexion maximale moyenne ;
- Entre parenthèses l'écart relatif entre cette déflexion moyenne et la déflexion de référence ;
- Entre crochets les valeurs maximales et minimales obtenues pour les différentes répétitions des mesures.

Pour l'ensemble des points étudiés, la déflexion maximale corrigée est beaucoup plus proche de la valeur de référence que celle relevée directement par le curviamètre. Ainsi, l'écart relatif qui est compris entre 15 et 19 % pour les mesures non-corrigées est réduit entre 3 et 7 % pour les mesures corrigées. En valeur, l'écart entre la déflexion maximale corrigée et la valeur de référence reste généralement inférieur à 1 mm/100 ce qui est inférieur à la sensibilité de l'appareil. La méthode de correction s'avère donc très satisfaisante.

Les paramètres optimisés « d_f », « λ_f » et « n_f », déduits du processus de correction, sont nécessaires à la détermination de la déflexion corrigée sous jumelage standard. La variation la plus importante est observée pour « d_f ». Celle-ci est causée par la dispersion des mesures réelles du curviamètre qui impacte plus particulièrement ce paramètre de correction. Le paramètre « λ_f » reste presque constant quel que soit le point de mesure. Enfin, « n_f » qui dépend de la forme du bassin de déflexion, varie entre 1.6 et 2.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Les déflexions maximales enregistrées par le curviamètre en un même point varient légèrement avec un écart maximal entre les mesures qui reste inférieur à 0.6 mm/100 entre deux passages de cet appareil. Pour les bassins corrigés, cet écart est légèrement plus élevé. Toutefois, il n'atteint que 1.1 mm/100, largement inférieur aux performances de répétabilité de l'appareil. Cet écart plus important s'explique par les différentes incertitudes introduites par le processus de correction : hypothèses sur le fonctionnement de l'appareil, utilisation d'une forme de bassin de déflexion « prédéfinie » (fonction de Jouve et Martinez à 3 paramètres).

Tableau IV-6 : Comparaison de la déflexion maximale mesurée par le curviamètre avec et sans correction et des paramètres optimisés issus de la procédure de correction – Site du STAC.

| | Déflexion de référence sous jumelage standard | Mesures du curviamètre | Déflexion corrigée sous jumelage standard issue de la mesure du curviamètre | Paramètres optimisés issus de la procédure de correction | | |
|--------|---|--------------------------------|---|--|------------------|----------------|
| | Déflexion maximale | Déflexion maximale | Déflexion maximale | d_f | λ_f | n_f |
| Points | Déflexion de référence (mm/100) | Moyenne (mm/100) | Moyenne (mm/100) | Moyenne (mm/100) | Moyenne (m) | Moyenne (-) |
| B | 14.0 | 12 (-15 %) [11.7;12.2] | 14.5 (+4 %) [13.8;14.9] | 7.4 [7.1;7.6] | 0.8 [0.7;0.8] | 2 [1.9;2] |
| C | 20.4 | 16.9 (-17 %) [16.8;17.1] | 20.9 (+3 %) [20.4;21.3] | 10.7 [10.4;10.9] | 0.8 [0.8;0.9] | 2 [1.9;2] |
| D | 14.3 | 12.2 (-15 %) [12;12.6] | 14.8 (+3 %) [14.8;15.1] | 7.6 [7.4;7.8] | 0.7 [0.6;0.7] | 1.8 [1.6;2] |
| E | 13.1 | 10.6 (-19 %) [10.3;10.8] | 14 (+7 %) [13.7;14.6] | 6.9 [6.2;7.4] | 0.7 [0.7;0.8] | 1.6 [1.4;2] |

En complément de la validation sur la déflexion maximale, la procédure de correction doit permettre d'obtenir, par calcul inverse, des valeurs de modules des matériaux satisfaisantes. Des calculs inverses ont donc été réalisés avec le module « Rétrocalcul » du logiciel ALIZE, à partir des bassins de déflexions avec et sans correction. Les calculs ont été effectués avec l'hypothèse d'un chargement par un jumelage standard. Le calcul inverse a été effectué sur chaque bassin de déflexion mesuré et corrigé. Pour chaque couche, la moyenne des modules rétro-calculés est donnée dans le Tableau IV-7. Les écarts relatifs entre les modules déterminés ici et ceux de référence établis dans le Tableau IV-3 sont donnés entre parenthèses.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Tableau IV-7: Ecart relatifs entre les modules d'Young de référence et les modules déterminés par calcul inverse – Site du STAC.

| | Point B | | | Point C | | |
|----------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| | Modules d'Young de référence | Mesures du curviamètre | | Modules d'Young de référence | Mesures du curviamètre | |
| | | Moyenne (MPa) | Moyenne de la correction (MPa) | | Moyenne (MPa) | Moyenne de la correction (MPa) |
| E _{BB} | 12000 | 4542 (-62 %) | 10080 (-16 %) | 8500 | 6875 (-19 %) | 7213 (-15 %) |
| E _{GB} | 10500 | 21083 (+101%) | 8727 (-17%) | 8000 | 6213 (-22%) | 6293 (-21%) |
| E _{GNT+SOL} | 160 | 233 (+45%) | 157 (-2%) | 105 | 156 (+48%) | 106 (+1%) |

| | Point D | | | Point E | | |
|----------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| | Modules d'Young de référence | Mesures du curviamètre | | Modules d'Young de référence | Mesures du curviamètre | |
| | | Moyenne (MPa) | Moyenne de la correction (MPa) | | Moyenne (MPa) | Moyenne de la correction (MPa) |
| E _{BB} | 15000 | 16051 (+7 %) | 11413 (-24 %) | 18000 | 12264 (-32 %) | 15170 (-16 %) |
| E _{GB} | 8000 | 4985 (-38 %) | 5737 (-28 %) | 10500 | 14157 (+35 %) | 8898 (-15 %) |
| E _{GNT+SOL} | 160 | 218 (+36 %) | 156 (-3 %) | 160 | 252 (+58 %) | 161 (+1 %) |

Les modules déterminés par calcul inverse basés sur les mesures brutes du curviamètre (non corrigées) ne sont pas réalistes. Les écarts entre les modules d'Young de référence et ceux calculés à partir des mesures de curviamètre sont souvent supérieurs à 30 % et peuvent atteindre plus de 50 %. Le faible niveau de déflexion maximale induit notamment une surestimation systématique du module du sol. Ceci conduit à des erreurs importantes sur les autres modules. Ces fortes différences sont dues au principe de mesure du curviamètre. En faisant l'hypothèse d'une déflexion et d'une pente nulles à 3 m de la charge, cet appareil conduit à surestimer le module du sol et induit d'importants écarts avec les modules de référence. Ces erreurs ne permettent pas de prédire correctement l'état réel de la structure (en détectant par exemple une baisse de module due à l'endommagement d'une couche) et donc de dimensionner l'entretien à réaliser le cas échéant.

Les modules déterminés à partir des mesures de déflexions corrigées sont plus proches de ceux de la structure de référence et plus réalistes. Le module du sol est particulièrement bien estimé avec un écart inférieur à 4 MPa (3 %). Les erreurs sur les modules d'élasticité des autres couches sont généralement inférieures ou égales à 25 % avec une moyenne de l'ordre de 20 %.

On peut noter que ces résultats rejoignent ceux du chapitre II, où la procédure de correction du curviamètre avait été évaluée de façon théorique, à partir de calculs ALIZE. Cette évaluation avait également indiqué des écarts maximum de l'ordre de 30 % sur l'estimation des modules par calcul inverse, après correction des mesures (voir tableau II.12).

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

La Figure IV-12 compare, pour le point B, le bassin de référence et les bassins déduits des modules rétro-calculés avec et sans correction des mesures. On observe que le bassin obtenu avec les modules rétro-calculés à partir des mesures corrigées est beaucoup plus proche du bassin de référence que celui issu de la mesure brute.

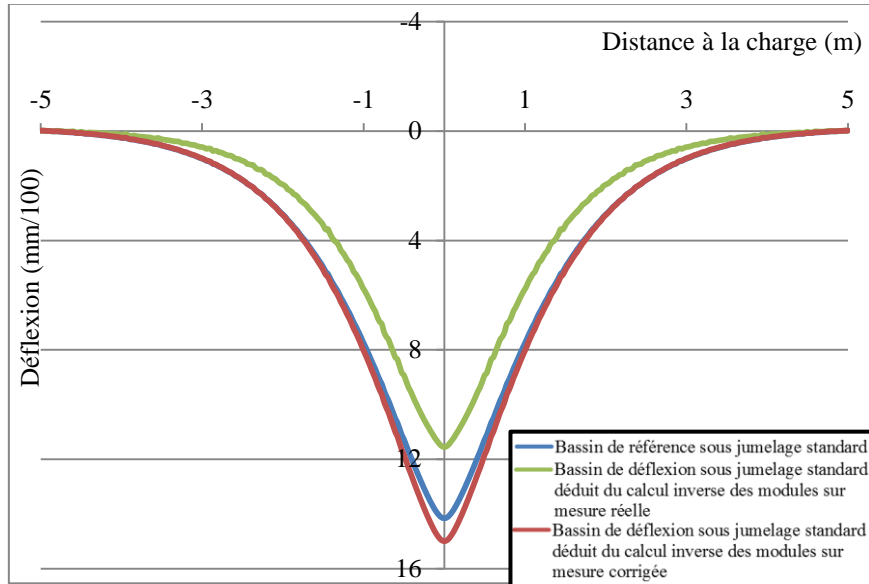


Figure IV-12 : Comparaison entre le bassin de référence et ceux déduits du calcul inverse de la moyenne des modules rétrocalculés pour les mesures corrigées et non corrigées.

Pour quantifier l'écart global entre les bassins, l'indice $I_{CI\ PC}$ a été calculé. La synthèse est présentée dans le Tableau IV-8, pour les 4 points de mesure.

(IV.2)

$$I_{CI\ PC} = \frac{\sum_{x=-5}^5 (d_{CI\ PC}(x) - d_{Ref}(x))^2}{\sum_{x=-5}^5 (d_{Ref}(x))^2}$$

Avec $d_{Ref}(x)$ la déflexion de référence sous jumelage standard en abscisse x ;

Avec $d_{CI\ PC}(x)$ la déflexion du bassin déduit du calcul inverse des modules avec ou sans procédure de correction ($PC = SPC$) ou avec procédure de correction ($PC = APC$), au point x .

Ce tableau récapitulatif montre que :

- Avec les mesures corrigées, la valeur maximale de l'indice $I_{CI\ APC}$ est de 1.1 %. La forme globale du bassin de déflexion est donc bien décrite.
- Avec les mesures brutes, les valeurs de l'indice $I_{CI\ SPC}$ sont beaucoup plus élevées, avec une valeur maximale de 8.5 % pour le point E.

Ces résultats mettent en lumière l'effet positif de la procédure de correction pour l'ensemble du bassin de déflexion, et rejoignent également les conclusions du chapitre II.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Tableau IV-8 : Comparaisons des indices I_{CI} pour les quatre points de mesure – Site du STAC.

| Points | $I_{CI\ SPC}$ (%) | $I_{CI\ APC}$ (%) |
|--------|-------------------|-------------------|
| B | 5.3 | 0.2 |
| C | 5.2 | 0.3 |
| D | 3.1 | 1.1 |
| E | 8.5 | 0.2 |

IV.4.2 Résultats pour le site de GAP

La Figure IV-13 compare pour les deux sections, les bassins de référence avec la première mesure (non corrigée) du curviamètre d'une part et avec le bassin corrigé sous la charge du jumelage de référence, issu de cette mesure, d'autre part. Le bassin corrigé est symétrique pour les 2 sections. Contrairement à l'hypothèse de mesure, la déflexion corrigée ne s'annule pas à 3 m de la charge, mais à une distance supérieure : 5 m pour la section 3 et 3.5 m pour la section 4. Pour la section 3, les déflexions maximales corrigées sont plus proches de la référence que celles mesurées. La forme du bassin reproduit mieux celle du bassin de référence. Pour la section 4, la correction ne modifie pratiquement pas la déflexion maximale. En revanche, la forme du bassin corrigé est beaucoup plus proche du bassin de référence que celle du bassin de mesure initial. Pour les 2 sections des résultats très similaires ont été obtenus pour les autres bassins mesurés et corrigés.

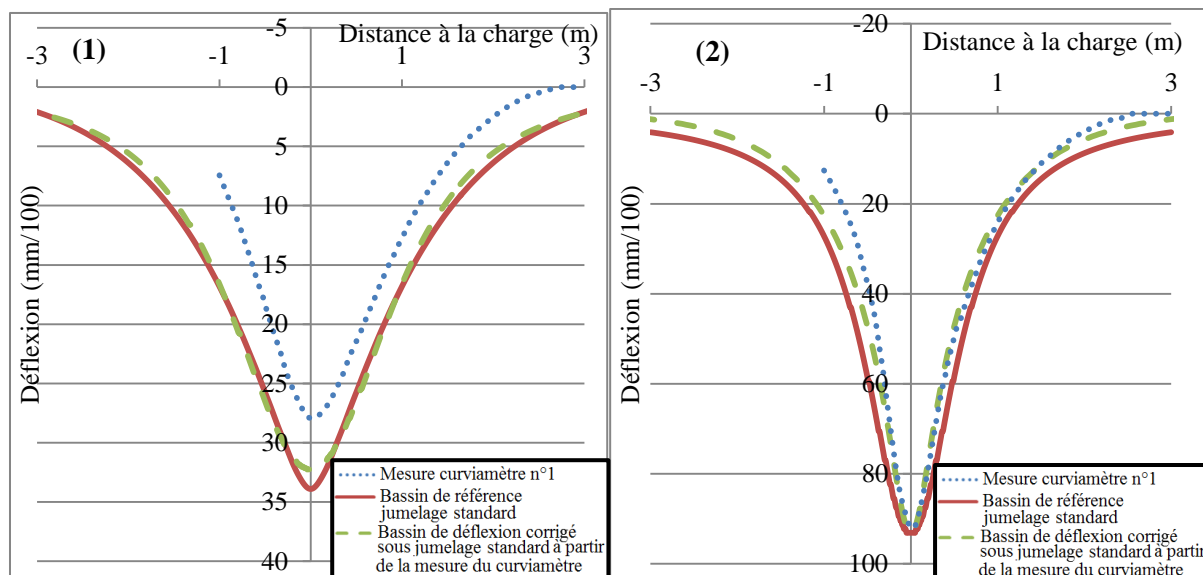


Figure IV-13 : Comparaison, pour chaque section, du bassin de référence sous jumelage standard, du premier bassin mesuré et du bassin corrigé déduit de cette mesure – Section 3 (1) – Section 4 (2).

Le Tableau IV-9 présente les déflexions maximales obtenues avec et sans correction pour les 2 sections de chaussées, ainsi que les paramètres moyens du modèle de Jouve et Martinez d_f , λ_f et n_f issus de la procédure de correction. Les valeurs entre parenthèses correspondent aux écarts relatifs entre les déflexions de référence et celles avec ou sans correction. Les valeurs entre crochets indiquent les valeurs maximales et minimales obtenues.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Pour la section 3, la procédure de correction apporte un fort gain. En effet, l'écart relatif avec la déflexion maximale de référence est significativement réduit passant de 16 % à moins de 3 %. Pour la section 4, l'écart moyen est initialement faible (2 %) et reste très faible (0.3 %) après correction. La procédure de correction améliore donc la justesse de l'appareil. Cependant, on observe que la dispersion des déflexions maximales devient plus importante comme le montre l'étendue de l'intervalle des mesures qui passe de 10 mm/100 avant correction à 13 mm/100 après correction. Comme pour le site du STAC, on constate que la procédure de correction augmente un peu la dispersion des différentes mesures.

Tableau IV-9 : Comparaison de la déflexion maximale mesurée par le curviamètre avec et sans correction et des paramètres optimisés issus de la procédure de correction – Site de Gap.

| Section | Déflexion de référence sous jumelage standard | Mesures du curviamètre | Déflexion corrigée sous jumelage standard issue de la mesure du curviamètre | Paramètres optimisés issus de la procédure de correction | | |
|-----------|---|-------------------------------|---|--|----------------------|----------------------|
| | Déflexion maximale | Déflexion maximale | Déflexion maximale | d_f | λ_f | n_f |
| Section | Déflexion de référence (mm/100) | Moyenne (mm/100) | Moyenne (mm/100) | Moyenne (mm/100) | Moyenne (m) | Moyenne (-) |
| Section 3 | 33.9 | 29.2 -16 % [27.9;30.2] | 33.1 -2.4 % [32.2;34.2] | 17.1 [16.7;17.7] | 0.68 [0.66;0.74] | 1.7 [1.51;1.87] |
| Section 4 | 93.1 | 91.5 -2 % [86.4 ; 96.8] | 93.4 +0.3 % [85.2 ; 98.4] | 52.3 [49.2 ; 55] | 0.33 [0.3 ; 0.35] | 0.91 [0.75 ; 1.1] |

Pour compléter l'évaluation, des rétrocalculs des modules des matériaux ont été réalisés à partir des bassins de déflexion, avec le logiciel ALIZE. Comme précédemment, pour chaque section, des rétrocalculs ont été réalisés à partir des cinq bassins de déflexion avec et sans correction. Le Tableau IV-10 présente les valeurs moyennes des modules ainsi déterminés et, entre parenthèses, l'écart relatif par rapport à la structure de référence.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Tableau IV-10 : Comparaison entre les modules de référence et les modules d'Young estimés par calcul inverse à partir des mesures du curviamètre, avec et sans correction - entre parenthèses, l'écart relatif avec la valeur de référence.

| | Section 3 | | | | Section 4 | | |
|------------------------|------------------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| | Modules d'Young de référence (MPa) | Mesures du curviamètre | | | Modules d'Young de référence (MPa) | Mesures du curviamètre | |
| | | Moyenne (MPa) | Moyenne de la correction (MPa) | | | Moyenne (MPa) | Moyenne de la correction (MPa) |
| E_{BB} (0.07 m) | 7000 | 8100 (+16 %) | 7670 (+10 %) | E_{MB} (0.065 m) | 6000 | 11900 (+98 %) | 8600 (+40 %) |
| E_{GB+MB} (0.2 m) | 4000 | 3760 (-6 %) | 4392 (+10 %) | E_{GNT} (0.3 m) | 200 | 182 (-9 %) | 180 (-10 %) |
| E_{GNT} (0.5 m) | 140 | 103 (-26 %) | 106 (-24 %) | E_{SOL} (3 m) | 50 | 51 (+2 %) | 46 (-8 %) |
| E_{SOL} (3.2 m) | 65 | 98 (+51 %) | 68 (+4 %) | E_{SUB} | 55000 | 55000 | 55000 |
| E_{SUB} | 55000 | 55000 | 55000 | | | | |

Pour la section 3, on voit que :

- les modules déterminés par calcul inverse sans correction présentent des écarts compris entre -26 % et +51 % avec les modules de référence. l'écart le plus important est obtenu pour le module du sol (51 %).
- Après correction, l'estimation du module du sol est largement améliorée, avec un écart de seulement 3 MPa (4 %). L'estimation des modules des autres couches est également meilleure : Le module des couches bitumineuses est légèrement surestimé (10 %) tandis que celui de la GNT est sous-estimé (24 %).

Pour la section 4 (chaussée souple), on constate que :

- Sans correction, les modules de la GNT et du sol sont assez bien estimés. Cela s'explique par le fait que pour cette chaussée souple, le biais de mesure du curviamètre est assez faible (le bassin mesuré, sans correction, est assez proche du bassin de référence). En revanche, l'écart sur le module de la couche de roulement est beaucoup plus important, puisqu'il atteint 98 %. Cela s'explique par le fait que cette couche est mince (6.5 cm), et que pour cette raison, la déflexion est peu sensible au module de cette couche de roulement.
- Après correction, on n'observe pas d'amélioration pour les modules des couches de GNT et du sol, mais le module de la couche de roulement est mieux estimé, avec un écart de 40 %.

La Figure IV-14 compare pour la section 3, le bassin de référence sous jumelage standard avec ceux déduits des modules déterminés par calcul inverse, à partir des mesures corrigées ou non. Le bassin de déflexion issu de la mesure brute sous-estime la déflexion de référence jusqu'à une distance de la charge supérieure à 3 m. La déflexion maximale est ainsi sous-estimée de près de 4 mm/100. Le bassin déduit des modules rétro-calculés après correction se superpose au bassin de référence, indiquant clairement que la structure obtenue est acceptable.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Pour la section 4, des résultats similaires ont été obtenus, même si l'écart entre le bassin mesuré initial et le bassin de référence est plus réduit.

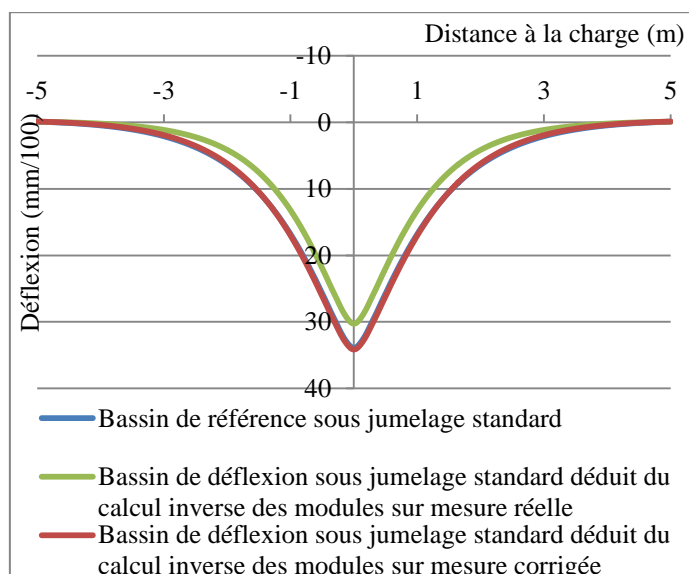


Figure IV-14: Comparaison entre le bassin de référence et ceux déduits du calcul inverse des modules sur mesures corrigées ou non.

Pour mieux quantifier les écarts entre les bassins retro-calculés et les bassins de référence, les indices proposés lors de l'analyse des mesures du STAC ont été calculés. Le Tableau IV-11 présente, pour les deux sections de test, les valeurs de $I_{CI\ PC}$. Pour la section 3, la procédure de correction apporte clairement des bénéfices puisque l'indice initial, $I_{CI\ SPC}$, supérieur à 3 % est réduit à 0.03 % ($I_{CI\ APC}$). Ce dernier indice montre un accord quasi parfait entre le bassin corrigé et le bassin de référence. Pour la section 4, la valeur de l'indice reste inférieure à 1 % avant et après correction. Le gain est faible, mais le bassin issu de la procédure de correction présente tout de même un meilleur indice $I_{CI\ APC}$, égal à 0.5 %.

Tableau IV-11 : Comparaison des indices $I_{CI\ PC}$ pour les deux sections de chaussées – Site de GAP.

| | $I_{CI\ SPC}$ (%) | $I_{CI\ APC}$ (%) |
|-----------|-------------------|-------------------|
| Section 3 | 3.1 | 0.02 |
| Section 4 | 0.6 | 0.5 |

IV.4.3 Conclusions sur la procédure de correction des mesures du curviamètre

La procédure de correction des mesures a été évaluée sur 3 sections de chaussées, représentatives de niveaux de mesure différents. Pour chaque chaussée, une structure de référence a d'abord été calée, permettant d'obtenir des paramètres de référence (modules des couches, déflexion maximale, bassin de déflexion). La procédure de correction a ensuite été appliquée aux mesures relevées par le curviamètre, permettant d'obtenir des bassins de déflexion corrigés. Les différentes comparaisons entre ces mesures et les paramètres de référence montrent que :

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

- La déflexion maximale corrigée est plus proche de la référence que celle initialement mesurée. Toutefois, on observe une dispersion légèrement plus grande des résultats, entre les différents points de mesure. Cette dispersion reste cependant inférieure à celle observée lors des essais d'évaluation métrologique de l'appareil, réalisés dans les années 1990.
- Le bassin de déflexion corrigé est plus conforme au bassin de référence que celui mesuré initialement. La correction est d'autant plus efficace que la chaussée est rigide. En effet, pour une chaussée rigide, les hypothèses de mesure du curviamètre (déflexion et pente du bassin nulles à 3 m de la charge) sont peu réalistes, et conduisent à une sous-estimation de la déflexion. Pour une chaussée souple, par contre, la mesure brute du curviamètre est relativement juste, et donc l'effet de la correction est plus limité.
- Les modules déterminés par calcul inverse à partir du bassin corrigé sont également beaucoup plus pertinents. Ceci est particulièrement vrai pour les chaussées épaisses, pour lesquelles l'estimation du module du sol est largement améliorée.

Dans le chapitre II, une procédure de correction a également été proposée pour le deflectographe Flash. Il n'a pas été possible de valider cette procédure par des mesures sur site appropriées (essais de répétabilité et de justesse). En particulier les mesures du STAC envisagées pour cette validation se sont révélées inexploitables.

IV.5 Evaluation des indicateurs optimisés du bassin de déflexion sur les deux sites expérimentaux

Cette deuxième partie du chapitre IV vise à tester les indicateurs développés pour la détection de défauts, sur des mesures réelles sur chaussées. En particulier, il s'agit d'évaluer l'influence de la variabilité des bassins de déflexion sur ces indicateurs. Pour cela, pour chaque site étudié, différents indicateurs optimisés ont été calculés, en se basant sur le principe exposé dans le Chapitre III, à partir de la structure de référence définie pour chaque chaussée. Pour faciliter les comparaisons, l'indicateur portant sur les modules a été normalisé entre -0.5 et 1, une valeur de -0.5 correspondant à un module divisé par 2, et une valeur de 1 à un module multiplié par deux. Une valeur négative (baisse de module) peut être interprétée comme un endommagement de la couche de chaussée, tandis qu'une valeur positive indique une augmentation de module, par rapport à la valeur de référence. Un indicateur nul signifie que le module de la couche de chaussée est identique au module de référence.

La sensibilité des indicateurs portant sur la variation des modules à la dispersion des bassins mesurés a été évaluée en calculant les différents indicateurs pour tous les bassins de déflexion mesurés en un même point. La structure étant constante en un point de mesure, l'étendue de variation de l'indicateur en ce point permet de définir sa répétabilité, et d'établir des seuils au-delà desquels la variation de l'indicateur pourra être considérée comme significative. On montrera par cette analyse que pour certaines couches de chaussées, l'indicateur construit est hypersensible, c'est-à-dire que l'indicateur peut présenter de grandes

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

variations malgré une faible dispersion des mesures. Un indice caractérisant la sensibilité du bassin de déflexion aux variations du module d'une couche sera proposé pour déterminer si le calcul de l'indicateur est utile ou non. Ce travail a été effectué sur les différents points de mesure des 3 structures précédemment étudiées.

IV.5.1 Résultats pour le site du STAC

La structure du STAC comprend 3 couches de chaussée reposant sur le sol support. Pour chaque point de mesure, trois indicateurs optimisés, caractérisant les variations de module de chacune des couches, ont été construits : I_{BB} pour la couche de BB, I_{GB} pour la couche de GB et enfin $I_{GNT+sol}$ pour l'ensemble GNT + sol, considéré comme une seule couche. La création des fonctions de pondération repose sur la prise en compte des dérivées partielles $\frac{\partial w}{\partial E_k}$ au voisinage du module de référence de la couche étudiée. On impose l'orthogonalité des fonctions de pondération p_j . Les équations (IV.3), (IV.4), et (IV.5) rappellent les expressions des indicateurs optimisés.

$$\begin{aligned} I_{BB}(w_{mes}(x_c, \bullet)) &= \Lambda_{BB}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{BB}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \\ &= \int_{a=-1}^{b=3} p_{BB}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v - \int_{a=-1}^{b=3} p_{BB}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v \end{aligned} \quad (IV.3)$$

$$\begin{aligned} I_{GB}(w_{mes}(x_c, \bullet)) &= \Lambda_{GB}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{GB}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \\ &= \int_{a=-1}^{b=3} p_{GB}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v - \int_{a=-1}^{b=3} p_{GB}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v \end{aligned} \quad (IV.4)$$

$$\begin{aligned} I_{GNT+sol}(w_{mes}(x_c, \bullet)) &= \Lambda_{GNT+sol}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{GNT+sol}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \\ &= \int_{a=-1}^{b=3} p_{GNT+sol}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v \\ &\quad - \int_{a=-1}^{b=3} p_{GNT+sol}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v \end{aligned} \quad (IV.5)$$

La normalisation des indicateurs suit les hypothèses définies dans le chapitre III. Ainsi, pour un module 2 fois supérieur au module de référence, I_{Nj} sera égal à 1 et pour un module égal à la moitié du module de référence, la valeur de I_{Nj} est de -0.5.

La Figure IV-15 présente, pour le point B, les valeurs des 3 indicateurs optimisés normalisés pour les trois passages du curviamètre. Pour ces trois indicateurs, les valeurs varient entre - 0.25 et 0.25 ce qui correspond à des valeurs de module comprises entre 0.75 et 1.25 fois le

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

module de référence. Les valeurs des indicateurs sont plus proches de 0 pour la mesure n°1, avec I_{NBB} presque nul ($<0.3\%$). Cette mesure est la plus proche du bassin de référence comme l'avait montré l'étude menée au § IV.3.1.3.2.2 (Figure IV-7).

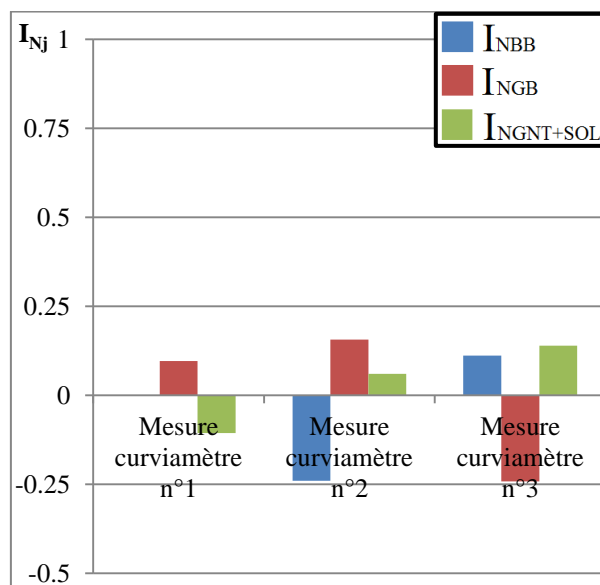


Figure IV-15 : Comparaison des indicateurs normalisés optimisés pour les trois passages – Point B.

Le Tableau IV-12 compare, pour les points de mesure B, C, D et E, les moyennes, et les intervalles de variation des trois indicateurs. Pour les trois indicateurs, les valeurs moyennes (qui traduisent l'écart sur les modules) sont comprises entre -0.19 et + 0.1. Pour l'ensemble des points de mesure, les valeurs des indicateurs sont comprises entre -0.25 et + 0.39. Les intervalles de variation restent cependant compris, dans tous les cas, entre ± 0.25 autour de la moyenne.

Tableau IV-12 : Comparaison des moyennes et des intervalles de variation des différents indicateurs normalisés, portant sur les modules des couches de chaussées, pour les quatre points de mesure.

| | I_{NBB} | | I_{NGB} | | $I_{NGNT+SOL}$ | |
|---------|--------------|---------|---------------|---------|----------------|---------|
| | Intervalle | Moyenne | Intervalle | Moyenne | Intervalle | Moyenne |
| Point B | [-0.24;0.11] | -0.04 | [-0.24;0.16] | 0.00039 | [-0.11;0.14] | 0.031 |
| Point C | [-0.23;0.05] | -0.11 | [-0.13;0.39] | 0.1 | [-0.05;0.12] | 0.021 |
| Point D | [-0.15;0.15] | -0.012 | [-0.25;0.27] | -0.073 | [-0.15;0.17] | 0.012 |
| Point E | [-0.19;0.18] | 0.016 | [-0.25;-0.07] | -0.19 | [-0.06;0.31] | 0.084 |

IV.5.2 Résultats pour le site de GAP

Pour le site de GAP, qui comprend 2 sections, les indicateurs optimisés ont été calculés pour chacune des 2 structures de référence en se restreignant aux couches structurelles. Pour la section 3, quatre indicateurs relatifs aux couches de GB, MB, GNT et

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Sol sont construits. Les équations (IV.6), (IV.7), (IV.8) et (IV.9) rappellent les expressions des indicateurs optimisés.

$$\begin{aligned} I_{GB}(w_{mes}(x_c, \bullet)) &= \Lambda_{GB}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{GB}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \\ &= \int_{a=-1}^{b=3} p_{GB}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v - \int_{a=-1}^{b=3} p_{GB}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v \end{aligned} \quad (IV.6)$$

$$\begin{aligned} I_{MB}(w_{mes}(x_c, \bullet)) &= \Lambda_{MB}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{MB}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \\ &= \int_{a=-1}^{b=3} p_{MB}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v - \int_{a=-1}^{b=3} p_{MB}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v \end{aligned} \quad (IV.7)$$

$$\begin{aligned} I_{GNT}(w_{mes}(x_c, \bullet)) &= \Lambda_{GNT}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{GNT}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \\ &= \int_{a=-1}^{b=3} p_{GNT}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v - \int_{a=-1}^{b=3} p_{GNT}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v \end{aligned} \quad (IV.8)$$

$$\begin{aligned} I_{Sol}(w_{mes}(x_c, \bullet)) &= \Lambda_{Sol}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{Sol}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \\ &= \int_{a=-1}^{b=3} p_{Sol}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v - \int_{a=-1}^{b=3} p_{Sol}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v \end{aligned} \quad (IV.9)$$

Pour la section 2, deux indicateurs relatifs aux couches de GNT et sol sont construits et leur expression est rappelée dans les équations (IV.10) et (IV.11).

$$\begin{aligned} I_{GNT}(w_{mes}(x_c, \bullet)) &= \Lambda_{GNT}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{GNT}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \\ &= \int_{a=-1}^{b=3} p_{GNT}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v - \int_{a=-1}^{b=3} p_{GNT}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v \end{aligned} \quad (IV.10)$$

$$\begin{aligned} I_{Sol}(w_{mes}(x_c, \bullet)) &= \Lambda_{Sol}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{Sol}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \\ &= \int_{a=-1}^{b=3} p_{Sol}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v - \int_{a=-1}^{b=3} p_{Sol}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v \end{aligned} \quad (IV.11)$$

La Figure IV-16 présente les valeurs des indicateurs I_{Nj} pour les différents bassins mesurés.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Pour la section 3, on peut faire les conclusions suivantes :

- Les valeurs de I_{NSOL} sont faibles, avec une valeur moyenne de 0.03, et une valeur maximale de 0.15.
- L'intervalle des valeurs de I_{NGNT} est plus large (environ 0.75) avec une valeur moyenne de 0.15. La valeur la plus élevée (0.54) pourrait être interprété comme un module plus élevé de la GNT.
- Pour les couches bitumineuses, la situation est très différente. Les valeurs de I_{NGB} et I_{NMB} sont généralement hors limites, soit supérieures à 1 ou inférieures à -0.5. Pourtant, on avait observé que les écarts entre les bassins de déflexion mesurés et le bassin moyen, ou le bassin de référence étaient faibles (figure IV.10). Ceci montre la grande sensibilité des indicateurs relatifs aux modules des couches bitumineuses à une faible variation du bassin de déflexion, qui sera expliquée plus loin.

Pour la section 4, les indicateurs calculés concernent uniquement la GNT et le sol. Les intervalles de variation des indicateurs sont d'environ 0.5, avec une valeur moyenne légèrement positive, inférieure à 0.1. Pour cette section, on retrouve des intervalles de variation des indicateurs, dus à la dispersion des mesures, similaires à ceux de la section du STAC soit ± 0.25 autour de la moyenne, ce qui correspond à une variation des modules de $\pm 25\%$.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

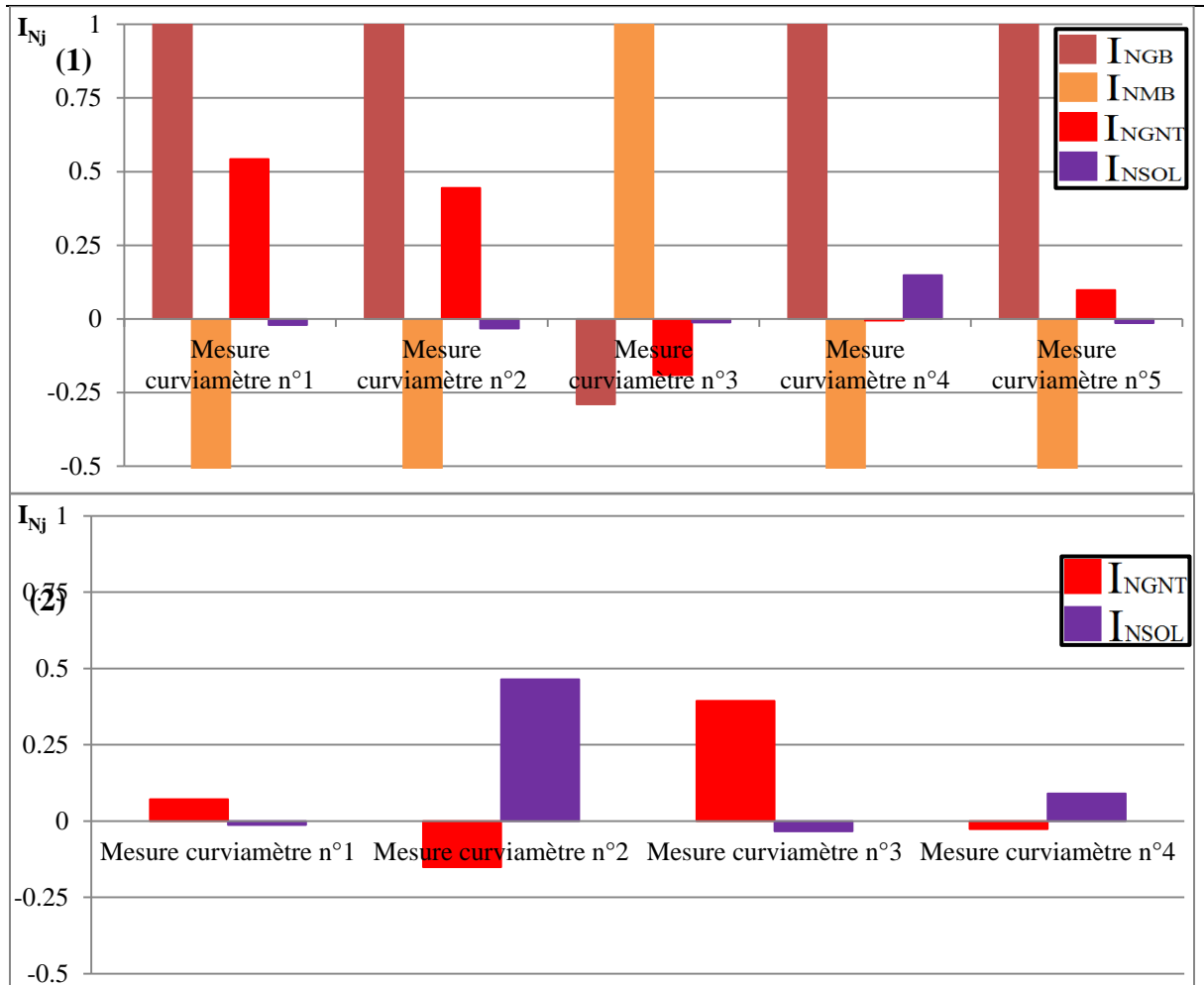


Figure IV-16 : Evolution des indicateurs I_{Nj} pour les différents passages du curviamètre – (1) Section 3 – (2) Section 4.

Pour mieux comprendre la sensibilité des indicateurs à la dispersion des bassins de déflexion, une étude de sensibilité théorique a été conduite pour les sections 3 et 4. A partir du modèle de référence de la structure, on a défini des variantes de chaque structure, avec des valeurs de module d'élasticité multipliées ou divisées par 2, pour chaque couche de chaussée. Le bassin de déflexion théorique simulé avec chaque variante a ensuite été comparé au bassin théorique de référence, en calculant l'indice I_{SimM_c} , caractérisant l'écart entre les deux bassins.

(IV.12)

$$I_{SimM_c} = \frac{\sum_{x=-1}^3 (d_{simM_c}(x) - d_{simM}(x))^2}{\sum_{x=-1}^3 (d_{simM}(x))^2}$$

Avec :

M = indice représentant le modèle de calcul utilisé pour la simulation de la déflexion (A pour ALIZE et C pour CESAR) ;

$d_{simM_c}(x)$ la simulation avec ALIZE de la déflexion mesurée au point x , avec un module de couche modifié.

$d_{simM}(x)$ = simulation de la déflexion mesurée par l'appareil au point x sur la structure de référence.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Un indice I_{SimM_C} faible indique que le bassin de déflexion est peu sensible aux variations de module de la couche considérée (deux bassins de forme très voisine pouvant alors correspondre à des valeurs de modules très différentes de cette couche). Si I_{SimM_C} est faible, l'indicateur optimisé relatif aux modules aura alors tendance à présenter de grandes variations, malgré des bassins de déflexion proches, et cet indicateur ne sera pas pertinent

Pour estimer la pertinence de l'indicateur, on pourra comparer l'indice I_{SimA_C} à l'indice $I_{moybassin}$ qui représente la dispersion des bassins. Si l'indice $I_{moybassin}$ (Tableau IV-4) est plus grand que I_{SimM_C} alors cela signifie que la dispersion naturelle des mesures va engendrer de trop grandes variations de l'indicateur portant sur les modules.

Le Tableau IV-13 présente les indices I_{SimA_C} calculés pour chaque variante de structure de chaussée avec le logiciel ALIZE, avec des modules de couches multipliés ou divisés par 2.

Tableau IV-13 : Comparaison des indices I_{SimA_C} caractérisant l'écart entre le bassin simulé par ALIZE pour la structure de référence, et pour les variantes, où le module d'une couche a été modifié – Section 3 et Section 4.

| Matériaux | Section 3 | | Section 4 | |
|----------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|
| | Modules (MPa) | I_{SimA_C} (%) | Modules (MPa) | I_{SimA_C} (%) |
| Béton bitumineux | 3500 | 4.8 | / | / |
| | 14000 | 2.7 | / | / |
| Grave bitume | 4500 | 0.1 | / | / |
| | 18000 | 0.2 | / | / |
| Matériaux bitumineux | 1500 | 0.8 | 3000 | 0.7 |
| | 6000 | 1.2 | 12000 | 0.4 |
| GNT | 70 | 5.7 | 100 | 5.5 |
| | 280 | 5.2 | 400 | 3.8 |
| Sol | 32.5 | 2.5 | 25 | 27.7 |
| | 130 | 2.8 | 100 | 12.3 |

Pour la section 3, le Tableau IV-13 montre que :

- Pour la couche de roulement, pour la GNT et pour le sol, les valeurs de I_{SimA_C} sont assez élevées, et varient entre 2.5 % et 5.7 %. Ces valeurs sont largement supérieures à l'indice de dispersion des bassins de déflexion (pour des mesures répétées au même point) $I_{moybassin} < 0,32$ % (Tableau IV-4). On peut en conclure que pour ces couches, les indicateurs relatifs aux modules seront peu affectés par la dispersion des mesures, et donc que ces indicateurs seront pertinents.
- Pour les couches de grave bitume et de matériaux bitumineux, par contre, les valeurs de l'indice I_{SimA_C} sont faibles (entre 0.1 % et 1.2 %). Ces valeurs sont proches ou inférieures à l'indice $I_{moybassin}$, caractérisant la dispersion des bassins de déflexion (Tableau IV-4). Pour ces couches, on peut donc en conclure que la forme du bassin de déflexion est peu sensible à la variation de module de ces couches. Les indicateurs relatifs aux modules seront alors fortement affectés par la dispersion des mesures, et leur pertinence sera faible. Cela explique les valeurs incohérentes des indicateurs

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

obtenues précédemment pour ces deux couches (Figure IV-16). Pour obtenir des d'indicateurs plus fiables, une solution possible est de regrouper les couches de grave bitume et de matériaux bitumineux, ce qui aura pour effet de rendre l'indicateur moins sensible à la dispersion naturelle des mesures. Ceci est testé plus loin.

Pour la section 4, les valeurs de I_{SimAC} sont toutes supérieures à l'indice de dispersion des bassins ($I_{moybassin} < 0.52$), pour la couche de roulement, pour la GNT et pour le sol. Les indicateurs relatifs aux modules seront donc bien sensibles à un changement d'état de la structure, et peu sensibles à la dispersion naturelle des mesures. L'indice lié au sol, particulièrement élevé, montre que l'indicateur lié au module du sol sera particulièrement efficace, et très peu sensible à la dispersion des bassins mesurés.

En conclusion, ces différents exemples montrent la grande sensibilité des indicateurs optimisés, que l'on a développés, à un changement de forme du bassin de déflexion. L'indice I_{SimAC} , relatif à un changement de module, peut alors aider à évaluer la pertinence de ce indicateurs.

- Si I_{SimAC} est supérieur à l'indice de dispersion des bassins mesurés $I_{moybassin}$, on pourra obtenir des indicateurs satisfaisants. On notera que dans les cas étudiés, pour des valeurs de $I_{moybassin}$ inférieures à I_{SimAC} , les indicateurs donnent des résultats satisfaisants si l'indice I_{SimAC} est de l'ordre de 2 %.
- Par contre, si I_{SimAC} est du même ordre de grandeur ou inférieur à l'indice de dispersion des mesures, les indicateurs déterminés seront trop sensibles à cette dispersion, et ne seront pas pertinents.

Pour la section 3, on a recalculé les indicateurs optimisés relatifs aux modules en réunissant les 2 couches de matériaux bitumineux (GB et MB) en une seule couche de 0.2 m d'épaisseur. Le module de cette couche unique a été ajusté pour obtenir une nouvelle structure de référence, avec un bassin de déflexion identique. Les valeurs de module ainsi obtenues sont données dans le Tableau IV-14. A partir de cette nouvelle structure de référence, trois nouveaux indicateurs optimisés ont été construits, à savoir I_{NGB+MB} , I_{NGNT} et I_{NSOL} .

Tableau IV-14 : Structure de chaussée obtenue pour la section 3, après regroupement des deux couches d'assise bitumineuses.

| Section 3 | |
|---------------|--------------|
| Epaisseur (m) | Module (MPa) |
| 0.07 | 7000 |
| 0.2 | 3500 |
| 0.5 | 140 |
| 3.2 | 65 |
| Semi-infini | 55000 |

Le Tableau IV-15 présente les valeurs d'indices I_{SimAC} obtenues pour cette nouvelle structure, lorsqu'on multiplie par 2 ou divise par 2 le module de la nouvelle couche. Les valeurs de

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

l'indice restent identiques pour les couches de GNT et de sol. La nouvelle valeur de I_{SimAc} est plus élevée que celles définies précédemment pour les couches de GB et de MB. L'indice reste plus faible que celui des couches de roulement, de GNT et de sol. Le nouvel indice, proche de 2 %, est cependant supérieur à l'indice de dispersion des mesures (0.3 %). En réduisant le nombre de couches de la structure, il semble donc possible de définir des d'indicateur relatifs aux modules qui seront plus pertinents, et moins sensibles à la dispersion des mesures.

Tableau IV-15 : Comparaison des indices I_{SimAc} caractérisant l'écart entre les bassins simulés avec ALIZE pour la structure de référence et pour les variantes, où le module d'une couche a été modifié – Section 3.

| Matériaux | Section 3 | | I_{Ni} |
|-----------|---------------|-----------------|--------------|
| | Modules (MPa) | I_{SimAc} (%) | |
| GB + MB | 1750 | 2 | I_{NGB+MB} |
| | 7000 | 1.9 | |

La Figure IV-17 présente les valeurs des indicateurs optimisés relatifs aux modules pour chaque passage du curviamètre. Pour la section 3, les indicateurs I_{NGB+MB} , I_{NGNT} et I_{NSOL} varient entre -0.25 et 0.5 pour les cinq mesures du curviamètre. Ces intervalles de valeurs sont similaires à ceux obtenus pour les autres cas de chaussées étudiés.

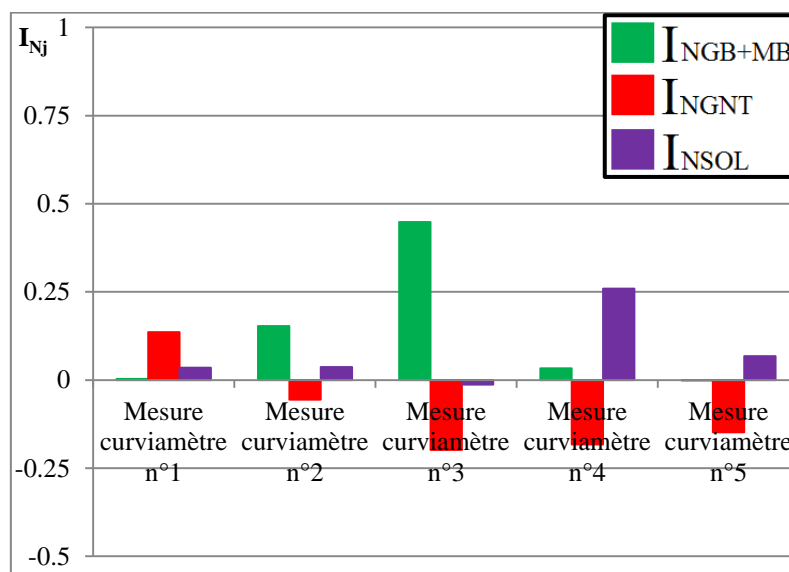


Figure IV-17 : Evolution des indicateurs I_{Nj} pour les différents passages du curviamètre – (1) Section 3 - (2) Section 4.

Le Tableau IV-16 résume les valeurs des indicateurs relatifs aux modules obtenues pour les sections 3 et 4. Pour la section 3, les valeurs moyennes des indicateurs sont proches de zéro et l'étendue de variation des indicateurs reste inférieure à 0.5. L'intervalle le plus grand est obtenu pour la couche bitumineuse qui a l'indice de sensibilité, I_{SimAc} , le plus petit. L'intervalle le plus faible est obtenu pour le sol. Pour la section 4, les indicateurs I_{NGNT} et I_{NSOL} sont compris entre [-0.15 ; 0.46].

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Tableau IV-16 : Comparaison des moyennes et des intervalles de variation des différents indicateurs normalisés, portant sur les modules des couches de chaussées - Sections 3 et 4.

| | $I_{\text{NGB+MB}}$ | | I_{NGNT} | | I_{INSOL} | |
|-----------|---------------------|---------|-------------------|---------|--------------------|---------|
| | Intervalle | Moyenne | Intervalle | Moyenne | Intervalle | Moyenne |
| Section 3 | [-0.0003 ; 0.45] | 0.13 | [-0.2 ; 0.1] | -0.09 | [-0.01 ; 0.25] | 0.08 |
| Section 4 | / | / | [-0.15 ; 0.39] | 0.07 | [-0.03 ; 0.46] | 0.12 |

IV.6 Bilan des procédures développées pour l'amélioration de l'interprétation des mesures du curviamètre

Cette première partie a permis de valider les procédures mises en place dans les chapitres II et III pour l'interprétation des mesures du curviamètre. Cette validation a été réalisée sur trois chaussées, avec des niveaux de déflexion maximale variant entre 10 mm/100 et 100 mm/100. Pour chacune des structures, un modèle de référence a été établi. Comme déjà montré dans le chapitre II sur des cas théoriques, la procédure de correction des mesures est également apparue très efficace sur les mesures réelles. Le niveau de déflexion maximale ainsi que la forme du bassin corrigé sont plus proches du bassin de référence. La procédure de correction permet ainsi d'éliminer les biais liés au curviamètre et d'obtenir des bassins de déflexion indépendants de l'appareil ayant réalisé la mesure. Le calcul inverse à partir des mesures corrigées permet également d'obtenir des modules rétro-calculés plus satisfaisants puisque l'écart avec les modules de référence reste généralement inférieur à 25 % alors qu'il atteint plus de 50 % en utilisant les mesures non corrigées.

Le calcul des indicateurs optimisés relatifs aux modules des couches a confirmé leur très grande sensibilité à un changement de forme du bassin. On a montré que pour valider ces indicateurs, il est nécessaire de vérifier la sensibilité du bassin de déflexion à des variations de module d'une couche, caractérisée par l'indice $I_{\text{Sim}_{AC}}$ est compatible avec la dispersion naturelle des bassins mesurés. Cette dispersion des mesures est variable suivant les points de mesure, mais généralement de l'ordre de 0.5 %. Une valeur de l'indice $I_{\text{Sim}_{AC}}$ inférieure à ce seuil ne permet pas d'obtenir un indicateur fiable. Dans ce cas, pour améliorer la représentativité des indicateurs, il est possible de regrouper plusieurs couches de matériaux similaires pour obtenir des indicateurs compatibles avec la dispersion des bassins mesurés. Pour des valeurs d'indice $I_{\text{Sim}_{AC}}$ supérieures à ce seuil, le calcul d'indicateurs est possible. Cet indicateur sera d'autant moins sensible à la dispersion des mesures que la valeur de l'indice sera élevée. Sur les quelques cas analysés un indice d'environ 2 % est un minimum requis pour pouvoir calculer un indicateur fiable.

Pour un indice de l'ordre de 2 %, la dispersion des bassins mesurés conduit à des indicateurs compris dans un intervalle de ± 0.25 environ. Seuls des indicateurs supérieurs à ce seuil pourront donc être considérés comme traduisant une évolution significative de la structure.

IV.7 Application de la méthode des indicateurs à un site test présentant des défauts d'interfaces

L'IFSTTAR a construit il y a quelques années un site test de chaussée comportant des défauts artificiels d'interface. Ce site est utilisé notamment pour tester différentes méthodes d'essais non destructives, destinées à la détection de défauts d'interface. Le site est situé sur l'un des anneaux du manège de fatigue, ce qui ne permet pas de réaliser des mesures avec un curviamètre ou un déflectographe, en raison de la longueur réduite de la chaussée (chaussée de 25 m de long, correspondant à une partie de la piste circulaire du manège, d'une longueur totale de 125 m, et d'un diamètre de 40 m). Pour cette raison, les mesures de déflexion ont été réalisées sur le site avec le FWD. En particulier, on utilisera une campagne de mesures FWD réalisée en février 2018 pour appliquer la méthode des indicateurs optimisés, pour la détection des décollements d'interfaces présents sur cette chaussée.

IV.7.1 Description du site du manège de fatigue

Le site test avec défauts s'étend sur 25 m de long, sur l'anneau d'essai C du manège de fatigue. Le Tableau IV-17 présente la structure de la chaussée. Elle est constituée d'une couche de roulement (BBSG, 6 cm), d'une couche de base (GB, 8 cm), et d'une couche de fondation (GNT, 30 cm), le tout reposant sur un sol existant, constitué de sable argileux, d'une portance d'environ 80 MPa. Un substratum rigide semi-infini situé à 3 m de profondeur vient compléter cette structure.

Tableau IV-17 : Structure de la chaussée du manège de fatigue

| Matériau | Epaisseur (m) |
|----------------------|---------------|
| BBSG | 0.06 |
| GB | 0.08 |
| GNT | 0.3 |
| Sol (sable argileux) | 2.6 |
| Substratum rigide | Semi-infini |

Des défauts d'interface, de différents types (couche de sable, géotextile, absence de couche d'accrochage) et de différentes dimensions, ont volontairement été incorporés dans la chaussée. Ils se situent entre la couche de roulement et la couche de base. La Figure IV-18 présente une photographie prise préalablement à la pose de la couche de roulement, montrant les différents défauts intentionnellement introduits dans la chaussée (1) et leur position sur la piste (2). Ils sont centrés sur le rayon $R=16$ m, qui correspond au centre de la bande de roulement où passent les essieux du manège (Simonin, et al., 2013).

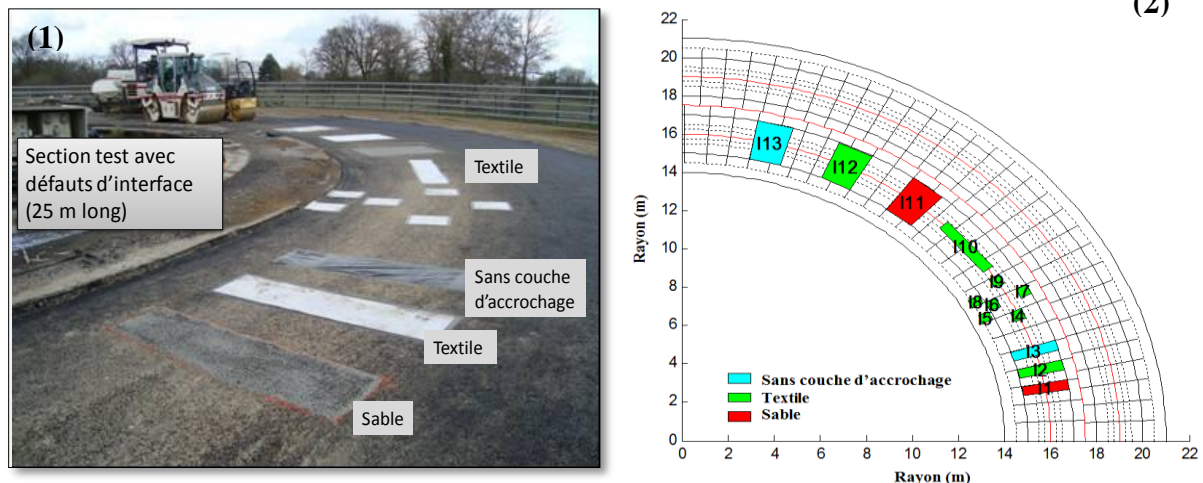


Figure IV-18 : manège de fatigue – (1) : vue des défauts avant la pose de la couche de roulement (2) : Représentation graphique de la position des différents défauts sur la piste du manège (2) (Simonin, et al., 2016).

Les épaisseurs de la couche de sable et de géotextile sont supposées identiques et égales à 1 cm. Ces défauts se situent dans la couche de roulement. L'épaisseur de cette couche est donc réduite à 5 cm localement. Le Tableau IV-18 donne les caractéristiques des défauts choisis pour l'analyse des indicateurs.

Tableau IV-18 : Caractéristiques des trois défauts choisis pour l'analyse des indicateurs (Simonin, et al., 2013; Simonin, et al., 2013).

| Défaut | Type | Dimensions (m) | Position sur le rayon R=16 m(m) |
|--------|--------------------------|----------------|---------------------------------|
| I11 | Sable | 1.5x2 m | [13.5; 15] |
| I12 | Textile | 1.5x2 m | [17; 18.5] |
| I13 | Sans couche d'accrochage | 1.5x2 m | [20.5; 22] |

IV.7.2 Réalisation et analyse préliminaire des mesures

Le FWD utilisé pour les mesures possède 12 géophones, dont quatre sont situés à une distance de 0.2 m autour de la charge. Le diamètre de la plaque de chargement du FWD est de 0.3 m. Pour la mesure du bassin de déflexion, neufs géophones sont exploités. Ils sont positionnés suivant une ligne droite partant du centre de la plaque et se situent à des distances croissantes du centre de la charge, de 0 m, 0.2 m, 0.3 m, 0.45 m, 0.6 m, 0.9 m, 1.2 m, 1.5 m et 1.8 m. Ils sont positionnés selon un profil longitudinal, situé au rayon R=16 m sur la chaussée. Les déflexions maximales enregistrées par chacun de ces 9 géophones sont notées D₀ à D₈ en s'éloignant du centre de la charge.

Le FWD a réalisé des mesures suivant un profil longitudinal sur une longueur de 11 m. Les mesures du FWD ont ainsi débuté 0.8 m avant le défaut I11 et se sont terminées 2 m après le défaut I13. L'intervalle entre 2 mesures consécutives a été de 0.1 m sur les 67 premières mesures, puis de 0.2 m pour les 4.2 derniers mètres de mesures.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Afin de se conformer à la référence française en matière de charge maximale légale à l'essieu, les mesures du FWD sont corrigées pour se ramener à une force constante de 65 kN, en supposant une relation linéaire entre force et déflexion. La Figure IV-19 présente les déflexions ajustées obtenues avec chaque géophone le long de l'itinéraire. Pour le géophone situé au centre de la plaque du FWD (D_0), les déflexions mesurées augmentent fortement à l'approche des différents défauts de la chaussée. Pour les géophones proches de la plaque (D_1 et D_2), on observe également une augmentation de la déflexion, mais de moindre importance. Pour les autres géophones, les défauts influent peu sur la déflexion mesurée. Les déflexions loin de la charge sont plus influencées par les couches profondes de chaussée, qui ne sont pas affectées par les décollements, situés à faible profondeur (6 cm), sous la couche de roulement.

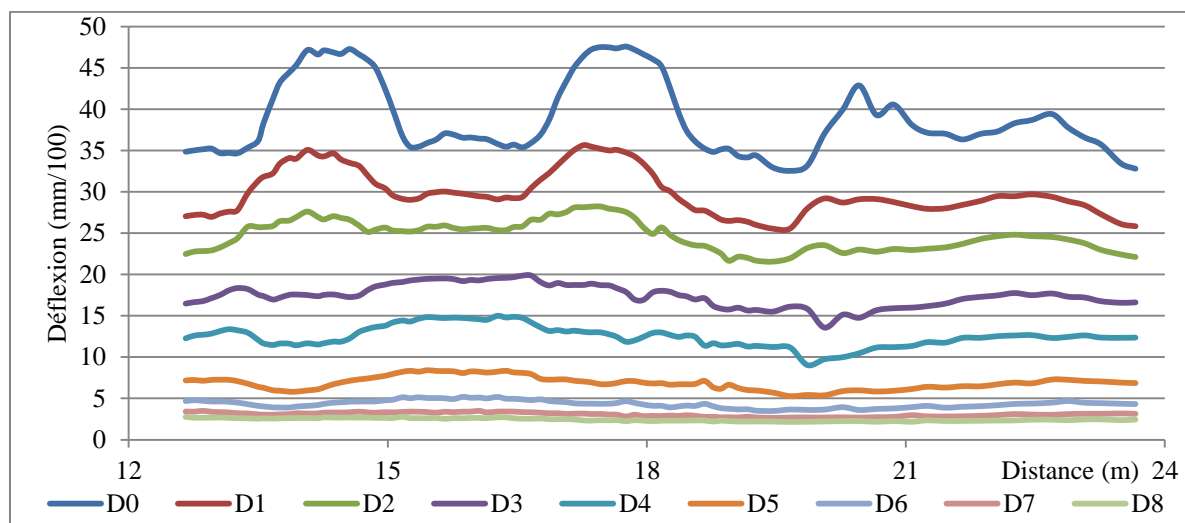


Figure IV-19 : Déflexions mesurées par chaque géophone du FWD le long de la section d'essai.

Pour évaluer les différences entre bassins de déflexion, quatre bassins moyens, représentatifs des différents états de l'interface BBSG/GB ont été calculés à partir des bassins mesurés par le FWD. Le bassin moyen sans défaut a été calculé à partir des sept premières mesures. Les bassins représentatifs des différents endommagements ont été déterminés à partir de la moyenne des six ou sept bassins de déflexion situés dans la zone centrale de chaque défaut. Les bassins relevés dans les zones de transition n'ont pas été analysés.

La Figure IV-20 compare les bassins de déflexion moyens ainsi calculés. Les variations de déflexion les plus importantes sont constatées pour la déflexion maximale au centre de la charge et à son voisinage. Les bassins convergent à partir de 0.5 m pour se rejoindre à 1 m de la charge. Au-delà, les bassins sont quasiment identiques. La différence de niveau de déflexion maximale est significative passant de 35 mm/100 (dans la zone sans défaut) à 47 mm/100 (pour les défauts constitués de géotextile et de sable). Les bassins mesurés pour les défauts sable et géotextile se confondent. Ils présentent la plus forte déflexion maximale, correspondant au niveau d'endommagement le plus important de l'interface.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

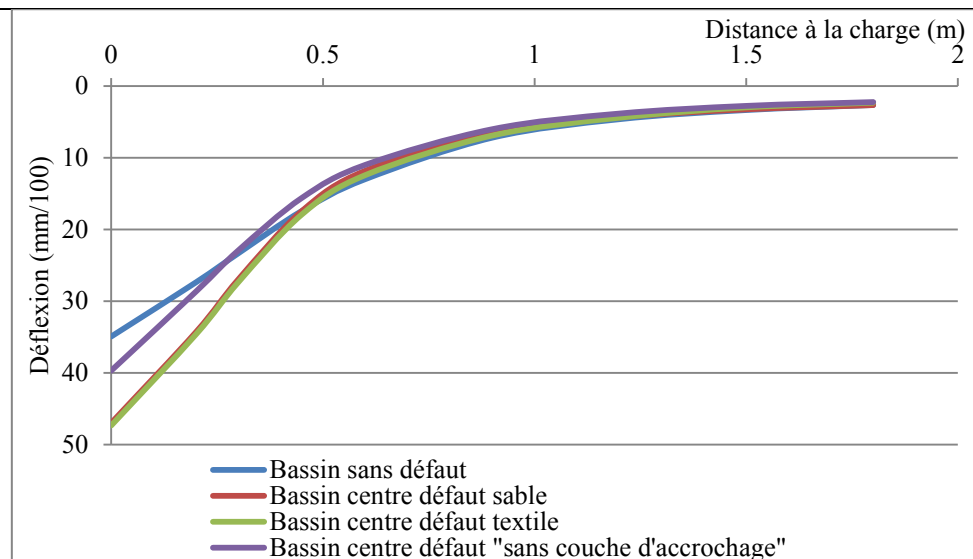


Figure IV-20 : Bassins de déflexion moyens mesurés par le FWD au-dessus des différents défauts.

Pour évaluer la dispersion des mesures, l'indice $I_{moybassin}$, qui compare la forme d'un bassin individuel à la moyenne des bassins situés dans la même zone, a été calculé dans chacun des 4 types d'interface. Le Tableau IV-19 donne les intervalles de variation des valeurs de l'indice $I_{moybassin}$ pour chacun des 4 types d'interfaces. Les valeurs de cet indice sont faibles comparativement à celles calculées pour le curviamètre, alors que dans le cas présent toutes les mesures ne sont pas effectuées au même point. Ceci s'explique par la meilleure répétabilité du FWD, par rapport au curviamètre. La dispersion la plus importante s'observe pour les bassins de déflexion obtenus avec le défaut « sans couche d'accrochage ». Ceci s'explique par la présence de pics de déflexion au centre de ce défaut, traduisant une plus grande hétérogénéité de ce défaut, par rapport aux zones avec sable ou géotextile. Mais même dans ce cas, l'indice $I_{moybassin}$ reste faible (<0.25 %). Les bassins moyens obtenus sont donc bien représentatifs des quatre états d'interface étudiés.

Tableau IV-19 : Etendue de variation de l'indice $I_{moybassin}$ qui caractérise l'écart entre le bassin moyen et les différents bassins mesurés.

| | $I_{moybassin}$ (%) |
|--|---------------------|
| Bassin sans défaut | [0.003 ; 0.08] |
| Bassin au centre de la zone avec sable | [0.004 ; 0.03] |
| Bassin au centre de la zone avec géotextile | [0.01 ; 0.1] |
| Bassin au centre de la zone sans couche d'accrochage | [0.01 ; 0.25] |

IV.7.3 Modélisation de la structure de chaussée

Le calcul des indicateurs nécessite d'avoir un modèle de référence de la structure de chaussée, pour en déduire des fonctions de pondération du bassin de déflexion. Un premier modèle a été défini en utilisant le logiciel ALIZE, qui suppose notamment des couches infinies en plan, et des interfaces entre deux couches identiques sur l'ensemble de la structure.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Cette première modélisation a permis d'obtenir une première estimation des modules des couches de la chaussée. Une seconde modélisation, a été réalisée avec un modèle aux éléments finis, en utilisant le logiciel CESAR-LCPC. Cette dernière a permis de simuler des défauts d'interface de longueur finie, et ainsi de calculer également des bassins de déflexion dans les zones de transition.

IV.7.3.1 Modélisation de la chaussée avec ALIZE

Afin de déterminer les modules des différentes couches de la chaussée, des calculs inverses ont été réalisés à partir des mesures du FWD, avec le module « Rétrocalcul » du logiciel ALIZE. Le premier calcul a été réalisé pour le bassin moyen sans défaut, pour estimer les modules des matériaux de la structure saine (BBSG, GB, GNT et sol). Des calculs inverses ont ensuite été réalisés avec les bassins moyens obtenus au centre des défauts sable/textile. Ils ont été utilisés pour déterminer seulement le module de la couche mince « équivalente », représentant l'interface, en conservant les modules des autres matériaux, issus du calcul précédent. Le Tableau IV-20 présente les modules déterminés par calcul inverse pour les bassins sans défaut (1) et avec le défaut sable ou textile (2). La valeur de module obtenue pour la couche mince de sable ou de géotextile constituant l'interface (d'une épaisseur de 1 cm) est égale à 94 MPa. La valeur est identique car les deux bassins de déflexion sont confondus.

Tableau IV-20 : Modules obtenus par calcul inverse pour les bassins sans défaut (1) –et avec le défaut sable ou textile (2).

(1)

| Matériau | Epaisseur (m) | Module (MPa) |
|-------------------|---------------|--------------|
| BBSG | 0.059 | 6100 |
| Interface | 0.002 | 6400 |
| GB | 0.079 | 6400 |
| GNT | 0.3 | 305 |
| Sol | 2.6 | 170 |
| Substratum rigide | Semi-infini | 55000 |

(2)

| Matériau | Epaisseur (m) | Module (MPa) |
|-------------------------|---------------|--------------|
| BBSG | 0.05 | 6100 |
| Sable ou textile | 0.01 | 94 |
| GB | 0.08 | 6400 |
| GNT | 0.3 | 305 |
| Sol | 2.6 | 170 |
| Substratum rigide | Semi-infini | 55000 |

Pour le cas de l'interface sans couche d'accrochage, la zone n'a pas de bassins de déflexion homogènes. Nous avons considéré une couche mince de 2 mm et pour fixer le module de cette couche, nous avons calé le bassin de déflexion pour correspondre à l'état « ½ collé » calculé avec ALIZE. Ce bassin correspondant à l'état semi-collé est proche des bassins mesurés sur cette zone. La Figure IV-21 compare les bassins mesurés sur cette zone, le bassin mesuré au centre du défaut et les deux bassins simulés avec ALIZE avec interface « ½ collée » et prise en compte d'une couche mince de 2 mm. Les bassins mesurés sur cette zone sont légèrement

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

différents avec des déflexions maximales qui oscillent entre 36 mm/100 et 43 mm/100. Les deux bassins se rejoignent loin de la charge. Le bassin au centre du défaut semble représentatif de cette zone puisque la déflexion maximale est de 39.7 mm/100. Les deux simulations de bassins mesurés par le FWD sont pratiquement identiques. Elles présentent une déflexion maximale de 41.7 mm/100 et se situent entre les bassins extrêmes mesurés sur cette zone. Pour la suite du travail, l'interface sans couche d'accrochage sera matérialisée par une couche mince de 2 mm et de module 41 MPa, qui conduit à un bassin simulé avec ALIZE quasi-identique au cas d'une interface semi-collée.

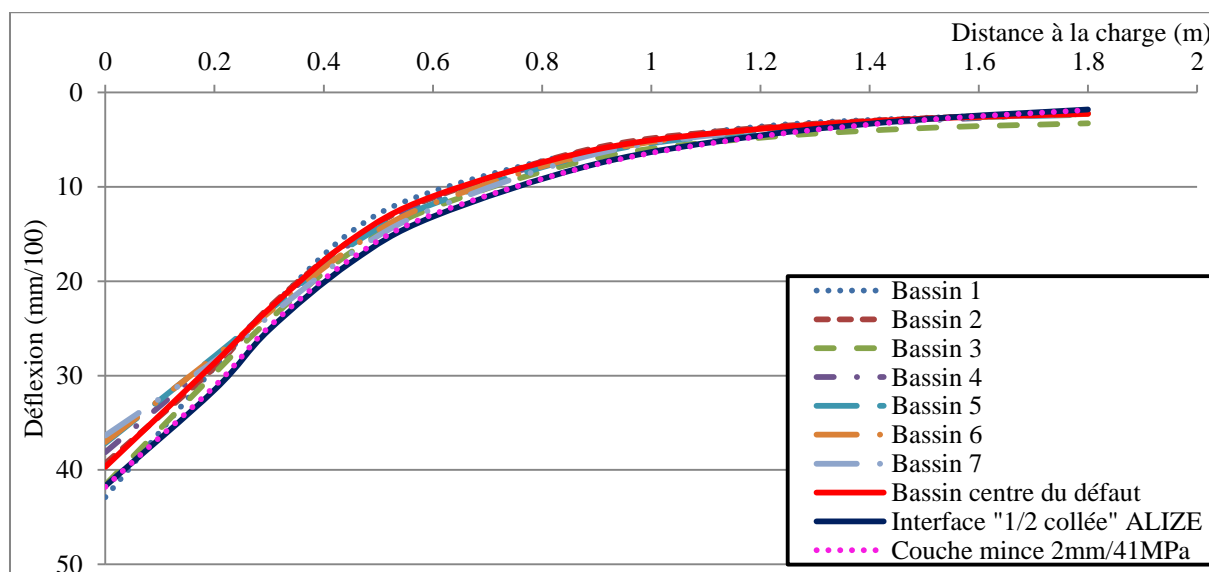


Figure IV-21 : Comparaison de bassins simulés avec ALIZE avec interface « 1/2 collée » et prise en compte d'une couche mince de 2 mm et de module 41 MPa.

IV.7.3.2 Modélisation de la chaussée par éléments finis avec CESAR-LCPC

Le modèle précédent permet de simuler convenablement les 3 états d'interface observés. Cependant, il suppose que l'interface entre les couches bitumineuses possède des propriétés constantes pour l'ensemble de la structure. Pour mieux comprendre les mesures le long de l'itinéraire et notamment dans les zones de transition, un modèle levant cette hypothèse a été construit. Il s'agit d'un modèle aux éléments finis 3D utilisant le logiciel CESAR-LCPC (Balay, 2001).

IV.7.3.2.1 Elaboration du maillage

Afin de simuler les mesures du FWD le long de la section, un maillage de l'ensemble de la structure a été réalisé avec le logiciel CESAR. La symétrie du problème dans le sens transversal permet de modéliser seulement la moitié de la structure. Pour représenter l'étude expérimentale menée, l'avancement du FWD a été simulé par pas de 0.1 m sur 11.4 m. Cela représente 115 positions de chargement et de bassins de déflexion différents. La longueur du maillage utilisé est de 30 m, la largeur de 6 m et la hauteur de 3.04 m. Ces dimensions sont

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

nécessaires pour éviter les effets de bords. La Figure IV-22 récapitule les dimensions du modèle, la localisation des défauts d'interface et les positions extrêmes de mesure du FWD.

Les calculs ont été réalisés en élasticité linéaire, et les modules des couches de chaussée ont été considérés identiques à ceux déterminés avec le logiciel ALIZE et présentés dans le Tableau IV-20. Comme avec ALIZE, les interfaces avec une couche de sable et une couche de géotextile ont été représentées par une couche de 1 cm d'épaisseur, avec un module de 94 MPa. L'interface « sans couche d'accrochage », a été représentée par une couche mince de 2 mm et de module 41 MPa.

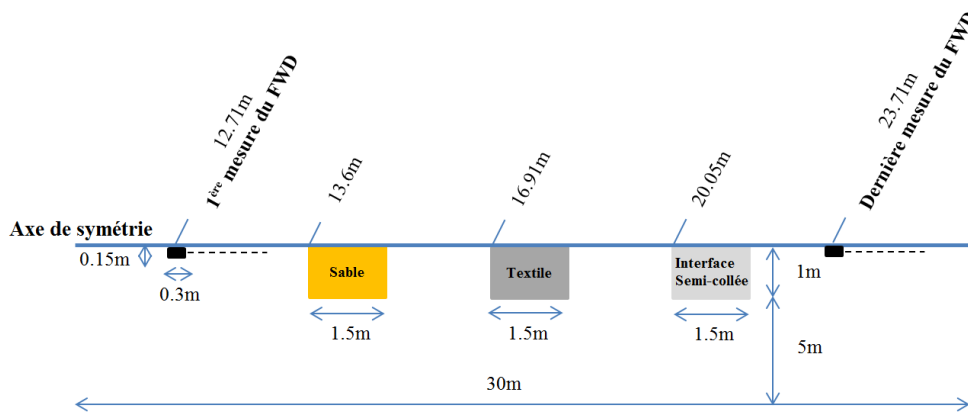


Figure IV-22 : Récapitulatif des dimensions du modèle de calcul, de la localisation des défauts d'interface et des positions extrêmes de mesure du FWD.

La Figure IV-23 représente le maillage mis en place pour la simulation numérique des mesures du FWD (1), (162 éléments suivant x, 14 suivants y et 16 suivant z) ainsi qu'un exemple de la déformée de la structure, sous le chargement du FWD (2). Des éléments de dimensions variables ont été utilisés, afin d'avoir une meilleure précision de calcul près de la charge, tout en conservant un temps de calcul relativement faible.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

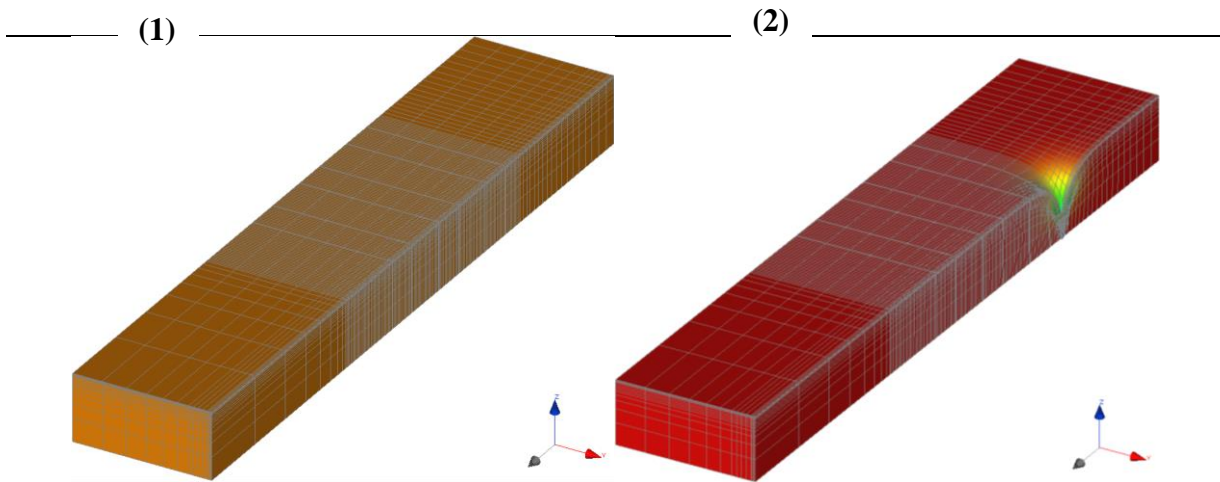


Figure IV-23 : Vue du maillage initial de la structure (1) et du maillage déformé (2) pour la première position de la charge.

IV.7.3.2.2 Description de la charge du FWD

Lors de la simulation CESAR, la plaque du FWD a été représentée par une surface rectangulaire, chargée par une pression verticale uniforme, pour s'adapter aux éléments du maillage. Cette surface, et la pression appliquée, ont été ajustées afin de conserver une force de 65 kN, identique à celle appliquée par le FWD. Le Tableau IV-21 présente les caractéristiques du chargement du FWD selon la géométrie de la plaque.

Tableau IV-21 : Caractéristiques du chargement du FWD selon la géométrie de la plaque

| | Charge circulaire | Charge rectangulaire |
|---------------------------|-------------------|----------------------|
| Pression (MPa) | 0.9196 | 0.722 |
| Force (MN) | 0.065 | 0.065 |
| Surface (m ²) | 0.0709 | 0.09 |
| Dimension (m) | Rayon=0.15 m | L=0.3 m / l=0.3 m |

La Figure IV-24 compare, dans le cas de la structure saine, les simulations des bassins mesurés par le FWD, respectivement pour une charge circulaire (ALIZE) et rectangulaire (CESAR-LCPC). Les bassins se superposent presque parfaitement. Seul un léger écart sur la déflexion maximale est observé mais il ne représente que 0.6 mm/100. Ces résultats montrent que l'hypothèse d'une charge rectangulaire est acceptable.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

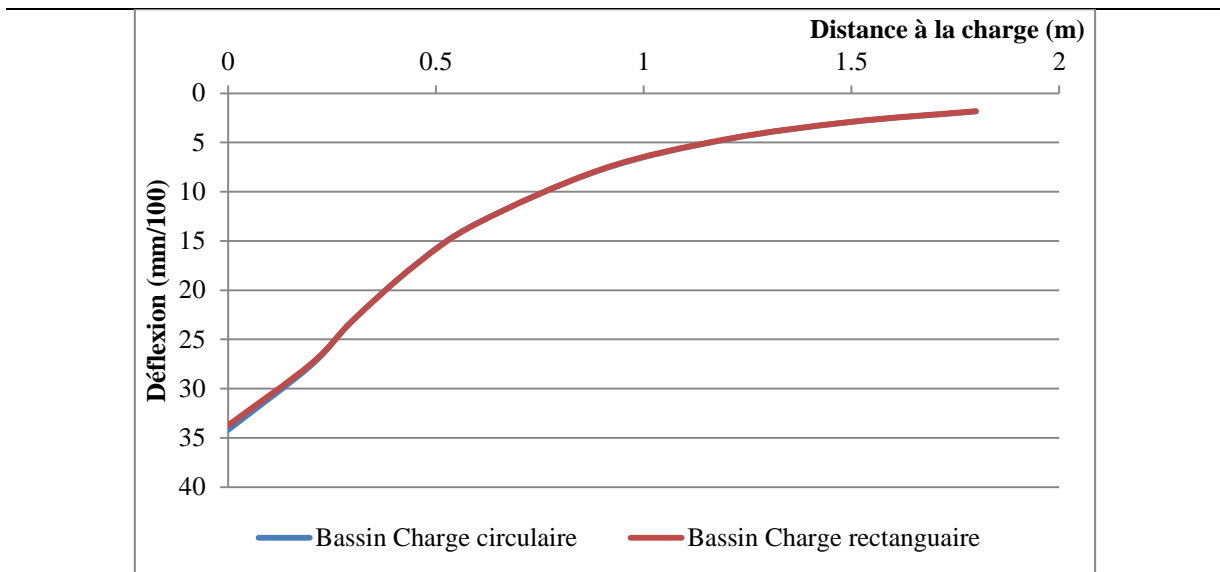


Figure IV-24 : Comparaison des bassins de déflexion sous le chargement du FWD obtenus avec une charge rectangulaire ou circulaire.

IV.7.4 Comparaison des mesures réelles et des simulations numériques.

Dans un premier, la comparaison entre les mesures réelles et les simulations numériques a été réalisée pour les bassins de déflexion complets, pour les 4 cas d'interfaces étudiés. Ensuite la comparaison a été faite sur la déflexion maximale, tout le long de la section auscultée.

La Figure IV-25 présente pour les 4 cas d'interface le bassin moyen mesuré par le FWD et les bassins simulés par ALIZE et CESAR. Pour l'ensemble des cas, les trois bassins sont très proches les uns des autres, ce qui confirme la qualité de la modélisation des différentes conditions d'interface. On notera toutefois que la déflexion maximale est légèrement plus faible pour la simulation avec CESAR que pour la simulation avec ALIZE, notamment en présence des défauts d'interface sable ou textile (43.7 mm/100 pour CESAR et 47.3 mm/100 pour ALIZE).

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

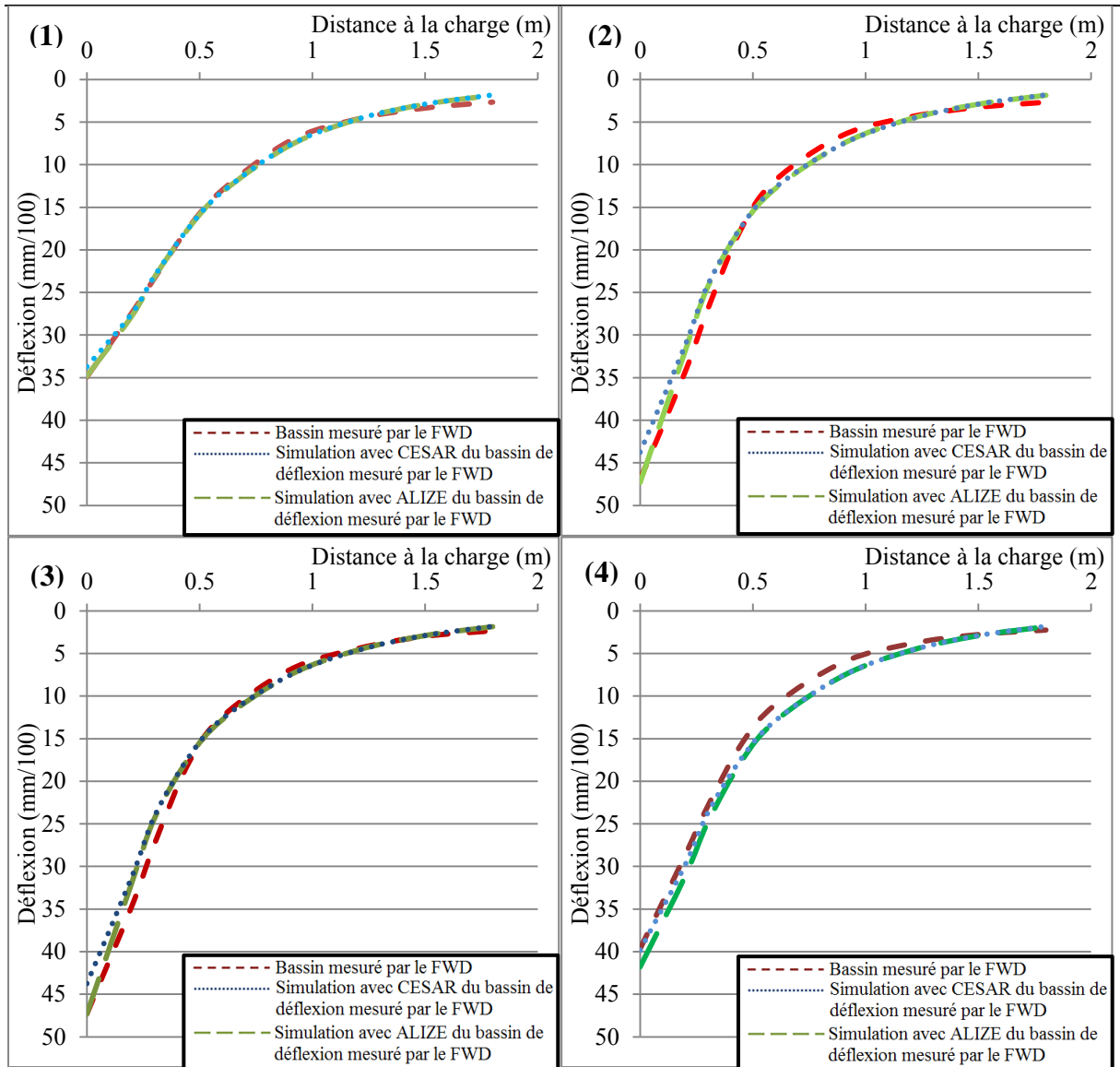


Figure IV-25: Comparaison entre les bassins mesurés par le FWD et simulés avec CESAR et ALIZE - (1) Sans défaut - (2) Centre du défaut sable - (3) Centre du défaut textile - (4) Centre du défaut « sans couche d'accrochage ».

Pour confirmer ces observations sur les bassins complets, l'indice $I_{SimMmoy}$ caractérisant l'écart entre les bassins moyens mesurés et simulés a été calculé. Le Tableau IV-20 résume les valeurs de $I_{SimMmoy}$ obtenues pour les simulations ALIZE et CESAR dans les quatre cas d'interface. Dans tous les cas et pour les deux modèles, l'indice $I_{SimMmoy}$ reste inférieur à 1 %, ce qui montre que la forme des bassins de déflexion est globalement bien reproduite par les deux modèles. L'indice calculé avec les simulations issues d'ALIZE est plus faible que celui calculé avec les simulations CESAR pour trois cas (interface saine, textile ou sable) montrant un ajustement légèrement meilleur du bassin avec ALIZE. Dans le cas d'une interface sans couche d'accrochage, l'indice correspondant au calcul CESAR est un peu meilleur, traduisant un meilleur ajustement. Les observations réalisées sur les bassins complets confirment celles faites sur les déflexions maximales. Les différences entre les 2

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

simulations restent faibles et les indices calculés confirment la bonne validité des différentes simulations numériques.

Tableau IV-22 : valeurs de l'indice $I_{SimMmoy}$, caractérisant l'écart entre les bassins moyens mesurés et les bassins simulés avec ALIZE et CESAR.

| | $I_{SimAmoy}$ (%) ALIZE | $I_{SimCmoy}$ (%) CESAR |
|--|----------------------------|----------------------------|
| Bassin sans défaut | 0.04 | 0.09 |
| Bassin au centre de la zone avec sable | 0.4 | 0.7 |
| Bassin au centre de la zone avec géotextile | 0.4 | 0.9 |
| Bassin au centre de la zone sans couche d'accrochage | 0.6 | 0.3 |

La Figure IV-26 présente l'évolution des déflexions maximales (D_0) le long de la section de chaussée. Elle compare les déflexions maximales mesurées par le FWD à celles déterminées numériquement avec ALIZE et CESAR. On peut voir que :

- Les simulations avec ALIZE permettent de calculer uniquement les déflexions dans le cas d'une chaussée saine, et dans le cas d'un défaut s'étendant sur l'ensemble de la structure. Pour cette raison, les déflexions obtenues avec ALIZE passent sans intermédiaire d'une valeur basse (chaussée saine) à une valeur haute (chaussée avec défaut d'extension infinie), et ne permettent pas de simuler la zone de transition où le FWD se rapproche du défaut. Par contre, les calculs ALIZE simulent bien les niveaux de déflexion maximale mesurés sous le centre de chaque défaut. Pour l'interface sans couche d'accrochage, on peut noter que les déflexions mesurées présentent une plus forte variabilité, et sont donc moins bien modélisées.
- Les simulations avec CESAR, elles, permettent de reproduire correctement les variations de la déflexion observées dans les zones de transition correspondant au passage d'une zone sans défaut à une zone avec défaut. En revanche, les simulations CESAR conduisent à des déflexions légèrement inférieures aux déflexions mesurées sous le centre de chaque défaut. Ces observations rejoignent celles faites lors de l'analyse des bassins complets.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

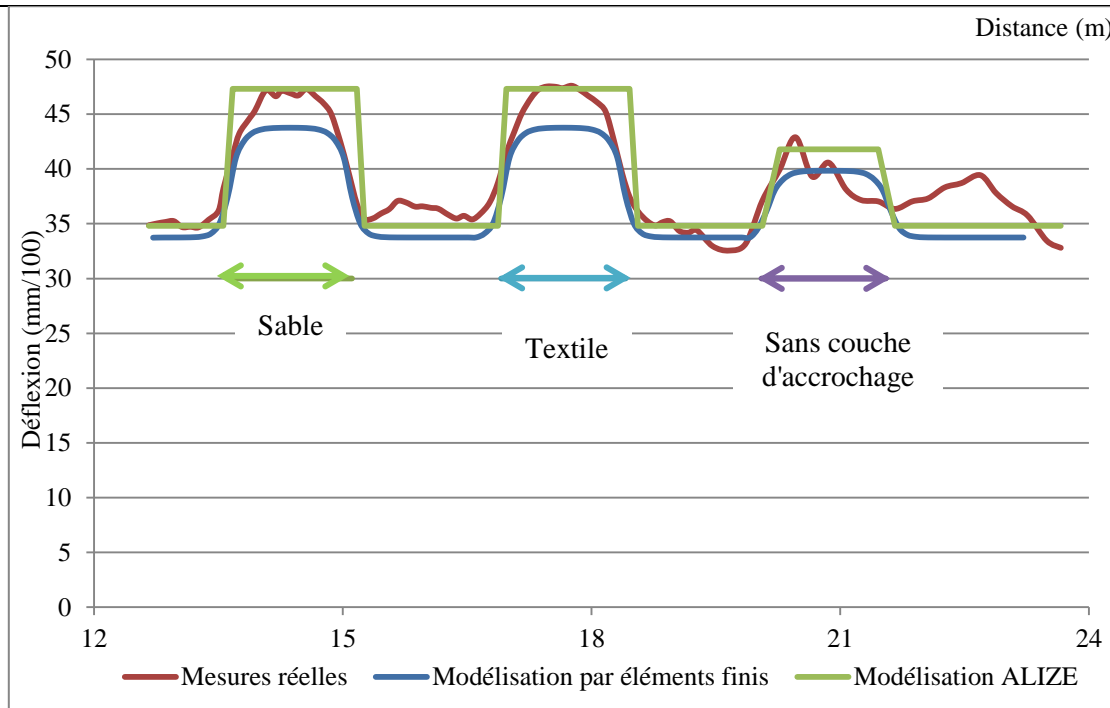


Figure IV-26 : Comparaison des déflexions maximales (D_0) mesurées par le géophone du FWD et calculées avec ALIZE et CESAR, le long de la section de chaussée étudiée.

IV.7.5 Calcul des indicateurs pour la détection des défauts dans la structure de chaussée

Après avoir étudié les mesures et validé les modèles de la structure, cette partie s'intéresse à la mise en place d'indicateurs optimisés permettant de détecter les défauts d'interface présents sur le site test. Deux types d'indicateurs ont été successivement appliqués : dans un premier temps, des indicateurs relatifs aux modules des matériaux ont été utilisés, afin d'identifier la partie de la structure endommagée. Ensuite, des indicateurs spécifiques à la zone endommagée ont été mis en place. Dans chaque cas, ces indicateurs ont été calculés à partir des mesures réelles et à partir des mesures simulées avec CESAR, qui présentent l'avantage de conduire à des variations de déflexion très régulières au niveau des défauts, et de s'affranchir des fluctuations locales des mesures.

IV.7.5.1 Adaptation des bassins de déflexion mesurés par le FWD

Le bassin de déflexion mesuré par un FWD est décrit par seulement 9 points, correspondant aux mesures réalisées par les 9 géophones, répartis sur une distance de 1.8 m. Ce nombre de points s'avère trop faible pour calculer des indicateurs cohérents. Le poids attribué à chaque point du bassin de déflexion par la fonction de pondération est trop important, et une très légère différence de déflexion au niveau d'un géophone peut conduire à des variations très importantes des indicateurs. Pour chacun des bassins de déflexion mesurés par le FWD, l'échantillonnage spatial a été augmenté par interpolation polynomiale, de façon à décrire le bassin par 37 points, espacés de 0.05 m. La Figure IV-27 présente un exemple de comparaison entre le bassin d'origine mesuré et le bassin interpolé, qui montre que les deux

bassins se superposent très bien. Cette interpolation a donc été appliquée à l'ensemble des 89 bassins mesurés.

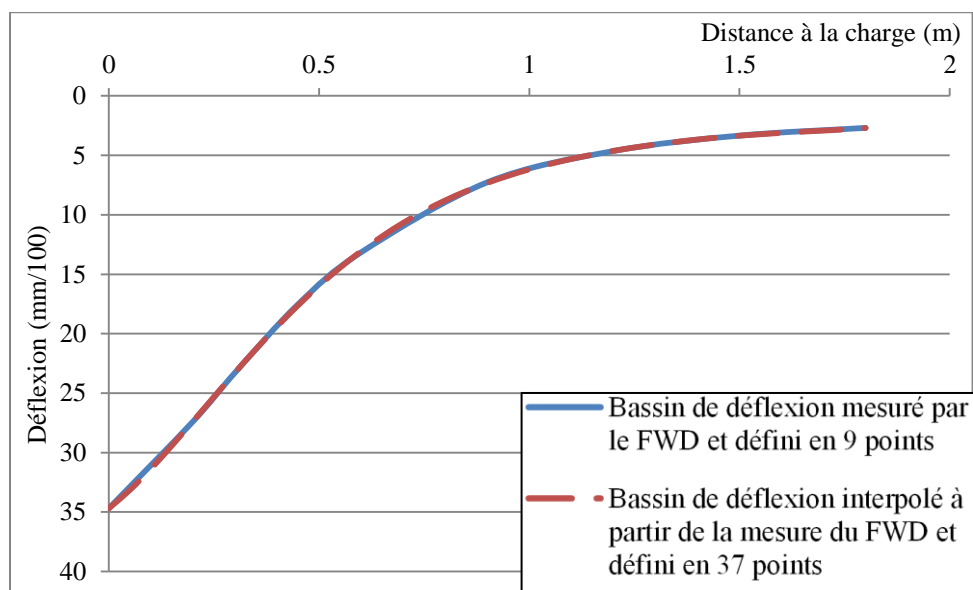


Figure IV-27 : Comparaison entre le bassin mesuré et le bassin interpolé défini par 37 points.

IV.7.5.2 Détection de zones endommagées dans les couches de chaussée

Les variations de déflexion maximale observées sur la section de chaussée traduisent des variations des caractéristiques de cette section (Figure IV-26), sans permettre d'en définir l'origine. Pour interpréter ces variations, on a construit dans un premier temps un indicateur relatif aux modules des matériaux afin d'identifier la couche endommagée. L'emploi des indicateurs permet d'identifier la partie de la structure qui est endommagée. On peut ensuite s'intéresser plus en détail à la nature du défaut observé.

La structure de référence est celle correspondant à la chaussée saine, modélisée avec CESAR. Comme dans le §IV.5, une étude préliminaire a été réalisée pour évaluer l'effet des variations de modules des couches sur le bassin de déflexion. Le Tableau IV-23 présente les valeurs de l'indice I_{SimC_c} qui caractérise l'écart entre le bassin de déflexion simulé avec CESAR pour la structure de référence, et le bassin obtenu en faisant varier le module d'une couche de cette structure d'un facteur 2. Pour les couches de BBSG et GB, l'indice I_{SimC_c} est très faible, inférieur à 0.7 %. Cela signifie que le bassin de déflexion est très peu sensible au module de chacune de ces couches et donc que le calcul d'un indicateur relatif au module de l'une de ces couches n'est pas approprié. En revanche, en réunissant ces deux couches, il est possible d'obtenir des variations plus importantes de l'indice, supérieures à 1.9 %. Le calcul d'un indicateur unique, en regroupant ces 2 couches, est donc plus pertinent.

Pour la GNT et le sol, les valeurs de I_{SimC_c} sont beaucoup plus élevées, indiquant des variations significatives du bassin simulé lorsque le module de la GNT ou du sol varie. Le calcul des indicateurs pour ces couches est donc, lui aussi, pertinent.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Tableau IV-23 : Valeurs des indices I_{SimC_c} caractérisant l'écart obtenu sur le bassin de déflexion lorsqu'on fait varier le module d'une des couches de la structure d'un facteur 2.

| Matériaux | Module de la couche (MPa) | I_{SimC_c} (%) |
|---|---------------------------|------------------|
| BBSG | 3050 | 0.6 |
| | 12200 | 0.5 |
| GB | 3200 | 0.6 |
| | 12800 | 0.5 |
| Matériaux bitumineux regroupés (BBSG + GB) | 3100 | 2.3 |
| | 12400 | 1.9 |
| GNT | 152.5 | 4.1 |
| | 610 | 2.9 |
| Sol | 85 | 29.2 |
| | 340 | 10.3 |

Finalement, la chaussée a donc été représentée par une structure composée de trois couches, comme indiqué dans le Tableau IV-24. Les trois indicateurs normalisés qui ont été étudiés sont I_{NMBk} , I_{NGNTk} et I_{NSOLk} , caractérisant respectivement la couche de matériaux bitumineux, la GNT et le sol.

Tableau IV-24 : structure de chaussée utilisée pour la construction des indicateurs relatifs aux modules des couches.

| Matériau | Epaisseur (m) | Module (MPa) | Indicateur normalisé I_{Njk} (k pour la mesure ou la simulation CESAR) |
|-----------------------------|---------------|--------------|---|
| Matériaux bitumineux | 0.14 | 6200 | I_{NMBk} |
| GNT | 0.3 | 305 | I_{NGNTk} |
| Sol | 2.6 | 170 | I_{NSOLk} |
| Substratum rigide | Semi-infini | 55000 | / |

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Les indicateurs optimisés I_{MB} , I_{GNT} et I_{NSOL} sont exprimés tels que décrits dans les équations (IV.13), (IV.14), et (IV.15).

$$\begin{aligned}
 I_{MB}(w_{mes}(x_c, \bullet)) &= \Lambda_{MB}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{MB}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \\
 &= \int_{a=0}^{b=1.8} p_{MB}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v \\
 &\quad - \int_{a=0}^{b=1.8} p_{MB}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v
 \end{aligned}
 \tag{IV.13}$$

$$\begin{aligned}
 I_{GNT}(w_{mes}(x_c, \bullet)) &= \Lambda_{GNT}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{GNT}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \\
 &= \int_{a=0}^{b=1.8} p_{GNT}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v \\
 &\quad - \int_{a=0}^{b=1.8} p_{GNT}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v
 \end{aligned}
 \tag{IV.14}$$

$$\begin{aligned}
 I_{Sol}(w_{mes}(x_c, \bullet)) &= \Lambda_{Sol}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{Sol}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \\
 &= \int_{a=0}^{b=1.8} p_{Sol}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v - \int_{a=0}^{b=1.8} p_{Sol}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v
 \end{aligned}
 \tag{IV.15}$$

Les indicateurs précédents ont été normalisés pour qu'une valeur de 1 corresponde à un doublement du module de la couche et qu'une valeur de -0.5 corresponde à une division par 2 de la valeur du module.

Une première analyse a été conduite pour observer la sensibilité des indicateurs à une variation de module des autres couches ou aux interfaces entre couches bitumineuses. La Figure IV-28 présente une étude de sensibilité des indicateurs à un changement de module des couches de chaussées.

D'après cette figure, on montre que :

- L'indicateur I_{NMB} est :
 - sensible à un changement de module de la couche de matériaux bitumineux;
 - très peu sensible à un changement de module de la GNT et du sol. En effet, pour les différents modules ou état de l'interface, l'indicateur est presque constant et proche de 0.
- L'indicateur I_{NGNT} est :
 - sensible à un changement de module de la GNT mais également de la couche de matériaux bitumineux et du sol;

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

- Afin de bien déterminer les valeurs de I_{NGNT} , il est donc nécessaire de caler auparavant les modules des couches de MB et de sol.
- L'indicateur I_{NSOL} est :
 - sensible à un changement de module du sol ;
 - très peu sensible à un changement de module de l'enrobé et de la GNT. En effet, pour les différents modules ou état de l'interface, l'indicateur est presque constant et proche de 0.

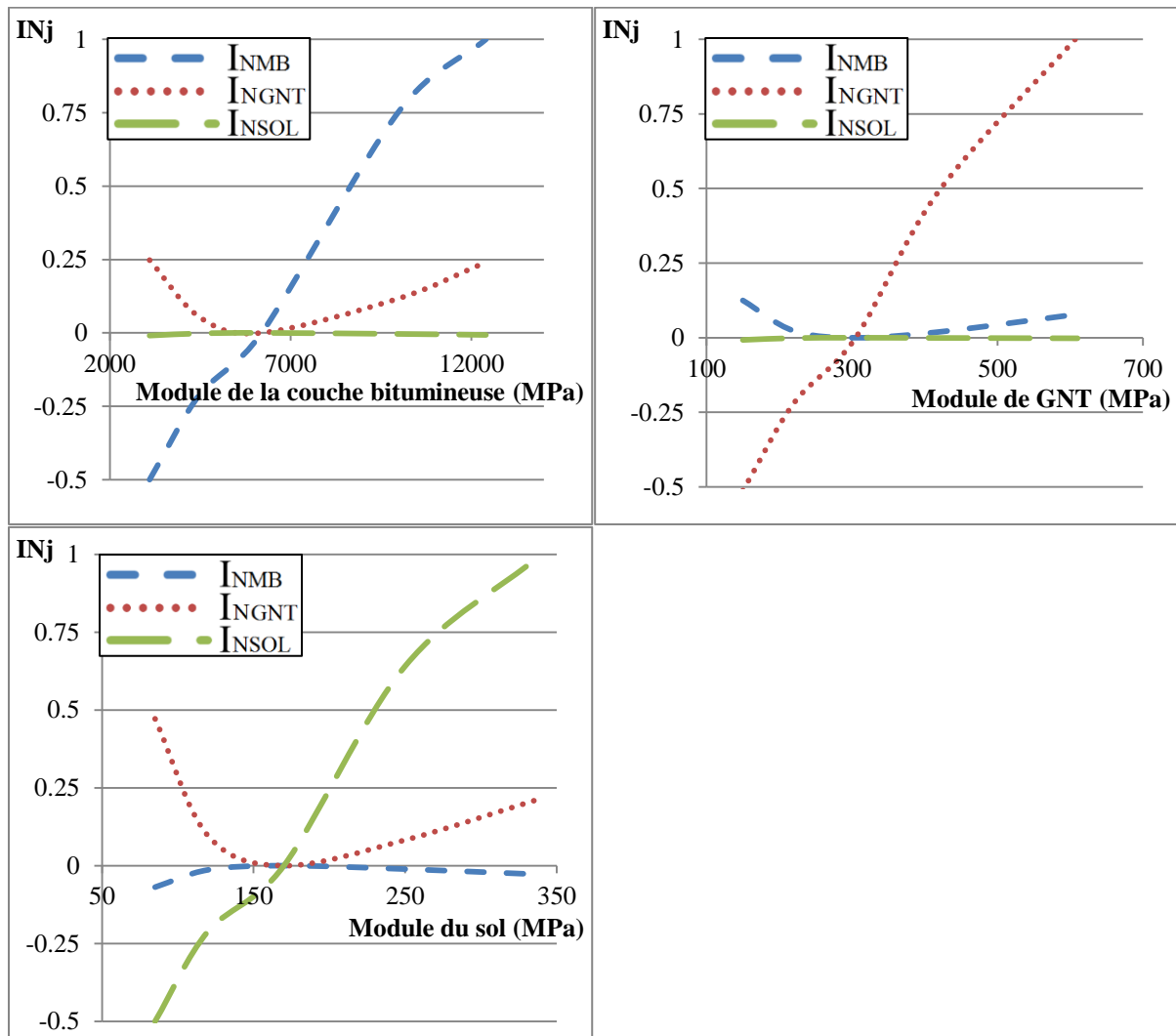


Figure IV-28 : Etude de sensibilité des indicateurs à une variation de module des couches – (1) Couche de matériau bitumineux – (2) GNT – (3) Sol.

La Figure IV-29 présente l'évolution des indicateurs I_{NMBk} , I_{NGNTk} et I_{NSOLk} le long de la section d'essai. Pour chaque couche, elle compare les indicateurs calculés à partir des bassins mesurés par le FWD (identifiés par l'indice MES) et à partir des bassins simulés avec CESAR (identifiés par l'indice SIM).

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Les indicateurs liés au sol, $I_{NSOLMES}$ et $I_{NSOLSIM}$, sont faibles et restent compris entre -0.1 et 0.3. Ces valeurs indiquent que le module du sol est bien estimé et que le sol ne présente pas d'endommagement.

Les variations de l'indicateur lié à la GNT sont un peu plus importantes. L'indicateur calculé à partir de la modélisation est positif au niveau des zones de défaut et nul en dehors, indiquant une augmentation du module de référence de la GNT au niveau des défauts, ce qui ne traduit pas un endommagement. L'indicateur calculé à partir des mesures réelles présente des variations positives et négatives comprise entre -0.5 et 0.5. Les variations négatives s'interprètent comme un endommagement de la couche mais on constate que les variations de cet indicateur sont irrégulières, et ne coïncident pas avec l'évolution de la déflexion maximale.

Pour les couches bitumineuses, l'évolution des indicateurs concorde avec l'évolution de la déflexion maximale le long de la section. Une augmentation de la déflexion conduit à une baisse rapide des indicateurs et ces variations sont localisées à l'emplacement des défauts. La diminution de l'indicateur traduit une baisse de module des couches bitumineuses (égal à 6100 MPa dans la zone sans défaut). Les indicateurs issus de la simulation présentent des variations plus régulières que ceux issus des mesures réelles. A l'emplacement du troisième défaut d'interface (pas de couche d'accrochage), les indicateurs sont négatifs, indiquant la présence d'un dommage, mais ils sont plus faibles, en valeur absolue, indiquant que dans cette zone, l'endommagement est moins important que dans les zones comportant le sable et le géotextile.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

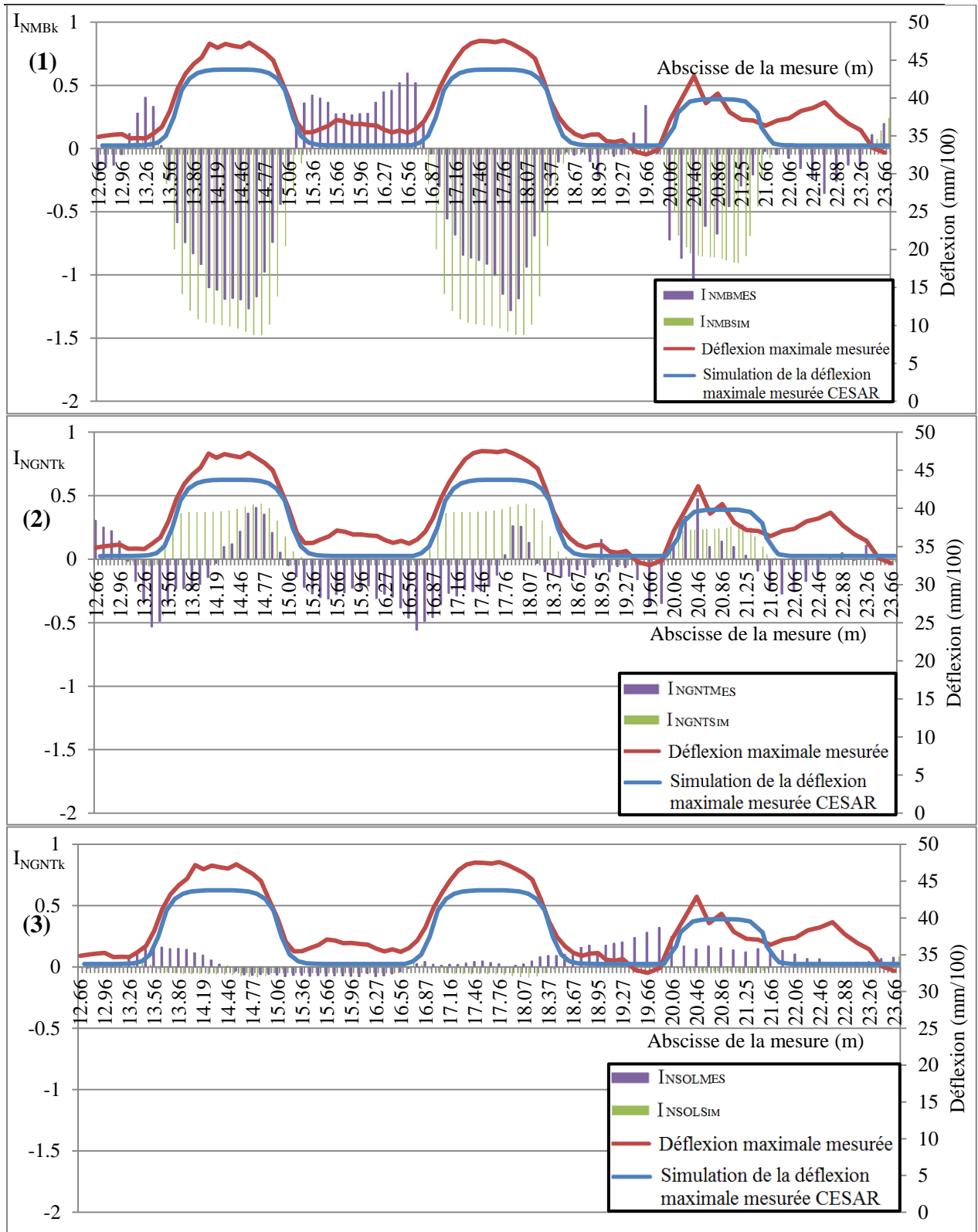


Figure IV-29 : Evolution des indicateurs relatifs aux modules, calculés à partir des mesures réelles et des bassins simulés avec CESAR, le long de la section d'essai- (1) - I_{NMBk} (2) - I_{NGNTk} - (3) I_{NSOLk} .

Que les calculs soient effectués à partir des mesures réelles ou des simulations, l'étude des trois indicateurs I_{NMBk} , I_{NGNTk} et I_{NSOLk} , relatifs aux modules des couches, montre que :

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

-
- L'indicateur relatif aux couches bitumineuses, I_{NMBk} présente d'importantes variations le long de la section, avec notamment trois zones où l'indicateur est fortement négatif. Ceci indique que ces zones sont endommagées, avec vraisemblablement deux niveaux d'endommagement différents (puisque l'on observe deux niveaux différents de l'indicateur).
 - L'indicateur relatif à la couche de GNT I_{NGNTk} présente de faibles variations, qui pourraient être interprétées comme une faible variation de module (positive ou négative) par rapport à la structure de référence. De plus, comme vu dans l'étude de sensibilité, cet indicateur est affecté par une variation de module de la couche de matériaux bitumineux et du sol.
 - L'indicateur relatif au sol, I_{NSOLk} , présente des valeurs faibles sur toute la section ; Il indique un sol homogène, et n'est pas affecté par la présence des défauts d'interface.

La comparaison entre les indicateurs calculés à partir des mesures réelles et des simulations ne montre pas de différence fondamentale. On notera néanmoins que dans certaines zones, l'indicateur basé sur les mesures réelles varie, logiquement, de façon moins régulière que celui basé sur la modélisation (en particulier pour la couche de GNT). Ceci s'explique par la variabilité des mesures réelles (due à la fois à l'incertitude de mesure du FWD et aux variations des caractéristiques de la section d'essai), qui n'affecte pas la modélisation.

IV.7.5.3 Détection des défauts interfaces

Dans l'analyse précédente, l'évolution de l'indicateur I_{NMBk} sur la section test a montré de fortes variations pour certaines zones de mesure. Ces changements peuvent être interprétés par une modification de module des couches, mais aussi par la présence d'un défaut d'interface.

Sur une chaussée réelle, des informations complémentaires (issues de relevés de dégradations, de carottages, ou d'autres essais d'auscultation) peuvent aider à cibler le type de défaut effectivement rencontré, et à choisir l'indicateur le plus pertinent pour ce type de défaut (indicateur de variation de module, ou de décollement, etc.). Sur le site du manège, on connaît l'origine des défauts, puisqu'il s'agit de décollements d'interface créés volontairement. Par conséquent, des indicateurs relatifs à la présence de ce type de défauts ont été appliqués aux résultats des essais FWD réalisés sur le manège.

L'itinéraire étudié comporte trois types de défauts. Les défauts sable et textile conduisent à l'obtention de bassins comparables et ont des caractéristiques similaires. Le dernier défaut correspond à la zone « sans couche d'accrochage ».

Dans cette dernière partie, nous considérons deux indicateurs différents :

- Le premier construit sur l'hypothèse d'une interface glissante (sans couche d'accrochage) I_{INT} doit permettre de détecter l'ensemble des défauts. Par contre, il pourrait s'avérer insuffisant pour caractériser les défauts les plus graves.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

- Le second basé sur l'hypothèse des défauts graves (sable et textile, correspondant à une couche de 1 cm d'épaisseur, avec un très faible module) I_{ST} doit permettre de caractériser la nature de ces défauts, mais pourrait être insuffisamment sensible à la présence d'un défaut d'interface simple, et ne pas le détecter correctement.

Nous pourrions ainsi comparer l'utilisation de ces deux indicateurs.

Comme précédemment, pour apprécier la pertinence de ces indicateurs, on a calculé des indices I_{SimCc} , caractérisant l'écart théorique (issu de calculs CESAR) entre le bassin de déflexion de la structure de référence sans défaut, et des structures dont l'interface présente chaque type de défauts (couche de sable ou de géotextile, décollement complet).

Le Tableau IV-25 présente les valeurs de I_{SimCc} obtenues dans les différents cas. Les indices obtenus sont supérieurs ou égaux à 1.8 %. Ces valeurs sont suffisamment élevées pour permettre de construire des indicateurs pertinents de l'état des interfaces, qui ne seront pas trop affectés par la dispersion des mesures du FWD.

Tableau IV-25 : Valeurs des indices I_{SimCc} caractérisant l'écart obtenu entre le bassin de déflexion de la structure sans défaut, et avec défaut d'interface.

| Défaut d'interface | Module de la couche (MPa) | I_{SimCc} (%) |
|--------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| Interface glissante simple | E =41 MPa | 1.8 |
| Couche de 1cm de sable ou géotextile | E =94 MPa | 5.3 |

Le Tableau IV-26 présente les modules des couches de chaussée définis pour la construction de ces indicateurs de détection de défauts d'interfaces. La construction des fonctions de pondération nécessite la prise en compte des dérivées partielles $\frac{\partial w}{\partial E_k}$ au voisinage du module du sol et pour les défauts d'interface, les dérivées partielles sont construites pour des modules représentant un état collé ou glissant de l'interface. L'équation (IV.16) est relative au défaut de chaussée sable/textile et l'équation (IV.17) fait référence au défaut « sans couche d'accrochage ».

$$\Lambda_{int\ sable/textile}(w_{mes}(x_c, \bullet)) = \int_{a=0}^{b=1.8} p_{int\ j}(x'_v) w_{mes}(x_c, x'_v) dx'_v \quad (IV.16)$$

$$\Lambda_{int\ interface}(w_{mes}(x_c, \bullet)) = \int_{a=0}^{b=1.8} p_{int\ interface}(x'_v) w_{mes}(x_c, x'_v) dx'_v \quad (IV.17)$$

Par construction, seuls les modules des deux couches avec défauts et du sol varient, les autres restants constants.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

Tableau IV-26 : Structure de la chaussée utilisée pour la construction des indicateurs d'état des interfaces.

(1)

| Matériau | Epaisseur (m) | Module (MPa) |
|-------------------------|---------------|--------------|
| BBSG | 0.05 | 6100 |
| Sable ou textile | 0.009 | 94 |
| Interface | 0.002 | 6400 |
| GB | 0.079 | 6400 |
| GNT | 0.3 | 305 |
| Sol | 2.6 | 170 |
| Substratum rigide | Semi-infini | 55000 |

(2)

| Matériau | Epaisseur (m) | Module (MPa) |
|-------------------|---------------|--------------|
| BBSG | 0.059 | 6100 |
| Interface | 0.002 | 41 |
| GB | 0.079 | 6400 |
| GNT | 0.3 | 305 |
| Sol | 2.6 | 170 |
| Substratum rigide | Semi-infini | 55000 |

Pour ces indicateurs d'état des interfaces, une normalisation spécifique a été appliquée, correspondant :

- A une valeur d'indicateur égale à 0 en l'absence de défaut (interface collée) ;
- A une valeur d'indicateur égale à 1 en présence du défaut d'interface simulé par une fine couche de matériau de faible module (indicateur $I_{NS/Tk}$); ou une interface glissante simple (indicateur I_{NINTk}).

L'indice « k » peut prendre deux valeurs : « Mes » dans le cas de mesures FWD et « Sim » dans le cas de simulations.

La Figure IV-30 présente les variations des indicateurs $I_{NS/Tk}$ (défaut d'interface grave) déterminés pour les mesures réelles ou pour les bassins simulés, le long de la section. Les deux indicateurs sont cohérents entre eux. Leurs variations suivent celles de la déflexion maximale. La présence des défauts entraîne une augmentation importante de l'indicateur $I_{NS/Tk}$. Cet indicateur permet donc de détecter et de localiser efficacement les défauts d'interface. Sa valeur est de 1 au niveau des défauts sable et textile et est de 0.6 pour le défaut « sans couche d'accrochage ». La valeur de 1 correspond bien au niveau d'endommagement le plus élevé de l'interface. Un niveau d'endommagement plus faible, comme l'absence de couche d'accrochage, est également bien détecté. Entre les défauts, la valeur de l'indicateur issu de la simulation retourne quasiment à 0 indiquant un état sans défaut. L'indicateur basé sur les mesures est également proche de 0, mais présente quelques variations, corrélées avec les variations de la déflexion maximale D_0 , et certainement liées à la variabilité des mesures du FWD et des caractéristiques du site.

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

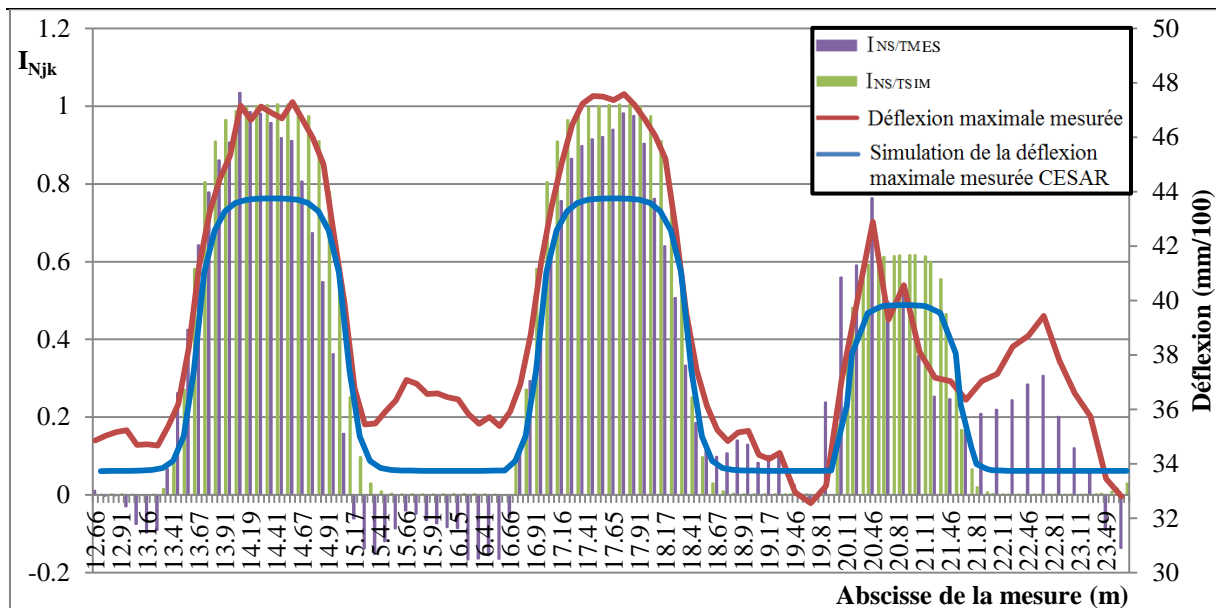


Figure IV-30 : Evolution de l'indicateur $I_{NS/Tk}$ caractérisant l'état de l'interface, déterminé à partir des mesures réelles ou des bassins simulés, le long de la section d'essai.

Le calcul du second indicateur d'interface, I_{NINTk} basé sur l'état glissant simple conduit à l'obtention d'un graphique similaire à la Figure IV-30. La seule différence notable est le niveau plus élevé de l'indicateur au niveau des zones décollées. Sa valeur est aux alentours de 1.5 pour les deux premiers défauts, et de 1 pour le dernier défaut (absence de couche d'accrochage) et ce pour la mesure et la simulation.

Pour une utilisation opérationnelle sur itinéraire, on privilégiera l'indicateur I_{NINT} relatif à une interface glissante simple pour la détection de défauts. Cet indicateur est construit pour détecter des défauts de décollement d'interface contrairement à $I_{ST/J}$ élaboré pour déterminer des défauts de 1 cm d'épaisseur.

IV.7.6 Bilan de l'évaluation des indicateurs pour la détection de défauts

Cette deuxième partie du chapitre IV a été consacrée à la validation des indicateurs conçus pour détecter des défauts structurels, de type baisse de module d'un matériau, ou décollement d'interface. Pour cela, des mesures FWD réalisées sur une chaussée expérimentale, construite sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR, comportant des défauts artificiels d'interface ont été utilisées. Des mesures FWD ont été choisies, car on ne disposait pas d'étude similaire pour le curviamètre. Des modèles de référence de cette structure de chaussée ont été définis, pour permettre de simuler la réponse mécanique de cette chaussée avec le logiciel ALIZE, et par la méthode des éléments finis avec CESAR-LCPC.

Deux types d'indicateurs ont successivement été évalués sur ces données de mesure :

- Des indicateurs relatifs aux variations des modules des couches de chaussées. Ces indicateurs ont été calculés en supposant les 3 couches de chaussées collées entre elles. Ces indicateurs ont clairement montré la présence de zones endommagées dans les

couches bitumineuses, situées au niveau des défauts artificiels implantés dans la chaussée.

- Un second type d'indicateur, destiné à caractériser l'état des interfaces, a ensuite été construit et testé. Cet indicateur a confirmé la présence de défauts d'interface entre la couche d'assise en grave bitume et la couche de roulement en enrobé bitumineux. Cet indicateur a également permis de quantifier le niveau d'endommagement de l'interface.

IV.8 Conclusion

Ce chapitre était consacré à la validation des travaux théoriques des chapitres précédents, sur la correction des mesures du curviamètre et du déflectographe, et sur la construction d'indicateurs conçus pour faciliter la détection de dommages structurels, à partir des mesures de déflexion.

Pour ces validations, on a exploité des mesures réalisées avec le curviamètre sur deux sites et trois sections de chaussées, représentatives de 3 niveaux de déflexions différents. Le premier site, une planche instrumentée du STAC, est une chaussée bitumineuse très épaisse représentative des chaussées aéronautiques, qui présente un faible niveau de déflexion. Le second site localisé dans les environs de GAP, comprenait une structure de chaussée bitumineuse et une structure souple, à assise granulaire. Pour chaque section, des données de référence (modèle de structure de chaussée, bassins de déflexion de référence sous un jumelage standard) ont été définies.

Pour valider la procédure de correction, les bassins de déflexion avant et après correction ont été comparés au bassin de référence. Pour tous les cas étudiés, on a montré que le bassin corrigé est beaucoup plus proche du bassin de référence sous jumelage standard que le bassin mesuré directement. En particulier, la déflexion maximale sous jumelage standard est très bien estimée après correction, avec un écart maximal de 7 % sur les différents cas étudiés.

Un autre intérêt de la procédure de correction, est de rendre possible le calcul inverse des modules des couches, à partir du bassin de déflexion corrigé. En effet, on a montré qu'en l'absence de correction, les mesures du curviamètre ne peuvent pas être utilisées pour du calcul inverse et que les modules calculés sont souvent irréalistes. Après correction, le calcul inverse donne des résultats beaucoup plus satisfaisants, avec des écarts par rapport aux modules de référence inférieurs à 20 % dans la plupart des cas.

L'évaluation des indicateurs destinés à la détection de défauts sur les mesures des différents sites a montré que pour construire un indicateur pertinent, il faut vérifier que le défaut que l'on veut détecter (variation de module, ou décollement par exemple) a une influence suffisante sur le bassin de déflexion. Si cette influence est très faible, inférieure à la dispersion des mesures, alors l'indicateur sera trop sensible à la dispersion des mesures, et ne pourra pas donner des résultats cohérents. Pour évaluer l'influence d'un défaut de la chaussée sur le bassin de déflexion, un indice de sensibilité I_{simMc} a été proposé. Si la valeur de cet indice est

Chapitre IV : Validation des procédures de correction et de calcul des indicateurs sur des mesures sur sites

faible (inférieure à 2 % environ dans les exemples étudiés), le défaut correspondant ne pourra pas être détecté correctement. Dans ce cas, une solution peut consister à regrouper plusieurs couches de chaussées, pour augmenter leur effet sur le bassin de déflexion, et aboutir à des indicateurs plus fiables.

En ce qui concerne les valeurs des indicateurs de défaut, on a proposé une normalisation de ces indicateurs, par exemple une variation entre 0 et 1 pour l'indicateur d'état de décollement, entre -0,5 et 1 pour l'indicateur portant sur les modules (correspondant à un module divisé par 2 ou multiplié par 2). Cette normalisation facilite les comparaisons entre différents cas d'étude.

L'étude des différents cas réels a également montré que pour l'indicateur portant sur les modules, la dispersion des bassins individuels mesurés par le curviamètre peut conduire, en un même point de mesure, à des indicateurs compris entre -0.25 et 0.5 environ. Dans cet intervalle, on ne pourra pas conclure qu'il existe un écart significatif avec l'état de référence. Pour des valeurs inférieures à -0.25, on pourra conclure que la couche relative à cet indicateur est endommagée (baisse de module), tandis que pour des valeurs supérieures à 0.5, la couche sera considérée plus rigide que la référence. Pour réduire l'intervalle pour lequel aucune conclusion n'est possible $[-0.25, 0.5]$, il faut obtenir des mesures plus répétables, soit en moyennant les mesures, soit par l'utilisation d'un appareil plus répétable comme le FWD.

Pour compléter la validation des indicateurs, une section de chaussée expérimentale, construite sur le manège de fatigue, comportant des défauts d'interface, créés artificiellement, a été analysée. Ce site a fait l'objet d'une auscultation détaillée avec le FWD. Après avoir établi une structure de référence, deux séries d'indicateurs ont été construites. :

- Des indicateurs portant sur les valeurs de module des couches de chaussées, en supposant les couches collées entre elles. Ces indicateurs ont mis en évidence des défauts au niveau des couches bitumineuses de la structure.
- Des indicateurs plus spécifiques, permettant de caractériser l'état des interfaces. Deux indicateurs différents basés sur des états d'interface différents ont été construits. Le premier a été élaboré sur l'hypothèse d'un décollement simple. Il est très sensible à la présence de tout type de défauts d'interface et permet leur détection. En revanche, il sature rapidement (prend rapidement une valeur égale à 1), et ne permet pas de distinguer un décollement d'un défaut plus grave (matériau désagrégé sur une certaine épaisseur). Le second indicateur, construit avec l'hypothèse d'un défaut plus grave (matériau de très faible module sur 1 cm d'épaisseur) a permis de mieux distinguer la gravité des différents défauts d'interface.

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

| | | |
|----------|---|------------|
| V | Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire | 233 |
| V.1 | Introduction | 234 |
| V.2 | Description des sites et sélection des mesures | 234 |
| V.2.1 | Présentation des mesures de déflexion..... | 235 |
| V.3 | Détermination des structures de chaussée de référence | 236 |
| V.3.1 | Définition de la structure de référence pour la section 1..... | 238 |
| V.3.2 | Définition de la structure de référence pour la section 2..... | 239 |
| V.4 | Application de la procédure de correction des mesures du curviamètre..... | 241 |
| V.4.1 | Comparaison des niveaux de déflexion maximale..... | 241 |
| V.4.2 | Découpage en zones homogènes des itinéraires | 242 |
| V.4.3 | Bilan de la procédure de correction des déflexions..... | 243 |
| V.5 | Application des indicateurs optimisés pour la détection de défauts..... | 244 |
| V.5.1 | Mise en place des indicateurs | 244 |
| V.5.2 | Calcul des indicateurs pour les bassins de déflexion proches du bassin moyen | 250 |
| V.5.3 | Analyse des indicateurs pour différents niveaux de déflexion maximale, représentatifs de l'itinéraire..... | 254 |
| V.5.4 | Calcul des indicateurs sur l'ensemble de l'itinéraire..... | 257 |
| V.5.5 | Comparaison des indicateurs optimisés avec les indicateurs MLI et LLI..... | 260 |
| V.5.6 | Procédure de calcul inverse pour différents niveaux de <i>INSOL</i> | 261 |
| V.6 | Conclusion..... | 263 |

V.1 Introduction

Le chapitre V s'intéresse à l'application des travaux mis en place dans les précédents chapitres de la thèse sur des mesures réelles réalisées avec le curviamètre, sur deux itinéraires. L'objectif est d'évaluer l'application de la méthode de correction des déflexions, puis des indicateurs de défauts, à l'échelle d'un itinéraire. D'un point de vue pratique, il s'agira, dans un premier temps, de détecter les zones dégradées, puis d'identifier les types de défauts (matériau de faible module, interface décollée).

Après une analyse des mesures de déflexion sur les deux sections de l'étude, des structures de chaussées de référence sont définies pour ces deux sections, en accord avec les données de composition fournies par le gestionnaire. Les modules calculés dans ce chapitre sont ceux obtenus à la fréquence de chargement du curviamètre et à la température de mesure et il faudra s'assurer de leur cohérence avec ces hypothèses.

La seconde partie du chapitre porte sur la correction des bassins de déflexion mesurés. Une procédure automatisée a été développée pour appliquer la procédure de correction, utilisant le modèle de Jouve et Martinez à l'ensemble des bassins de déflexion mesurés. Les paramètres optimisés du modèle, d_f , λ_f et n_f sont déterminés en chaque point, puis réintroduits dans un cas de chargement de jumelage standard. La déflexion corrigée ainsi obtenue est comparée avec la déflexion maximale mesurée par le curviamètre. Ensuite, une analyse statistique est menée pour découper l'itinéraire en zones homogènes à partir des déflexions caractéristiques obtenues avec et sans correction.

La dernière partie du chapitre concerne le calcul d'indicateurs optimisés destinés à détecter d'abord une variation des modules des couches de chaussées, puis également l'état des interfaces. Comme défini dans le chapitre IV, l'indicateur I_{SimAc} est d'abord calculé pour vérifier la pertinence des indicateurs choisis.

Une première analyse des indicateurs optimisés a été réalisée sur les bassins proches des bassins moyens. La dispersion de ces indicateurs a été étudiée et comparée à celle déterminée dans le chapitre IV. Ensuite, les indicateurs optimisés ont été calculés sur l'ensemble de l'itinéraire et comparés aux indicateurs associés au FWD (MLI et LLI). Finalement, une procédure de calcul inverse est réalisée sur des bassins avec différents niveaux de déflexion maximale ou d'indicateurs optimisés.

V.2 Description des sites et sélection des mesures

Un gestionnaire routier nous a fourni des données de mesures de déflexion réalisées avec le curviamètre sur deux itinéraires routiers, d'environ 7 à 8 km de long. L'origine de ces données ne peut être précisée pour des raisons de confidentialité. Entre 1400 et 1600 mesures ont été réalisées sur chacune de ces sections, et ce dans les deux sens de circulation. Chaque bassin de déflexion est défini par 100 points de mesure. Ces deux sections ont des structures

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

relativement différentes, mais présentent des niveaux moyens de déflexion maximale et de rayon de courbure comparables.

V.2.1 Présentation des mesures de déflexion

Les mesures de déflexion ont été réalisées sur deux sections de chaussées de structure différente et dans les deux sens de circulation. La première section est une chaussée bitumineuse épaisse âgée de 24 ans. La seconde est une chaussée mixte âgée de 53 ans. Les structures théoriques fournies par le gestionnaire routier sont définies dans le Tableau V-1. Aucune indication n'a été donnée sur l'épaisseur et le module du sol support. L'état général des sections a été qualifié de bon par le gestionnaire.

Tableau V-1 : Structures de chaussées fournies par le gestionnaire pour les 2 itinéraires routiers

| Section 1 (24 ans) | | Section 2 (53 ans) | |
|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| Matériau | Epaisseur (m) | Matériau | Epaisseur (m) |
| BBDr | 0.04 | BBDr | 0.04 |
| GB | 0.22 | BBTM | 0.04 |
| EME | 0.11 | BBSG | 0.22 |
| Sol | Inconnue | GC | 0.20 |
| Substratum | Infinie | Sol | Inconnue |
| | | Substratum | Infinie |

Pour chaque mesure, en complément des 100 points décrivant le bassin de déflexion, les températures de l'air et de la surface de la chaussée, le rayon de courbure et la déflexion maximale sont enregistrés dans le fichier de mesure. L'ensemble des bassins mesurés a également été recentré pour faire coïncider les points de déflexion maximale.

Le Tableau V-2 présente quelques données issues de ces mesures. Les températures lors des relevés sont stables et comparables d'une section à l'autre. Les niveaux de mesures sont relativement similaires pour la déflexion maximale, avec une valeur moyenne de l'ordre de 10 mm/100, ce qui est faible. L'amplitude et les écarts-types de la déflexion maximale restent également constants le long des deux itinéraires. Les moyennes des rayons de courbure sont légèrement plus dispersées que celles de la déflexion maximale. Selon la structure, elles varient entre 2167 et 1561 m. Les écarts-types et les intervalles de variation sont cependant comparables.

Tableau V-2 : Comparaison de paramètres de la mesure de déflexion obtenus pour les deux sections expérimentales

| | Section 1 | | Section 2 | |
|----------------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| | Sens 1 | Sens 2 | Sens 1 | Sens 2 |
| Dmoy / σD_{max} (mm/100) | 9.27 / 3.42 | 10.14 / 3.32 | 9.04 / 4.41 | 9.28 / 3.74 |
| Dmin/Dmax (mm/100) | 1 / 29 | 2 / 25 | 1 / 36 | 2 / 25 |
| Rcmoy / σRc (m) | 2167 / 652 | 1793 / 468 | 1789 / 478 | 1561 / 523 |
| Rcmin / Rcmax (m) | 582 / 4735 | 787 / 4616 | 468 / 4637 | 491 / 5238 |
| Tsurf Min / max (°C) | 10 / 16 | 11 / 15 | 9 / 16 | 10 / 14 |
| Tair Min / Max (°C) | 16 / 19 | 16 / 18 | 15 / 19 | 16 / 18 |

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

La Figure V-1 présente le rayon de courbure en fonction de la déflexion maximale mesurée pour les quatre sessions de mesure. Les fuseaux sont relativement similaires, notamment pour une même série de mesures. Pour une même section, les mesures dans les deux sens de circulation sont comparables ; les différences entre les deux sections sont également assez faibles. Compte tenu des faibles niveaux de déflexion maximale ($d_{max} < 10 \text{ mm}/100$), l'étendue des valeurs de rayon de courbure est importante, allant de 500 m à 4800 m. Cependant, avec l'augmentation de la déflexion maximale, le niveau du rayon de courbure diminue et son intervalle de variation se réduit.

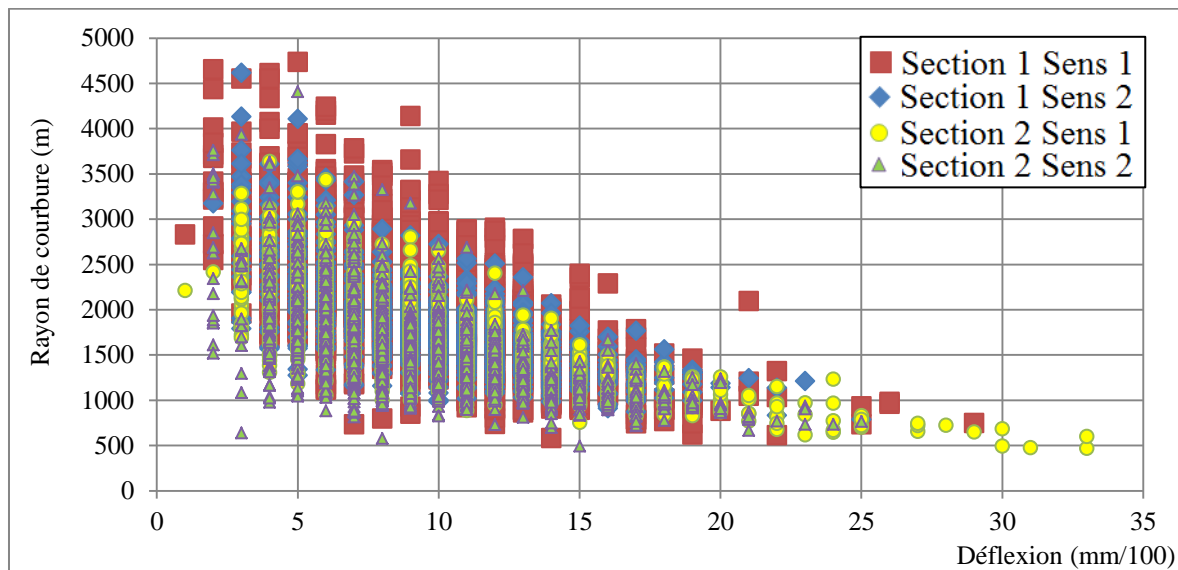


Figure V-1 : Représentation de la déflexion maximale en fonction du rayon de courbure pour les deux structures et les deux sens de circulation.

V.3 Détermination des structures de chaussée de référence

La détermination d'une structure de référence pour chaque itinéraire nécessite la prise en compte d'un échantillon de bassins de déflexion. Parmi les 6000 bassins mesurés, la démarche utilisée pour définir la structure de référence a consisté à choisir les bassins pour lesquels la déflexion maximale et le rayon de courbure sont proches des valeurs moyennes sur l'ensemble de l'itinéraire. Ce choix a été fait indépendamment de leur répartition spatiale. La sélection des bassins a été faite séparément pour chaque section et chaque sens de circulation. Les structures de référence ont été définies selon la méthode établie dans le chapitre IV. Il s'agit d'une méthode itérative, qui consiste à simuler les bassins de déflexion mesurés par le curviamètre avec le logiciel ALIZE, et à ajuster les modules des couches de chaussées pris en compte dans le calcul, de façon à minimiser l'écart entre le bassin simulé et les mesures. Le Tableau V-3 présente les intervalles de valeurs retenus pour la détermination des structures de référence et des bassins moyens.

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

Tableau V-3 : Intervalles de valeurs utilisés pour le choix des bassins de déflexion « moyens ».

| Dmax (mm/100) | | Rc (m) | |
|---------------|----|--------|------|
| 9 | 11 | 2000 | 2400 |

A partir de ces bassins provenant d'un même fuseau, un bassin moyen a été calculé, par section, et par sens de circulation. L'indice $I_{moybassin}$ caractérisant l'écart entre chaque bassin individuel et ce bassin moyen a ensuite été déterminé. Seuls les bassins pour lesquels cet indice est inférieur à 5 % ont été conservés et le bassin moyen a été recalculé jusqu'à ce que tous les bassins mesurés satisfassent le critère de variation $I_{moybassin}$ choisi.

Le Tableau V-4 donne le nombre de bassins conservés, respectant les contraintes imposées, pour la détermination du bassin moyen. Selon la série étudiée, le nombre de bassins varie entre 10 et 73.

Tableau V-4 : Nombre de bassins retenus pour le calcul du bassin moyen, suivant les critères de sélection et la série de mesure.

| | $9 \leq D_{max} (mm/100) \leq 11$ $2000 \leq Rc (m) \leq 2400$ $I_{moybassin} < 5\%$ |
|------------------|--|
| Section 1 sens 1 | 73 |
| Section 1 sens 2 | 17 |
| Section 2 sens 1 | 14 |
| Section 2 sens 2 | 10 |

Le Tableau V-5 présente les paramètres calculés à partir des bassins mesurés par le curviamètre représentatifs des bassins moyens, pour caractériser la dispersion des mesures. Pour tous les points de mesure, les coefficients de variation $\frac{\sigma}{Moyenne}$ de la déflexion maximale sont très faibles et inférieurs à 3 %. De même, la forme des bassins de déflexion varie très peu, avec des valeurs de l'indicateur $I_{moybassin}$ inférieures à 0.6 % pour toutes les séries de mesure. Par ailleurs, les bassins des quatre séries présentent des moyennes relativement proches variant seulement entre 9.8 mm/100 et 10 mm/100.

Tableau V-5: Analyse de la dispersion des mesures du curviamètre pour les bassins représentatifs des bassins moyens.

| | Points | $I_{moybassin}$ (%) | | Moyenne Dmax (mm/100) | Ecart-type σ (mm/100) | coefficient de variation ($\sigma/moyenne$) (%) |
|-----------|--------|---------------------|-----|-----------------------|------------------------------|---|
| | | min | max | | | |
| Section 1 | Sens 1 | 0.02 | 0.6 | 10 | 0.3 | 3 |
| | Sens 2 | 0.05 | 0.5 | 9.9 | 0.4 | 4 |
| Section 2 | Sens 1 | 0.02 | 0.3 | 10 | 0.3 | 3 |
| | Sens 2 | 0.04 | 0.4 | 9.8 | 0.2 | 2 |

La Figure V-2 présente les quatre bassins moyens déterminés à l'aide des bassins pris en compte. Pour les quatre séries étudiées, les bassins moyens sont proches les uns des autres. Pour les deux sens de circulation, les bassins moyens de la section 1 sont identiques et se superposent parfaitement. Bien que proches, les bassins moyens pour la section 2 sont

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

différents pour les deux sens de circulation. Le niveau de déflexion mesuré pour le sens 1 est légèrement plus important que pour le sens 2. Ainsi, une seule structure de référence sera déterminée pour la section 1 et une structure par sens de circulation pour la section 2.

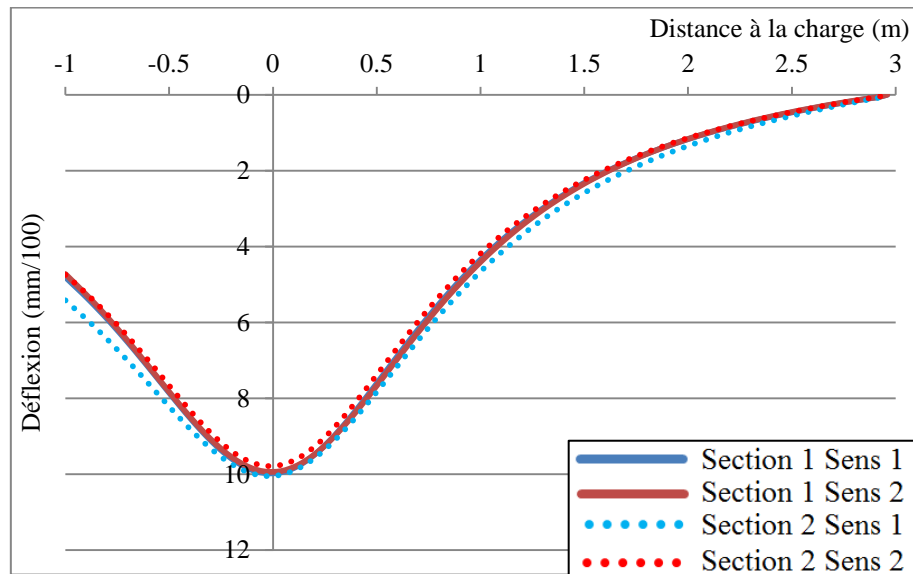


Figure V-2 : Bassins moyens déterminés pour chaque série de mesure.

V.3.1 Définition de la structure de référence pour la section 1

Les deux bassins moyens déterminés sur la section sont identiques et ont conduit à la détermination d'une seule structure de référence. L'objectif est alors de déterminer les modules de chaque couche de chaussée ainsi que l'épaisseur du sol. Les modules déduits doivent être cohérents avec les matériaux mis en place mais également avec les températures de mesures et la fréquence de chargement du curviamètre (3 Hz).

Le Tableau V-6 présente les modules déterminés pour cette structure de référence, par la procédure de calage itérative avec ALIZE. En sus de la définition des modules, l'épaisseur du sol a également été calée. Les valeurs déterminées sont cohérentes avec les matériaux mis en place, compte tenu des conditions de mesure.

Tableau V-6 : Structure de chaussée de référence de la section 1

| Section 1 (24 ans) | | |
|--------------------|---------------|--------------|
| Matériau | Épaisseur (m) | Module (MPa) |
| BBDr | 0.04 | 4000 |
| GB | 0.22 | 10000 |
| EME | 0.11 | 12000 |
| Sol | 1.5 | 200 |
| Substratum | Infinie | 55000 |

La Figure V-3 compare les deux bassins moyens mesurés pour les deux sens de circulation et le bassin de déflexion simulé avec ALIZE, pour la structure de référence. Ces trois bassins sont très proches. Ils atteignent tous les trois le même niveau de déflexion maximale.

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

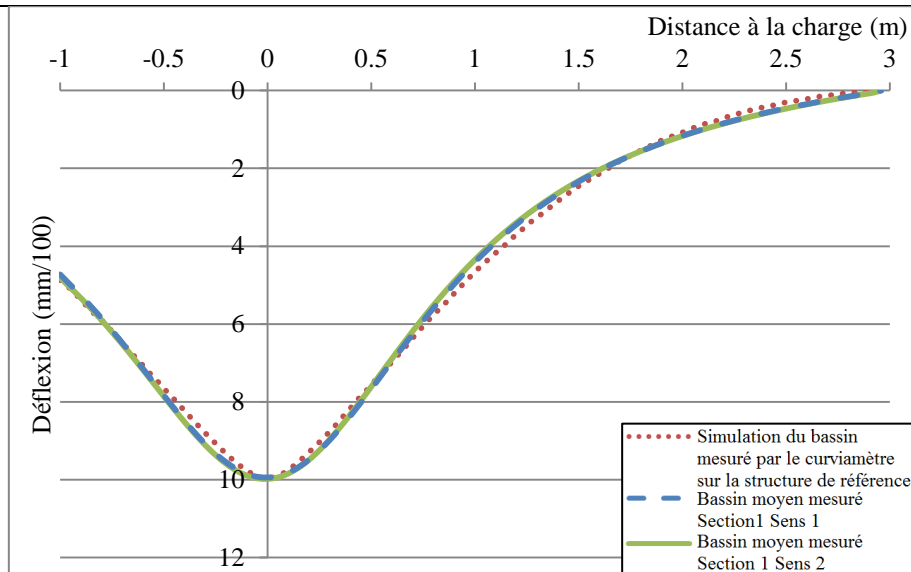


Figure V-3 : Comparaison entre les bassins moyens mesurés pour les deux sens de circulation et le bassin simulé avec ALIZE pour le curviamètre.

Une validation complémentaire de cette structure de référence a été réalisée en calculant les indices $I_{simA_{moy}}$ et $I_{simA_{bassin}}$ qui caractérisent respectivement l'écart entre le bassin simulé et le bassin moyen d'un part, et les différents bassins individuels d'autre part (voir §IV.3.1.3.2). Ainsi, le calcul de $I_{simA_{moy}}$ a donné une valeur inférieure ou égale à 0.1 % pour les deux sens de circulation et les valeurs de $I_{simA_{bassin}}$ ne dépassaient pas 0.8 % pour les 73 bassins du sens 1 et les 17 bassins du sens 2.

Les résultats de la Figure V-3 et les valeurs des indicateurs $I_{simA_{moy}}$ et $I_{simA_{bassin}}$ confirment que les modules et l'épaisseur de sol définis pour cette section sont bien ajustés et peuvent être utilisés pour définir la structure de référence.

V.3.2 Définition de la structure de référence pour la section 2

Les bassins moyens calculés pour la section 2 sont différents selon le sens de circulation. Ainsi, deux structures de référence ont été définies. Pour ce faire, seuls les modules des matériaux bitumineux ont été ajustés, le module du sol ayant été considéré identique pour les deux sens.

Le Tableau V-7 présente les modules des couches de chaussée déterminés. Le calage des modules des couches a nécessité la prise en compte d'une interface « partiellement collée », (niveau intermédiaire entre semi-collé et glissant dans ALIZE), entre les couche de BBSG et de GC. La présence de ce type de défaut est cohérente sur une chaussée mixte de 53 ans. Cet état partiellement glissant a été modélisé par une couche mince de 2 mm d'épaisseur (représentative de l'épaisseur d'une couche d'accrochage) dont le module a été calé sur les bassins choisis, ce qui a conduit à une valeur de module de 14 MPa. Le calage des modules des trois premières couches bitumineuses avec ALIZE a ensuite conduit à des valeurs

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

différentes en fonction du sens de circulation. Comme pour la section 1, les modules déterminés sont cohérents avec les matériaux des couches, les températures et la fréquence de chargement du curviamètre.

Tableau V-7 : Structures de chaussées de référence obtenues pour la section 2, pour les deux sens de circulation.

| Matériau | Epaisseur (m) | Section 2 (53 ans) | |
|--------------------------------|---------------|--------------------|---------------|
| | | Sens 1 | Sens 2 |
| BBDr | 0.04 | Modules (MPa) | Modules (MPa) |
| BBDr | 0.04 | 2300 | 3000 |
| BBTM | 0.04 | 2300 | 3000 |
| BBSG | 0.219 | 10500 | 8000 |
| Interface partiellement collée | <i>0.002</i> | <i>14</i> | <i>14</i> |
| GC | 0.199 | 20000 | 20000 |
| Sol | 1.5 | 200 | 200 |
| Substratum | Infinie | 55000 | 55000 |

La Figure V-4 compare les bassins moyens dans les deux sens de circulation comparés à la simulation du bassin mesuré par le curviamètre sur la structure de référence. Pour un sens de circulation donné, le bassin moyen et celui simulé sur la structure de référence sont proches. Le niveau de déflexion maximale du sens 1 est légèrement supérieur à celui du sens 2.

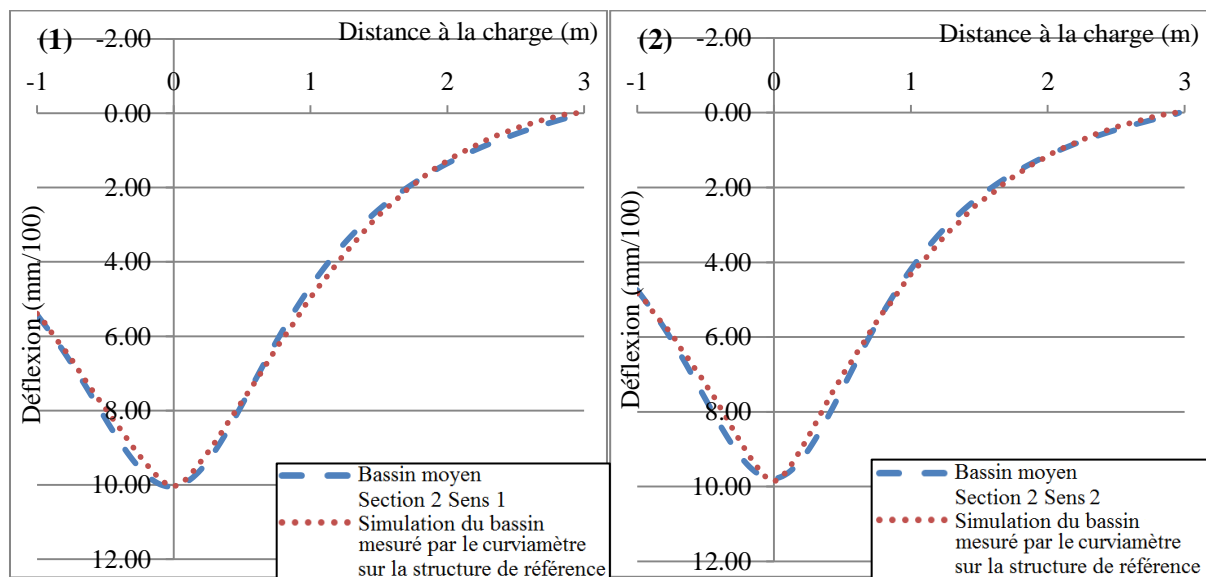


Figure V-4 : Comparaison entre le bassin moyen et la simulation du bassin mesuré par le curviamètre sur la structure de référence – Section 2 - Sens 1 (1) - Sens 2 (2).

Par la suite, les indices $I_{simA_{bassin}}$ et $I_{simA_{moy}}$, caractérisant les écarts entre les bassins mesurés et simulés ont été calculés, comme pour la section 1, et ont permis de valider ce choix de structure de référence. En effet, $I_{simA_{moy}}$ est inférieur à 0.2 % pour les deux cas et $I_{simA_{bassin}}$ reste toujours inférieur à 0,6 % pour les 14 bassins mesurés pour le sens 1 et les 10 bassins du sens 2.

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

Les structures de référence ainsi définies seront utilisées pour la suite des travaux de ce chapitre.

V.4 Application de la procédure de correction des mesures du curviamètre

La première phase d'analyse des données a consisté à appliquer la procédure de correction des bassins de déflexion, élaborée dans le chapitre II, aux deux itinéraires étudiés. Etant donné le grand nombre de mesures à traiter, les paramètres optimisés d_f , λ_f et n_f décrivant chaque bassin de déflexion ont été déterminés en utilisant l'approche basée sur l'abaque (décrite au § II.3.2 et dans les Annexes B et C), pour les 6000 bassins mesurés. Cette étape a été réalisée par l'intermédiaire d'un programme développé en C++ qui détermine les paramètres optimisés d_f , λ_f et n_f puis recalcule avec ces paramètres le bassin corrigé obtenu sous charge de référence. Pour chaque point de mesure, la déflexion maximale corrigée ainsi obtenue a été comparée à la déflexion mesurée.

V.4.1 Comparaison des niveaux de déflexion maximale

La Figure V-5 compare, pour les deux sections et les deux sens de circulation, les valeurs de déflexion maximale issues de la procédure de correction sous jumelage standard et les valeurs mesurées par le curviamètre. Pour les 4 séries de mesures, les résultats obtenus sont très similaires :

- Pour les faibles niveaux de déflexion ($d_{max} < 10 \text{ mm}/100$), la procédure de correction ne modifie pas sensiblement la déflexion maximale. Toutefois, même si le niveau de déflexion est identique, il faut rappeler que la procédure de correction permet d'obtenir une forme de bassin de déflexion plus réaliste (forme symétrique, et déflexion non nulle à 3 m de la charge).
- Au-delà de ce seuil, la procédure de correction tend à augmenter la déflexion maximale. Cette constatation est en concordance avec les conclusions du chapitre II, montrant que la déflexion maximale mesurée était sous-estimée par rapport à la valeur de référence.
- Globalement, les écarts obtenus ici entre déflexions mesurées et corrigées sont assez faibles (généralement inférieurs à 5 mm/100) ce qui s'explique probablement par la forte rigidité du sol support sur les 2 itinéraires (module de sol élevé, et substratum rigide situé à faible profondeur). Cette tendance avait également été observée dans les études paramétriques réalisées dans le chapitre II.

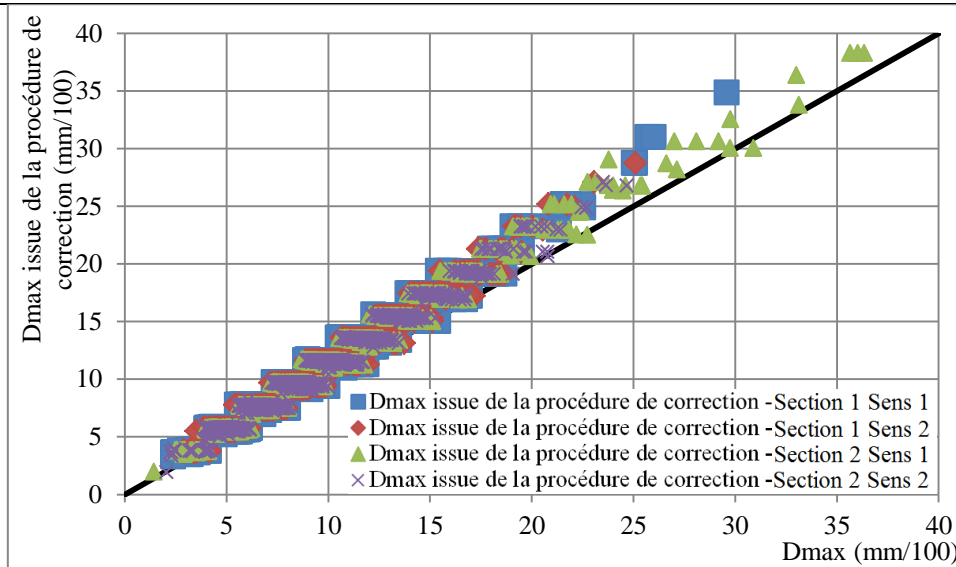


Figure V-5 : Comparaison entre les valeurs de déflexion maximale issues de la procédure de correction et les valeurs mesurées par le curviamètre, pour les 4 séries de mesures.

V.4.2 Découpage en zones homogènes des itinéraires

Dans un second temps, la méthode de du-Mesnil-Peybernard (Du Mesnil-Adelée & Peybernard, 1984), programmée dans le logiciel DECZONH (Lièvre, 2015), a été utilisée pour réaliser un découpage des deux itinéraires en zones homogènes en termes de déflexion. Comme défini en partie bibliographique, pour ce découpage, l'étendue minimale des zones homogènes a été fixée à 400 m, et le risque d'affirmer à tort qu'une mesure fait partie d'une zone homogène a été pris égal à 5 %. Ces paramètres sont définis dans le chapitre bibliographique. Une fois le découpage effectué, on peut essayer de ré-agréger les zones voisines, pour ne garder que les fortes variations de déflexion. Pour cela, on compare les moyennes et les écarts-types de deux zones voisines. Cependant, ici, aucune réagréation de zones n'a été réalisée, car sinon, la procédure conduisait à ne retenir qu'une ou deux zones par sens, compte tenu des faibles niveaux et des faibles variations de la déflexion. Le découpage des zones homogènes a été fait en fonction de la déflexion caractéristique définie comme suit:

$$d_{car} = d_{max} + 2\sigma_{d_{max}} \quad (V-1)$$

La Figure V-6 présente les découpages en zones homogènes obtenus pour les sections 1 et 2, (uniquement dans le sens 1) pour les déflexions mesurées et les déflexions corrigées. Les résultats sont similaires pour les 2 sections :

- Les 2 découpages obtenus sont très proches. La procédure de correction ne modifie donc pas les résultats du découpage en zones homogènes.
- Comme déjà observé précédemment, les valeurs de déflexion corrigée sont systématiquement plus élevées que les valeurs mesurées.

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

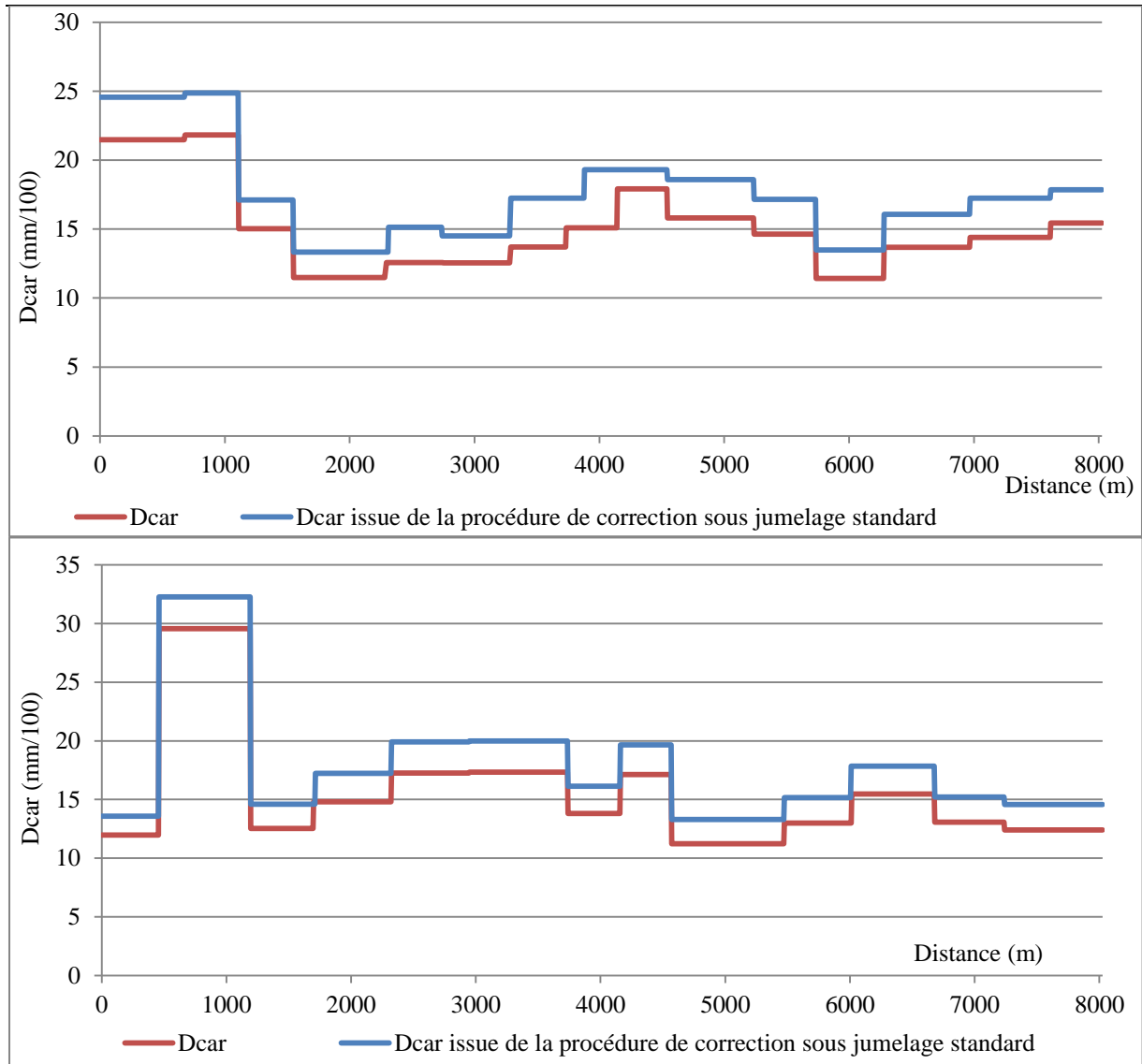


Figure V-6 : Découpage en zones homogènes de la déflexion caractéristique - Sens 1 - Section 1 (1) – Section 2 (2).

V.4.3 Bilan de la procédure de correction des déflexions

Afin de pouvoir corriger l'ensemble des 6000 bassins de déflexion mesurés par le curviamètre sur les deux sections étudiées, une procédure automatisée de correction a été développée, utilisant des abaques pour le calcul des paramètres du bassin de déflexion, puis un calcul automatique du bassin corrigé sous jumelage standard avec ALIZE. Cette procédure de correction a été appliquée aux deux sections étudiées, qui présentaient toutefois de faibles niveaux de déflexion (généralement inférieurs à 30 mm/100). On a constaté que la procédure de correction n'affecte pas la déflexion maximale en dessous d'une valeur $d_{max} < 10 \text{ mm}/100$ environ, mais améliore tout de même la forme du bassin de déflexion. Pour de plus forts niveaux de déflexion, la correction augmente la déflexion maximale, ce qui est conforme avec l'analyse du fonctionnement de l'appareil

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

Une procédure de découpage en zones homogènes de l'itinéraire a ensuite été appliquée, en vue d'appliquer ensuite les procédures de détection de défauts. On a montré que la procédure de correction des déflexions ne modifie pratiquement pas le découpage obtenu, par rapport aux mesures brutes. Seul le niveau de déflexion caractéristique est augmenté par la correction.

V.5 Application des indicateurs optimisés pour la détection de défauts

Cette partie concerne l'application des indicateurs développés dans le chapitre III, sur les deux itinéraires, afin d'essayer d'identifier l'origine des variations de déflexion observées, et les défauts correspondants.

Les indicateurs mis en œuvre sont des indicateurs portant sur la variation de module des couches, et également sur l'état de collage des interfaces (pour la section 2). Pour définir et calculer ces indicateurs, on a suivi la même approche que dans le chapitre IV :

- Trois indicateurs ont d'abord été définis, portant sur les modules de l'assise bitumineuse (pour la section 1 bitumineuse) ou de l'interface (pour la section 2 mixte) et du sol.
- Comme dans le chapitre IV, l'indice I_{SimAc} a été utilisé pour évaluer la sensibilité des indicateurs choisis, et la nécessité éventuelle de regrouper des couches de chaussée pour améliorer leur pertinence.
- Les indicateurs étant choisis, les fonctions de pondération ont été définies selon l'équation (III.14) définie dans le chapitre III, et ont été calculées à l'aide des bassins simulés sur la structure de référence.

Les indicateurs optimisés ont tout d'abord été calculés sur les bassins proches du bassin moyen correspondant aux critères du Tableau V-4. Leur dispersion a été étudiée et comparée à celle déterminée dans le chapitre IV.

Ensuite, les indicateurs optimisés ont été calculés sur tout l'itinéraire. Pour cela, les indicateurs ont été calculés sur un échantillon de bassins avec différents niveaux de déflexions maximales, représentatifs des variations de déflexion rencontrées sur chaque itinéraire. Les indicateurs optimisés ont également été comparés aux indicateurs classiques MLI et LLI.

Finalement, des calculs inverses ont été réalisés sur une quatre bassins de déflexion sélectionnés pour chaque section, présentant différents niveaux de déflexion maximale. Les modules rétro-calculés ont été comparés avec les résultats donnés par les indicateurs optimisés.

V.5.1 Mise en place des indicateurs

Pour chaque section étudiée, deux indicateurs optimisés ont été construits. Ils caractérisent les variations de module de la couche d'assise (pour la section 1) ou de l'interface (pour la section 2) et du sol. Les variations de ces indicateurs sont affectées par la

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

dispersion des mesures et ils ne sont donc pas toujours assez discriminants. Pour y remédier, certaines couches bitumineuses, de même nature et d'épaisseur faible ont été regroupées.

Les indicateurs ont été construits pour les deux sections et pour les deux sens de circulation.

Les indicateurs optimisés I_{MB} , I_{INT} et I_{SOL} sont calculés suivant les équations (V.2), (V.3) et (V.4).

$$I_{MB}(w_{mes}(x_c, \bullet)) = \Lambda_{MB}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{MB}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\})) \quad (V.2)$$

$$= \int_{x=-1}^{x=3} p_{MB}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v - \int_{x=-1}^{x=3} p_{MB}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v \quad (V.3)$$

$$\Lambda_{int}(w_{mes}(x_c, \bullet)) = \int_{x=-1}^{x=3} p_{int}(x'_v) w_{mes}(x_c, x'_v) dx'_v \quad (V.4)$$

$$I_{Sol}(w_{mes}(x_c, \bullet)) = \Lambda_{Sol}(w_{mes}(x_c, \bullet)) - \Lambda_{Sol}(w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}))$$

$$= \int_{x=-1}^{x=3} p_{Sol}(x'_v) w_{mes}(x_c, \bullet) dx'_v - \int_{x=-1}^{x=3} p_{Sol}(x'_v) w_{cal}(\bullet, \{E_k^0\}) dx'_v$$

Les indicateurs ont été normalisés pour obtenir des valeurs variant entre -0.5 (lorsque le module de référence est divisé par 2) et 1 (lorsque le module de référence est multiplié par deux). Pour l'interface, l'indicateur a été normalisé pour obtenir des valeurs variant entre 0 (interface parfaitement collée) et 1 (interface totalement glissante). Le Tableau V-8 présente les intervalles des indicateurs I_{Nj} correspondant à l'état des couches étudiées et I_{NINT} pour l'état de l'interface. Suite aux résultats du chapitre IV, les seuils suivants ont été définis pour caractériser l'état des couches de chaussée :

- Pour les modules :
 - $I_{Nj} > 0.5$ correspond à état significativement meilleur que l'état de référence (module plus élevé) ;
 - $-0.25 < I_{Nj} < 0.5$ correspond à un état proche de l'état de référence ;
 - $I_{Nj} < -0.25$ correspond à un état endommagé (module inférieur à la valeur de référence) ;
- Pour les interfaces :
 - $I_{NINT} < 0.25$ correspond à un état collé,
 - $0.25 < I_{NINT} < 0.75$ correspond à un état partiellement glissant
 - $I_{NINT} > 0.75$ correspond à un état totalement glissant.

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

Tableau V-8 : Seuils des indicateurs décrivant l'état des couches étudiées.

| | Variation de module d'une couche | Variation de l'état de l'interface |
|--------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Etat plus endommagé que la référence | $I_{Nj} < -0.25$ | $I_{NINT} > 0.75$ |
| Etat identique à la référence | $-0.25 < I_{Nj} < 0.5$ | $0.25 < I_{NINT} < 0.75$ |
| Meilleur état que la référence | $I_{Nj} > 0.5$ | $I_{NINT} < 0.25$ |

V.5.1.1 Etude de sensibilité et calcul des indicateurs pour la structure 1

La première étape de la création des indicateurs consiste à étudier l'influence de la variation des modules sur la mesure de déflexion, pour permettre la mise en place d'indicateurs pertinents. Le Tableau V-9 présente, pour les différentes couches de la structure de chaussée de référence, le calcul de l'indice I_{SimAC} qui caractérise l'écart entre le bassin de déflexion calculé pour la structure de référence, et ceux obtenus lorsque le module d'une couche est doublé ou divisé par deux. On peut constater que :

- Pour le sol, $I_{SimAC} > 6\%$ ce qui indique que l'indicateur correspondant sera très significatif.
- Pour la couche de surface, I_{SimAC} est également significatif, puisqu'il est à supérieur 2 %.
- Par contre, pour les couches d'assise bitumineuses, I_{SimAC} est inférieur ou égal à 1.8 % pour le BBSG et atteint seulement 1.3 % pour un module doublé de la couche d'EME. Comme vu dans le chapitre IV, pour des valeurs de I_{SimAC} inférieures à 2 %, l'indicateur calculé sera peu pertinent, car il sera trop sensible à la dispersion des mesures. Il a donc été décidé de réunir ces deux couches bitumineuses en une couche unique, d'épaisseur 33 cm.

Tableau V-9 : Calcul de l'indice I_{SimAC} caractérisant l'écart obtenu sur le bassin de déflexion lorsque le module d'une couche est modifié.

| Matériaux | Module de la couche (MPa) | I_{SimAC} (%) |
|--|---------------------------|-----------------|
| BBDr | 2000 | 4.3 |
| | 8000 | 2 |
| BBSG | 5000 | 1.8 |
| | 20000 | 1.7 |
| EME | 6000 | 1.6 |
| | 24000 | 1.3 |
| Matériaux bitumineux (BBSG + EME) | 5500 | 7 |
| | 22000 | 7.3 |
| Sol | 100 | 6.5 |
| | 400 | 7 |

Le Tableau V-10 présente les modules retenus pour la structure de chaussée modifiée ainsi que les indicateurs étudiés. Les travaux réalisés ici étant axés sur le comportement structurel des chaussées, on se limite aux indicateurs concernant les couches structurelles. Les modules de la couche de roulement et du sol sont identiques à ceux déterminés dans le Tableau V-1.

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

Les deux couches de matériaux bitumineux sont réunies en une seule couche de 33 cm d'épaisseur et de module 11000 MPa.

Tableau V-10 : Section 1 – structure de chaussée de référence modifiée.

| Structure 1 (24 ans) | | |
|----------------------|--------------|------------|
| Epaisseur (m) | Module (MPa) | I_{Ni} |
| 0.04 | 4000 | / |
| 0.33 | 11000 | I_{NMB} |
| 1.5 | 200 | I_{NSOL} |
| Infinie | 55000 | / |

D'après le Tableau V-9, l'indice I_{SimAc} obtenu après regroupement des 2 couches bitumineuses est proche de 7 %, soit du même ordre de grandeur que pour le sol, ce qui est suffisant pour le calcul des indicateurs. Les indices I_{SimAc} recalculés pour les deux autres couches sont identiques à ceux obtenus précédemment.

La Figure V-7 compare le nouveau bassin de déflexion simulé avec ALIZE, obtenu pour la structure modifiée, avec les bassins moyens mesurés sur la structure 1, dans les sens 1 et 2. Tout comme pour la Figure V-3, les écarts entre les bassins moyens et le bassin simulé sont très faibles. Comme précédemment, les valeurs de $I_{SimA_{moy}}$ et de $I_{SimA_{bassin}}$ ne dépassent pas 1 % pour les sens 1 et 2, ce qui confirme la bonne représentativité de la structure de référence choisie.

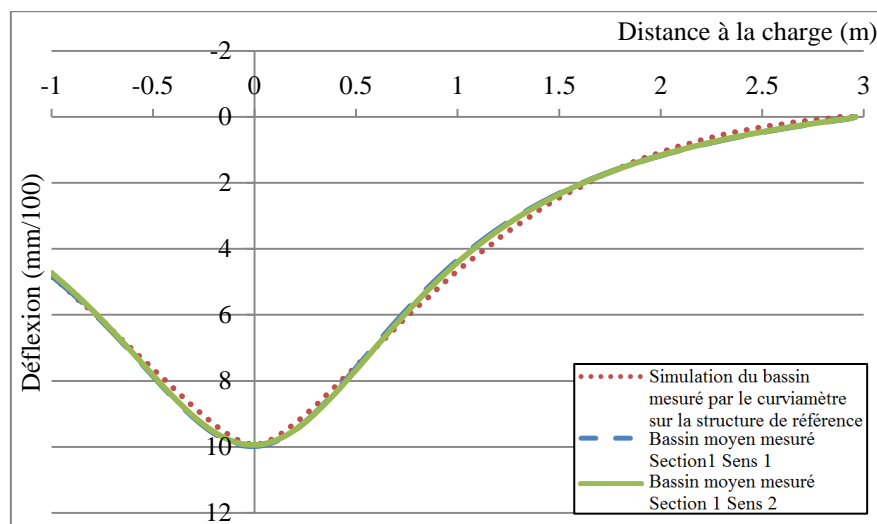


Figure V-7 : Comparaison entre les bassins moyens mesurés pour les deux sens de circulation et le bassin simulé avec la structure de référence.

Ensuite, on a étudié la sensibilité des indicateurs à une variation de module de couche ou à un changement d'état d'interface. La Figure V-8 présente l'évolution des indicateurs I_{NMB} et I_{NSOL} pour un changement de module de la couche de BBDR, de la couche d'assise en matériaux bitumineux, du sol et de la première interface (BBDR / BBSG).

D'après cette figure, on voit que :

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

- L'indicateur I_{NMB} est :
 - sensible à un changement de module de la couche de matériaux bitumineux;
 - très peu sensible à un changement de module de la couche de surface (BBDr), du sol et également à un changement d'état de l'interface BBDR / BBSG. En effet, pour les différents modules ou états de l'interface, l'indicateur est proche de 0.
- L'indicateur I_{NSOL} est :
 - sensible à un changement de module du sol ;
 - très peu sensible à un changement de module de la couche de surface (BBDr), de matériaux bitumineux et également à un changement d'état de l'interface BBDr / BBSG. Pour les différents modules ou états de l'interface, l'indicateur reste proche de 0.

Par construction, les valeurs des indicateurs I_{NMB} et I_{NSOL} sont nulles pour les valeurs de module et d'état de l'interface de la structure de référence.

D'après cette étude de sensibilité, il apparaît que les indicateurs I_{NMB} et I_{NSOL} sont principalement sensibles aux variations des modules des couches pour lesquels ils sont construits. Ainsi, aucun ordre d'utilisation de ces indicateurs n'a besoin d'être établi et ils peuvent être déterminés sans connaître les modules des autres couches.

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

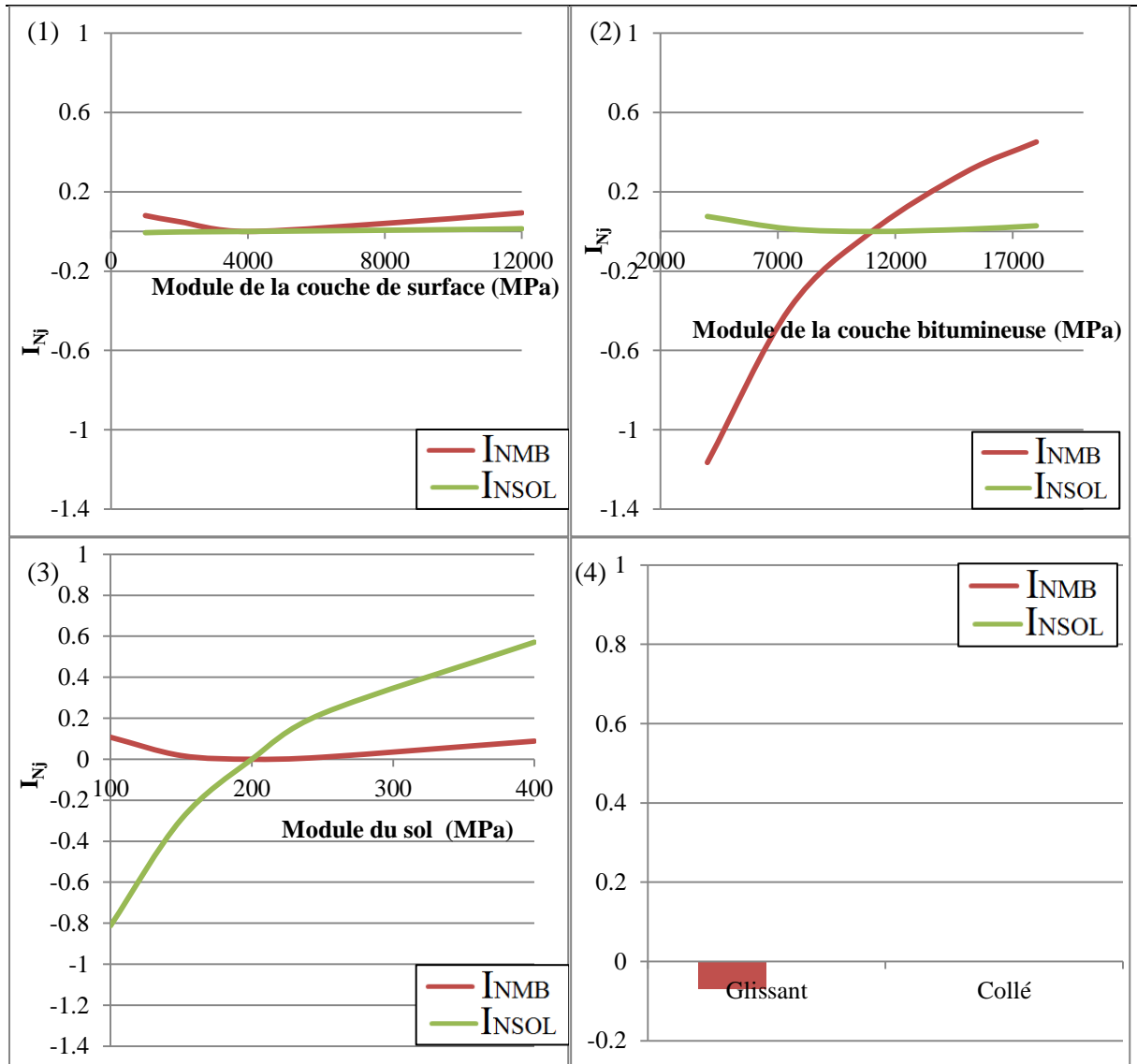


Figure V-8 : Evaluation de la sensibilité des indicateurs à un changement de modules de couche ou d'état d'interface (1) Module de la couche de surface – (2) Module de la couche bitumineuse – (3) Module du sol – (4) Etat d'interface entre la couche de surface et la couche bitumineuse.

V.5.1.2 Etude de sensibilité et calcul des indicateurs pour la structure 2

La seconde structure, âgée de 53 ans est une chaussée mixte avec 30 cm de matériaux bitumineux reposant sur une grave ciment de 20 cm d'épaisseur. Cette structure est affectée par des décollements à l'interface entre la grave ciment et les matériaux bitumineux.

Le Tableau V-11 présente les variations de l'indicateur I_{SimAc} obtenues pour des variations des modules des différentes couches de chaussée. Les indicateurs I_{SimAc} ont été calculés pour les deux structures de référence, définies pour les 2 sens de circulation. Comme pour la section 1, les valeurs de I_{SimAc} obtenues pour certaines couches de matériaux (BBSG, BBTM, Grave ciment) sont trop faibles pour obtenir des indicateurs fiables. Pour cette raison, il a été décidé d'étudier uniquement les indicateurs correspondant aux variations de module de la

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

couche de roulement (I_{NBDR}), au module du sol (I_{NSOL}) et à l'état de l'interface BBSG/GC (I_{NINT}).

Tableau V-11 : Calcul de l'indice I_{SimA_C} caractérisant l'écart obtenu sur le bassin de déflexion lorsque le module d'une couche est modifié.

| Matériaux | Sens 1 | | Sens 2 | | I_{NINT}/I_{Nj} |
|-----------|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|-------------------|
| | Module de la couche (MPa) | I_{SimA_C} (%) | Module de la couche (MPa) | I_{SimA_C} (%) | |
| BBDr | 1150 | 10.7 | 1500 | 7.7 | |
| | 4600 | 3.6 | 6000 | 2.9 | |
| BBTM | 1150 | 0.2 | 1500 | 0.2 | |
| | 4600 | 0.2 | 6000 | 0.2 | |
| BBSG | 5250 | 0.6 | 4000 | 0.6 | |
| | 21000 | 0.7 | 16000 | 0.7 | |
| Interface | Collé | 6.4 | Collé | 7.8 | I_{NINT} |
| | Glissante | 8.7 | Glissante | 6.7 | |
| GC | 10000 | 0.8 | 10000 | 0.9 | |
| | 40000 | 0.9 | 40000 | 1.1 | |
| Sol | 100 | 2.1 | 100 | 2.2 | I_{NSOL} |
| | 400 | 2.8 | 400 | 3.4 | |

De même que pour la structure 1, une étude de sensibilité des indicateurs à la variation des modules des couches de chaussée et des états des interfaces a été réalisée. Cette étude a montré que :

- L'indicateur I_{NINT} est :
 - sensible à un changement d'état de l'interface entre les couches de BBSG/GC ;
 - peu sensible à un changement de module des couches de BBSG et GC et très peu sensible à un changement de module de la couche de surface (BBDr), de la couche de BBTM, du sol et également d'un changement d'état des interfaces BBDr/BBTM et BBTM/BBSG.
- L'indicateur I_{NSOL} est :
 - sensible à un changement de module du sol ;
 - très peu sensible à un changement de module des couches de BBTM, BBSG, GC et du sol et également de l'état des interfaces.

D'après cette étude, les indicateurs I_{NSOL} et I_{NINT} sont donc, respectivement, seulement sensibles au changement de module du sol ou de l'état de l'interface. Ces indicateurs peuvent donc être utilisés directement, sans recalage des modules des autres couches.

V.5.2 Calcul des indicateurs pour les bassins de déflexion proches du bassin moyen

La Figure V-9 présente les valeurs des indicateurs optimisés obtenues pour les sections 1 et 2 (uniquement pour le sens 2), calculées pour les bassins proches du bassin moyen (ceux sélectionnées au §V.3). Pour la section 1, les valeurs des indicateurs sont faibles,

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

généralement comprises entre -0.25 et 0.5. Les indicateurs I_{NMB} varient entre -0.25 et 0.008, sauf pour le bassin n°9, qui donne une valeur de I_{NMB} de -0.51. Le module du sol est bien ajusté puisque I_{NSOL} varie seulement entre -0.03 et 0.32.

Pour la section 2, I_{NINT} est compris en 0.52 et 0.92 ce qui confirme la présence d'une interface partiellement collée. Le module du sol est bien ajusté, puisque I_{NSOL} est généralement compris entre -0.1 et 0.1.

Le calcul des indicateurs optimisés sur les bassins proches des bassins moyens montre que les valeurs des indicateurs portant sur les modules sont généralement comprises entre -0.25 et 0.5, ce qui concorde avec les études réalisées dans le Chapitre IV. Cet intervalle [-0,25, 0,5] semble donc bien correspondre à la répétabilité de mesure (même si ici, les bassins ne sont pas tous obtenus au même point, contrairement à ceux étudiés dans le chapitre IV), et non à la présence de défauts.

Pour l'indicateur caractérisant l'interface GC/BBSG, les valeurs varient entre 0.52 et 0.92, ce qui correspond à un état « partiellement collé », qui correspond aussi à l'hypothèse faite pour la structure de référence.

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

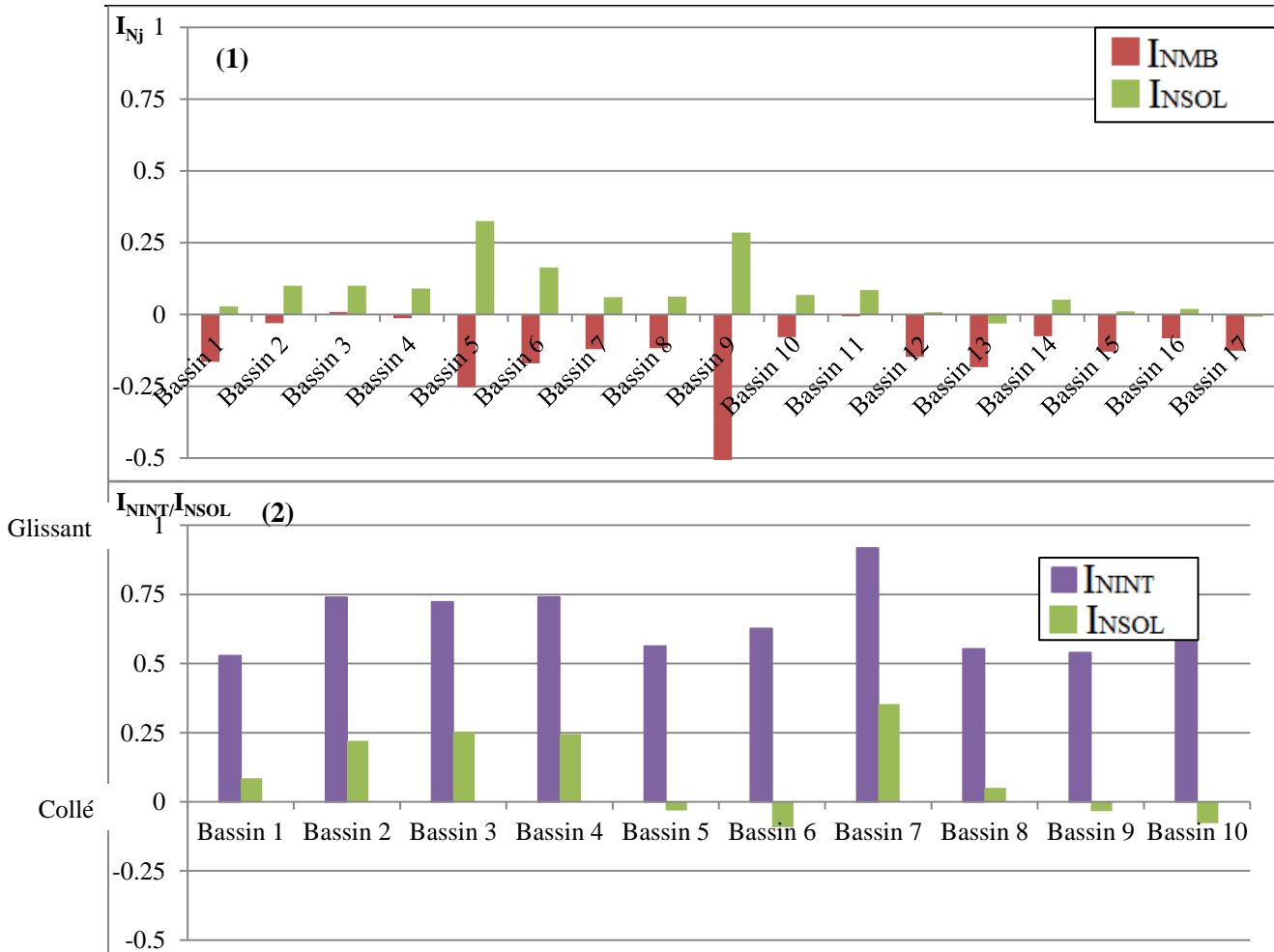


Figure V-9 : Evolutions des indicateurs normalisés pour les bassins proches du bassin de déflexion moyen — Section 1 (1) – Section 2 (2) – sens 2.

Sur la Figure V-10, on a représenté les bassins de déflexion pour lesquels les variations des indicateurs sont les plus importantes (bassin n°9 pour la section 1 et bassin n°7 pour la section 2), en comparant à chaque fois le bassin mesuré avec le bassin de référence calculé. Cette figure montre que même pour des valeurs d'indicateurs optimisés proches des seuils du Tableau V-8, les formes des bassins restent très similaires (l'écart sur la forme des bassins, caractérisé par l'indicateur $I_{SimA_{bassin}}$ reste inférieur à 1 %). Ce résultat montre qu'il existe une limite à la sensibilité des indicateurs optimisés qui ont été développés, (du moins pour les structures de chaussées étudiées ici, qui sont des structures de chaussées épaisses, avec des niveaux de déflexion faibles) et que compte tenu de la précision de mesure du curviamètre, il est difficile de détecter des variations de module faibles, inférieures aux seuils évoqués précédemment (Tableau V-8).

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

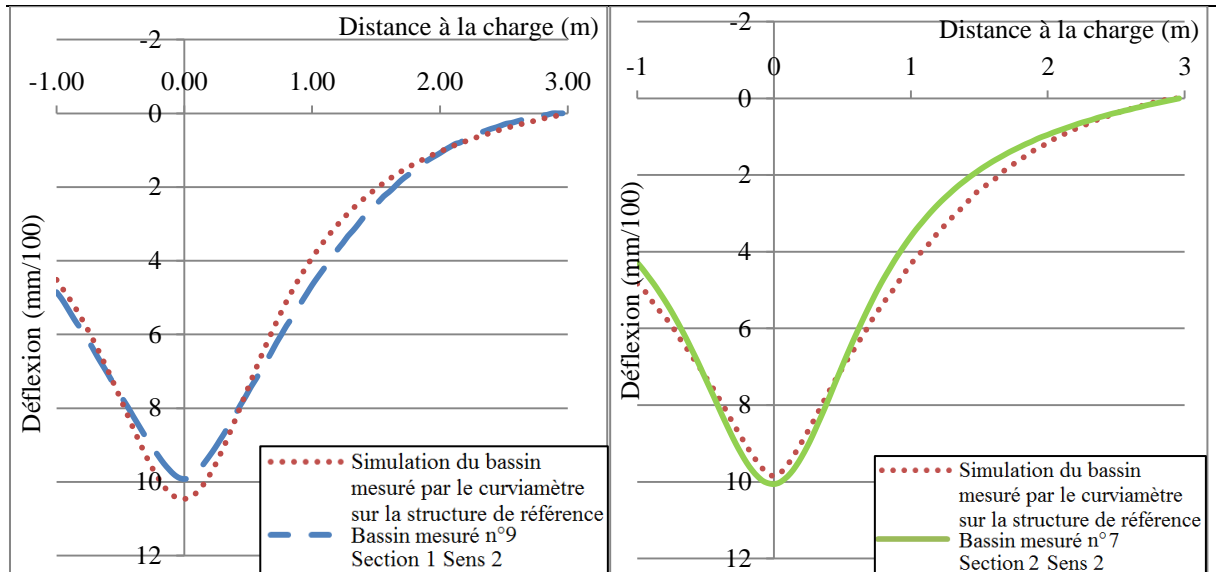


Figure V-10 : Comparaison entre les bassins de déflexions simulés pour les structures de référence et les bassins mesurés, pour les points de mesure où les valeurs des indicateurs sont les plus importantes – Section 1 (1) – Section 2 (2).

Le Tableau V-12 résume pour les deux sections et les deux sens de circulation, les valeurs d'indicateurs obtenues pour les bassins, sélectionnés, proches du bassin moyen. Ce tableau donne les étendues des valeurs des indicateurs, les moyennes et le nombre d'indicateurs I_{Nj} qui sont en dehors des intervalles $[-0.25 ; 0.5]$ ou $[-0.5 ; 1]$ pour le module, ou le nombre I_{NINT} en dehors de l'intervalle $[0.25, 0.75]$ pour l'interface.

On voit que pour les deux sections de chaussées :

- L'indicateur I_{NMB} reste généralement dans l'intervalle $[-0.25 ; 0.5]$, avec seulement 1 ou 2 valeurs par section et par sens, qui sortent de cet intervalle.
- Pour l'indicateur I_{NINT} , la majorité des valeurs indiquent une interface partiellement glissante. Seul un indicateur par sens dépasse 0.75 indiquant un décollement total.
- Les valeurs de l'indicateur I_{NSOL} sont très peu dispersées, et sont toutes comprises dans l'intervalle -0.25 et 0.5 . Pour les quatre séries de mesures, leur moyenne est proche de 0.

Pour les bassins de déflexion proches du bassin moyen, les indicateurs confirment donc que la chaussée présente des caractéristiques homogènes, et correspondant aux valeurs de modules et de conditions d'interfaces définies pour la section de référence.

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

Tableau V-12 : Comparaison des étendues, moyennes et nombre d'indicateurs hors limites pour les deux sections étudiées et dans les deux sens de circulation.

| | | I_{Ni} | Etendue | Moyenne | Nombre d'indicateurs I_{Ni} hors de l'intervalle $[-0.25 ; 0.5]$ ou inférieurs à 0.25 pour I_{NINT} | Nombre d'indicateurs I_{Ni} hors de l'intervalle $[-0.5 ; 1]$ ou supérieurs à 0.75 pour I_{NINT} |
|-----------|--------|------------|------------------|---------|---|--|
| Section 1 | Sens 1 | I_{NMB} | $[-0.84 ; 0.23]$ | -0.13 | 0 | 1 (1 %) |
| | | I_{NSOL} | $[-0.12 ; 0.71]$ | 0.01 | 0 | 0 |
| | Sens 2 | I_{NMB} | $[-0.5 ; 0.008]$ | -0.16 | 2 (12 %) | 1 (6 %) |
| | | I_{NSOL} | $[-0.03 ; 0.34]$ | 0.14 | 0 | 0 |
| Section 2 | Sens 1 | I_{NINT} | $[0.52 ; 0.77]$ | 0.63 | 0 | 1 (7 %) |
| | | I_{NSOL} | $[-0.06 ; 0.09]$ | -0.003 | 0 | 0 |
| | | I_{NINT} | $[0.53 ; 0.92]$ | 0.65 | 0 | 1 (10 %) |
| | | I_{NSOL} | $[-0.09 ; 0.35]$ | 0.1 | 0 | 0 |

V.5.3 Analyse des indicateurs pour différents niveaux de déflexion maximale, représentatifs de l'itinéraire

Suite à l'analyse des indicateurs calculés sur les bassins représentatifs des bassins moyens et à l'obtention de valeurs d'indicateurs cohérentes avec celles déterminées dans le chapitre IV, cette dernière partie s'intéresse aux valeurs des indicateurs sur l'ensemble des deux itinéraires. Les deux sections seront seulement étudiées dans le sens 1.

Pour cela, quatre intervalles de déflexion maximale, représentatifs de l'itinéraire, ont été sélectionnés et les indicateurs ont été calculés sur l'ensemble des bassins situés dans ces intervalles.

Le Tableau V-13 présente les intervalles de déflexion sélectionnés, ainsi que le nombre de bassins compris dans l'intervalle considéré. La majorité des bassins se situe dans les intervalles de déflexion maximale $[9 \text{ mm}/100, 11 \text{ mm}/100]$ et $[6 \text{ mm}/100, 8 \text{ mm}/100]$.

Tableau V-13 : Intervalles de déflexions maximales considérées pour la prise en compte des bassins.

| | Minimum (mm/100) | Maximum (mm/100) | Nombre de mesures | |
|--------------|---------------------|---------------------|-------------------|-----------|
| | | | Section 1 | Section 2 |
| Intervalle 1 | 6 | 8 | 302 | 412 |
| Intervalle 2 | 9 | 11 | 393 | 244 |
| Intervalle 3 | 13 | 15 | 110 | 91 |
| Intervalle 4 | 18 | 20 | 20 | 45 |

La Figure V-11 présente pour les sections 1 et 2, les valeurs des indicateurs calculées pour différents intervalles de déflexion maximale :

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

- Pour la section 1, l'indicateur I_{NMB} est relatif à la couche d'assise bitumineuse. Ses valeurs varient entre 0.5 et -2 et diminuent lorsque la déflexion augmente.
- Pour la section 2, l'indicateur I_{NINT} relatif à l'état de l'interface est toujours compris entre 0.25 et 1. Pour de faibles déflexions, il indique plutôt un décollement partiel de l'interface, alors que pour des déflexions maximales supérieures à 14 mm/100, il indique toujours une interface glissante.
- L'indicateur I_{NSOL} varie entre -1 et 1 pour les deux sections. L'augmentation de la déflexion maximale conduit à diminuer I_{NSOL} . A partir de 18 mm/100, I_{NSOL} est toujours négatif pour les deux sections, indiquant un module de sol inférieur à la valeur de référence. Pour $d_{max} < 8$ mm/100, la grande majorité des valeurs est supérieure à 0, indiquant un module supérieur au module de référence.
- Pour l'ensemble des indicateurs calculés, un même niveau de déflexion maximale peut être représenté par des niveaux différents des indicateurs.

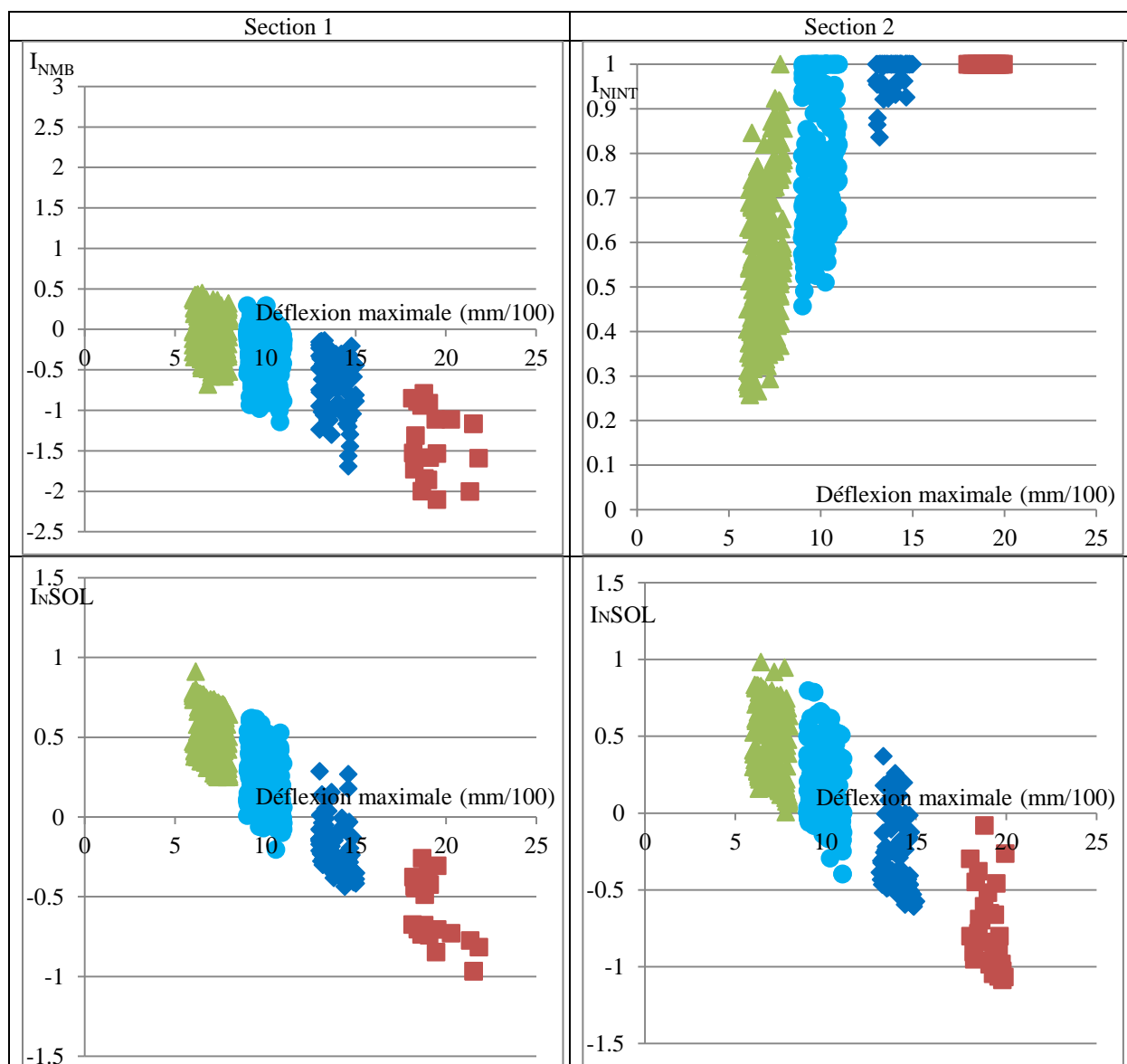


Figure V-11 : Evolution des indicateurs I_{NMB} , I_{NINT} et I_{NSOL} selon le niveau de déflexion de l'intervalle.

Le Tableau V-14 résume, pour les sections 1 et 2, le nombre de valeurs d'indicateurs pour lesquelles les performances de la couche ou de l'interface étudiée sont considérées comme

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

meilleures, égales ou moins bonnes que l'état de référence. Pour chaque intervalle de déflexion maximale étudié, les valeurs entre parenthèses indiquent le pourcentage d'indicateurs correspondant à chaque état de la couche ou de l'interface. On peut conclure que :

- Pour la section 1, pour de faibles déflexions, les indicateurs I_{NMB} sont à 78 % compris entre -0.25 et 0.5, ce qui correspond à des valeurs de modules proches des valeurs de référence. Plus la déflexion augmente, plus le pourcentage d'indicateurs I_{NMB} inférieurs à -0.25 (indiquant un module dégradé) augmente, pour terminer à 100 % de valeurs de modules dégradées, pour des valeurs de déflexion comprises entre 18 mm/100 et 22 mm/100. Aucun indicateur I_{NMB} n'est supérieur à 0.5 pour cette section, ce qui signifie qu'il n'y a pas de zones où la couche bitumineuse a des modules supérieurs à la référence. Pour les intervalles de déflexions entre 13 mm/100 et 15 mm/100 et entre 18 mm/100 et 22 mm/100, lorsque I_{NSOL} est inférieur à -0.25, I_{NMB} est toujours inférieur à -0.25. Cela signifie qu'un endommagement du sol est lié à un endommagement de la couche bitumineuse. Cependant la réciproque est fautive.
- Pour de faibles déflexions (< 11 mm/100), les indicateurs I_{NSOL} indiquent en majorité des valeurs de module du sol proches des valeurs de référence (dans 57 % des cas), ou supérieures aux valeurs de référence. Plus la déflexion augmente, plus le nombre de valeurs d'indicateurs $I_{NSOL} < -0.25$ augmente, indiquant des modules plus faibles que la référence, pour terminer à 100 % de valeurs inférieures à -0,25 pour les déflexions les plus élevées.
- Pour la section 2, l'indicateur I_{NINT} relatif à l'interface indique, pour de faibles niveaux de déflexion maximale, une interface partiellement collée. Pour les valeurs les plus élevées de la déflexion maximale, l'interface apparaît complètement glissante dans tous les cas. Pour I_{NSOL} , une augmentation de la déflexion maximale conduit à une augmentation du nombre de valeurs $I_{NSOL} < -0.25$, indiquant une diminution du module du sol. Lorsque $I_{NSOL} < -0.25$, I_{NINT} est toujours supérieur à 0.75. Cela signifie qu'un endommagement du sol est lié à un décollement de l'interface. Cependant, la réciproque est fautive.

Tableau V-14 : Détermination du nombre d'indicateurs mentionnant un état sain, partiellement dégradé ou totalement endommagé de la couche ou de l'interface étudiée selon l'intervalle de déflexion maximale – Section 1 – Section 2.

| | Section 1 | | | |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | 6 < dmax < 8 (mm/100) | 9 < dmax < 11 (mm/100) | 13 < dmax < 15 (mm/100) | 18 < dmax < 22 (mm/100) |
| $I_{NMB} < -0.25$ | 67 (22%) | 165 (42%) | 101 (91%) | 20 (100%) |
| $-0.25 < I_{NMB} < 0.5$ | 235 (78%) | 228 (58%) | 10 (9%) | 0 |
| $I_{NMB} > 0.5$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $I_{NSOL} < -0.25$ | 0 | 0 | 51 (46%) | 20 (100%) |
| $-0.25 < I_{NSOL} < 0.5$ | 174 (58%) | 366 (93%) | 60 (54%) | 0 |
| $I_{NSOL} > 0.5$ | 128 (42%) | 27 (7%) | 0 | 0 |

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

| | Section 2 | | | |
|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| | 6<dmax<8 (mm/100) | 9<dmax<11 (mm/100) | 13<dmax<15 (mm/100) | 18<dmax<22 (mm/100) |
| $I_{NINT}<0.25$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $0.25<I_{NINT}<0.75$ | 363 (88%) | 121 (50%) | 0 | 0 |
| $I_{NINT}>0.75$ | 49 (12%) | 123 (50%) | 91 (100%) | 45 (100%) |
| $I_{NSOL}<-0.25$ | 0 | 3 (1%) | 57 (63%) | 44 (97%) |
| $-0.25<I_{NSOL}<0.5$ | 226 (55%) | 222 (91%) | 34 (37%) | 1 (3%) |
| $I_{NSOL}>0.5$ | 186 (45%) | 19 (6%) | 0 | 0 |

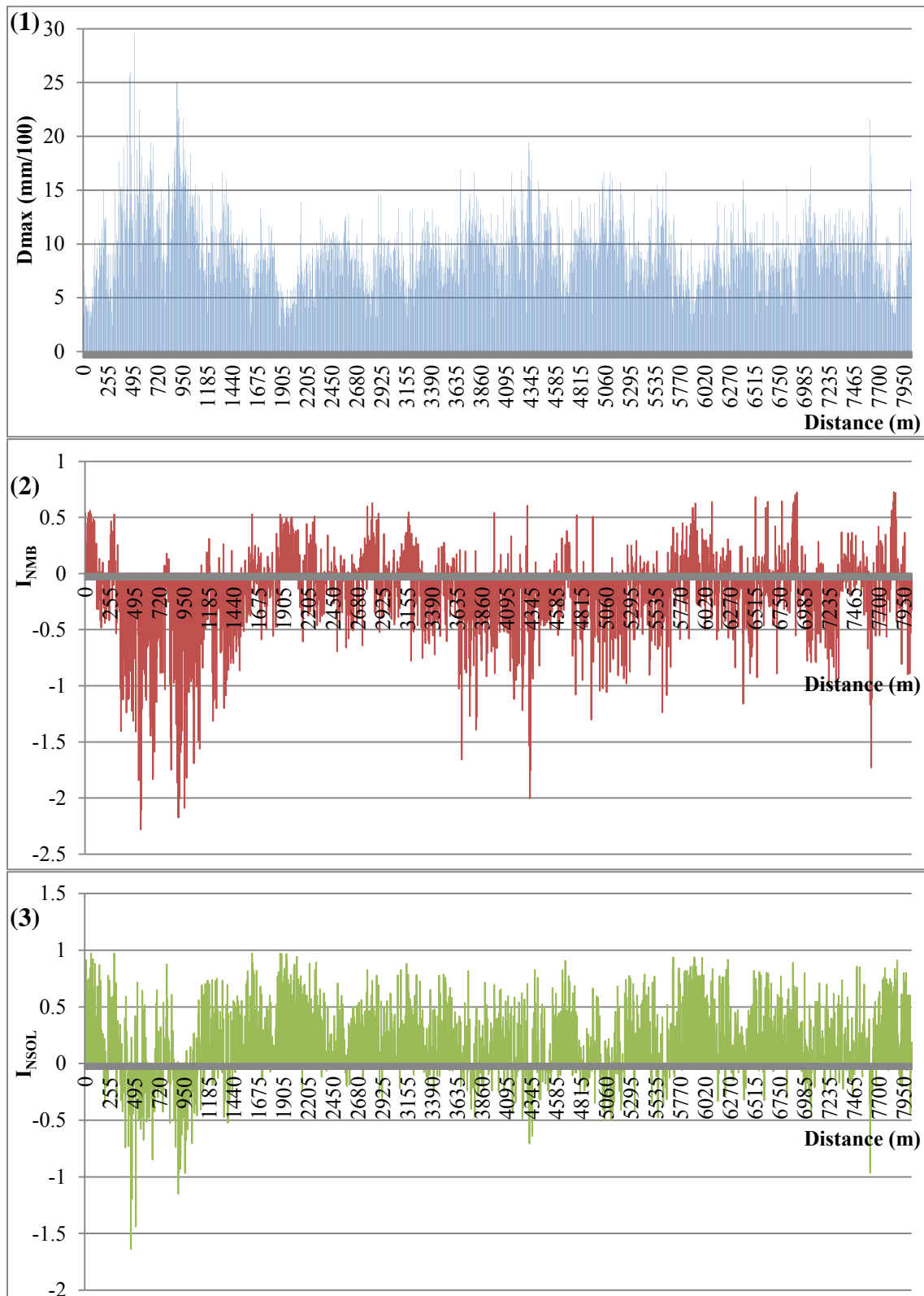
V.5.4 Calcul des indicateurs sur l'ensemble de l'itinéraire

Pour terminer, les indicateurs ont été calculés sur tout l'itinéraire pour les sections 1 et 2 et comparés à la déflexion maximale, puis également aux indicateurs MLI et LLI. Enfin, une procédure de calcul inverse a été conduite sur quatre bassins par section.

La Figure V-12 représente l'évolution de la déflexion maximale et des indicateurs I_{NMB} et I_{NSOL} pour la section 1 et de I_{NINT} et I_{NSOL} pour la section 2. Ce graphique montre que :

- Pour la section 1, l'indicateur I_{NMB} varie entre -2.3 et 0.7 et présente une majorité de valeurs négatives sur l'itinéraire. Cette observation indique des valeurs de module dégradées dans la couche d'assise bitumineuse. Les plus fortes dégradations apparaissent en début de section (jusqu'à 1500 m environ), où les valeurs de I_{NMB} sont souvent inférieures à -1, et où l'on mesure également les plus fortes déflexions.
- Pour la section 1, les valeurs des indicateurs I_{NSOL} sont majoritairement positives (à l'exception du début de section) et généralement comprises entre 0 et 0.5, ce qui indique un sol non endommagé, dont le module est proche du module de référence.
- Pour la section 2, l'indicateur relatif à l'interface I_{NINT} indique une interface partiellement ou totalement glissante sur tout l'itinéraire. Les valeurs de cet indicateur sont particulièrement élevées en début de section (jusqu'à environ 1300 m), ce qui indique une interface plus dégradée dans cette zone, ce qui coïncide également avec les déflexions les plus élevées. D'après l'indicateur I_{NSOL} , le sol ne semble pas être endommagé, à l'exception peut-être du début de section. Les valeurs de I_{NSOL} sont surtout comprises entre 0 et 1 (sauf en début de section). Cela indique des modules de sol du même ordre ou meilleurs que le module de référence.

Section 1



Section 2

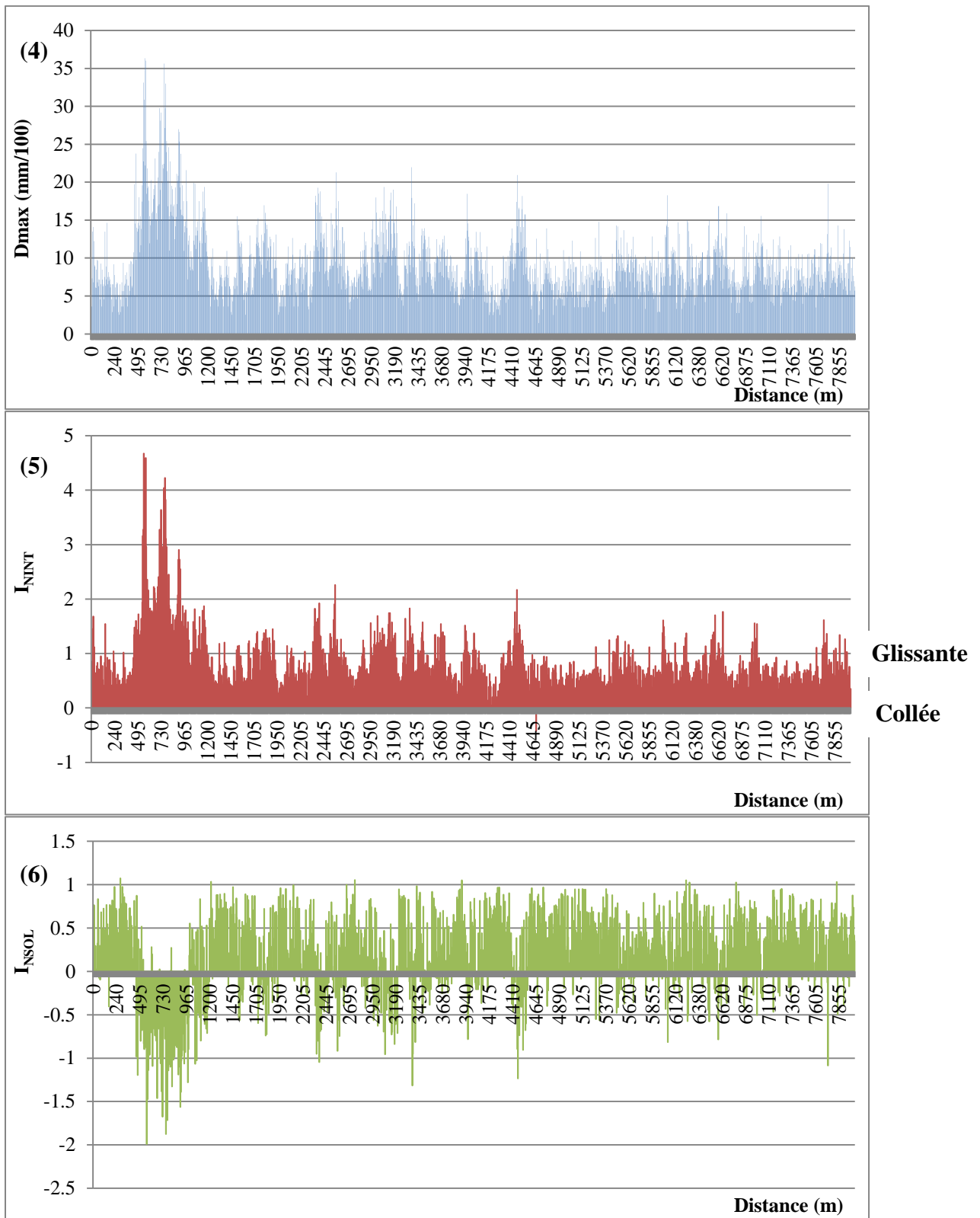


Figure V-12 : Comparaison des indicateurs et de la déflexion maximale sur tout l'itinéraire – Section 1 (1)(2)(3)-Section 2 (4)(5)(6).

Ces résultats à l'échelle de l'ensemble de l'itinéraire mettent en évidence l'intérêt des nouveaux indicateurs proposés. Alors que la déflexion maximale ne donne qu'une indication globale sur la raideur de la structure, ces indicateurs permettent d'identifier plus précisément l'origine probable du défaut, et sa position. D'autre part, une fois la fonction de pondération construite ces indicateurs peuvent être calculés automatiquement et rapidement sur l'ensemble des bassins mesurés sur un itinéraire routier. A l'échelle d'un réseau, cette approche est donc beaucoup plus rapide que des calculs inverses qui nécessitent de réaliser un calcul spécifique sur chaque bassin.

V.5.5 Comparaison des indicateurs optimisés avec les indicateurs MLI et LLI

Des comparaisons ont également été réalisées entre les nouveaux indicateurs optimisés I_{NMB} et I_{NINT} et le paramètre MLI, relatif à la couche de base. De même, l'indicateur I_{NSOL} a été comparé avec le paramètre LLI, relatif aux couches inférieures de la structure (couche de fondation et plateforme). Les indicateurs MLI et LLI ont été calculés à partir des bassins corrigés et l'ensemble des indicateurs a été normalisé pour obtenir des valeurs variant entre 0 et 1.

La Figure V-13 représente les variations des indicateurs I_{NMB} et I_{NINT} en fonction de MLI, et les variations de I_{NSOL} en fonction de LLI. Pour les deux sections étudiées, les indicateurs optimisés apparaissent fortement corrélés avec MLI ou LLI. Cette observation montre que pour cette campagne d'essai, les indicateurs optimisés ont la même sensibilité aux défauts que ces indicateurs associés au FWD. Ce constat permet de valider les indicateurs puisqu'ils déterminent les mêmes zones faibles que les indicateurs classiques MLI et LLI. Les indicateurs optimisés sont donc cohérents avec les indicateurs issus des bassins corrigés. De plus, les indicateurs optimisés présentent l'avantage d'indiquer plus précisément la position de la couche ou de l'interface endommagée. Les valeurs prises par les paramètres optimisés permettent également de quantifier l'importance du défaut. Toutefois, il faut préciser que les faibles niveaux de déflexion observés sur ces deux sections ne sont pas favorables à l'obtention d'indicateurs très précis.

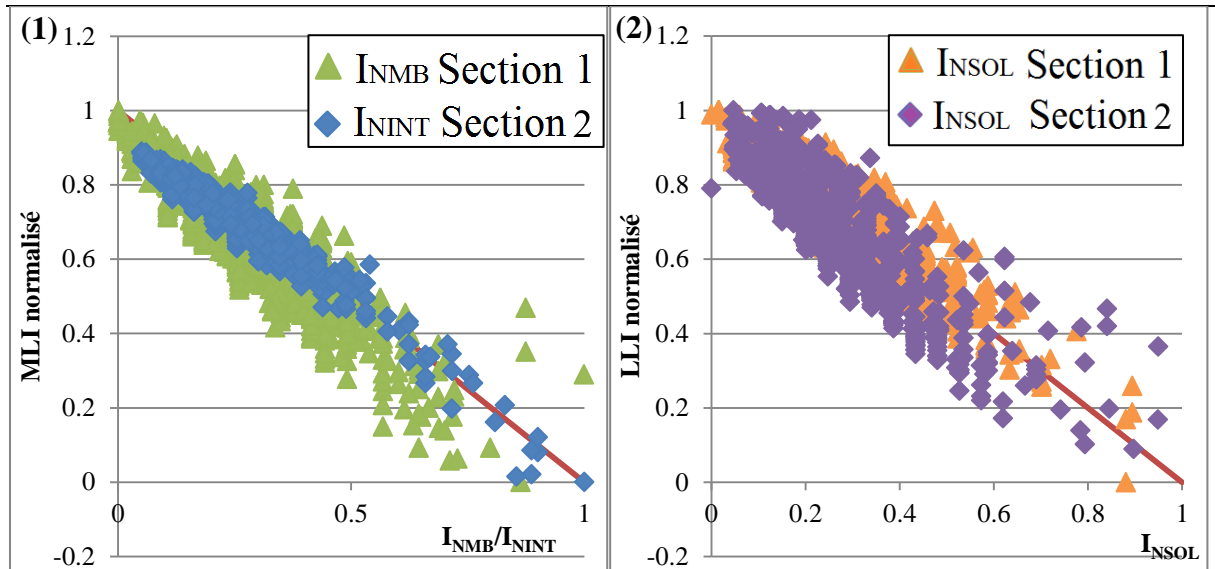


Figure V-13 : Etude de l'allure de MLI en fonction de I_{NMB} , I_{NINT} (1) et de LLI en fonction de I_{NSOL} (2).

V.5.6 Procédure de calcul inverse pour différents niveaux de I_{NSOL}

Pour chaque section, des calculs inverses ont été réalisés sur quatre bassins corrigés sous jumelage standard issus des mesures du curviamètre. Afin de tester les valeurs des indicateurs, ces bassins ont été sélectionnés comme suit :

- Pour la section 1, on a choisi 4 bassins avec un indicateur I_{NMB} inférieur à -0.5, indiquant un module faible de la couche de matériaux bitumineux.
- Pour la section 2, on a choisi 4 bassins dont l'indicateur I_{NINT} est supérieur à 0.75, ce qui correspond à un état décollé de l'interface.
- Pour chaque section, on a choisi deux bassins ayant un même niveau de déflexion maximale, mais des valeurs différentes de l'indicateur I_{NSOL} . En complément, on a choisi deux bassins ayant un niveau de déflexion maximale relativement différent, mais des valeurs de I_{NSOL} très proches.

Ces choix permettent en particulier de tester la pertinence de l'indicateur I_{NSOL} , et de vérifier si le calcul inverse conduit à des valeurs de module du sol cohérentes avec la valeur de I_{NSOL} , dans des situations différentes.

La Figure V-14 présente les bassins sélectionnés pour réaliser les calculs inverses. Bien que le niveau de déflexion maximale soit identique pour les bassins rouges, les indicateurs I_{NSOL} calculés à partir de ces bassins se situent dans un intervalle différent ($I_{NSOL} > -0.25$ ou $I_{NSOL} \leq -0.5$). A l'inverse, les bassins bleus présentent une déflexion maximale différente mais les indicateurs I_{NSOL} calculés à partir de ces bassins sont compris dans le même intervalle $[-0.5, -0.25]$.

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

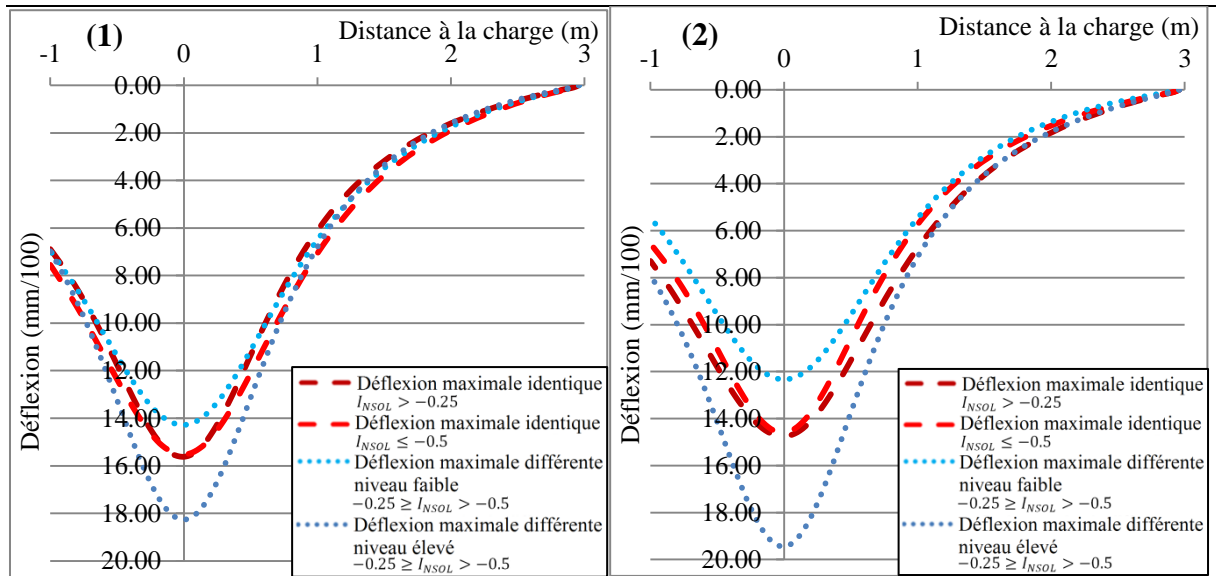


Figure V-14 : Comparaison de bassins ayant le même niveau de déflexion mais un seuil de valeurs de I_{NSOL} différent ou un même seuil de valeurs de I_{NSOL} mais une déflexion différente –Section 1 (1) – Section 2 (2).

Le Tableau V-15 présente les modules obtenus par calcul inverse pour les différents bassins de déflexion des sections 1 et 2. Pour faciliter la convergence du calcul inverse, les deux premières couches (BBDR et BBTM) ont été regroupées pour la section 2.

Pour la section 1, on peut faire les observations suivantes :

- Les 4 bassins choisis avaient des valeurs de l'indicateur $I_{NMB} \leq -0.5$, indiquant un module d'enrobé de couche d'assise inférieur à 50 % du module de référence (qui était de 11000 MPa). C'est cohérent avec les calculs inverses, qui ont donné des valeurs de modules comprises entre 2827 et 6472 MPa, inférieures de 41 % à 74 % au module de référence, pour les 4 bassins.
- En ce qui concerne le sol, les modules rétro-calculés sont également cohérents avec les valeurs de l'indicateur I_{NSOL} :
 - Pour $I_{NSOL} \leq -0.5$, indiquant un module de sol inférieur à 50 % du module de référence, le rétrocalcul conduit à un module de 72 MPa (pour un module de référence de 200 MPa)
 - Pour $-0.25 \geq I_{NSOL} > -0.5$, qui indique une baisse de module comprise entre 25 % et 50 %, le rétrocalcul donne des valeurs de 135 et 138 MPa, qui se situent bien dans cet intervalle
 - Enfin, pour $I_{NSOL} > -0.25$, qui indique une baisse du module de sol inférieure à 25 %, le rétrocalcul donne une valeur de 170 MPa, également cohérente.

Pour la section 2, on peut observer que :

- Les 4 bassins choisis avaient des valeurs de l'indicateur $I_{NINT} > 0.75$, indiquant un décollement complet de l'interface GC/ BBSG. C'est cohérent avec les calculs

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

inverses, qui ont conduit à imposer également une interface décollée, pour obtenir des solutions acceptables.

- A nouveau, les modules calculés pour le sol sont également cohérents avec les valeurs de I_{NSOL} :
 - Pour $I_{NSOL} \leq -0.5$, le rétrocalcul conduit à un module de 117 MPa
 - Pour $-0.25 \geq I_{NSOL} > -0.5$, les rétrocalculs donne des valeurs de 147 et 154 MPa.
 - Enfin, pour $I_{NSOL} > -0.25$, qui indique une baisse du module de sol inférieure à 25 %, le rétrocalcul donne une valeur de 178 MPa.

Ainsi, pour les différents bassins de déflexion qui ont été choisis, les modules déterminés par calcul inverse sont globalement cohérents avec les valeurs des indicateurs I_{NMB} , I_{NINT} et I_{NSOL} . Cela confirme l'intérêt de ces indicateurs, plus simples à mettre en œuvre à l'échelle d'un réseau que des calculs inverses, pour analyser les variations des déflexions mesurées.

Tableau V-15 : Comparaison des modules déterminés par calcul inverse à partir des bassins de déflexion corrigés avec les niveaux des indicateurs optimisés.

| Section 1 | | | | |
|-------------------------------------|------------------------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| Module de référence (MPa) | $-0.25 \geq I_{NSOL} > -0.5$ | | $I_{NSOL} > -0.25$ | $I_{NSOL} \leq -0.5$ |
| | Dmax=14.3mm/100 | Dmax=18.3mm/100 | Dmax=15.6 mm/100 | Dmax=15.5 mm/100 |
| | Bassin 5495 | Bassin 7630 | Bassin 7635 | Bassin 1065 |
| 4000 | 2441 (-39 %) | 840 (-79 %) | 1224 (-69.4 %) | 3573 (-10.7 %) |
| 11000 (I_{NMB}) | 5640 (-48.7 %) | 3052 (-72.2 %) | 2827 (-74.3 %) | 6472 (-41.2 %) |
| 200 (I_{NSOL}) | 138 (-31 %) | 135 (-32.5 %) | 170 (-15 %) | 72 (-64 %) |

| Section 2 | | | | |
|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Module de référence (MPa) | $-0.25 \geq I_{NSOL} \geq -0.5$ | | $I_{NSOL} \geq -0.25$ | $I_{NSOL} \leq -0.5$ |
| | Dmax=12.3mm/100 | Dmax=19.4mm/100 | Dmax=14.7 mm/100 | Dmax=14.8 mm/100 |
| | Bassin 5485 | Bassin 600 | Bassin 6155 | Bassin 5300 |
| 2300 | 2790 (+21.3 %) | 1041 (-54.7 %) | 2452 (+6.6 %) | 1839 (-20 %) |
| 10500 | 3286 (-68.7 %) | 2930 (-72 %) | 2411 (-77 %) | 7885 (-24.9 %) |
| 20000 | 8390 (-58 %) | 5580 (-72.1 %) | 10012 (-50 %) | 11637 (-41.8 %) |
| 200 (I_{NSOL}) | 154 (-23 %) | 147 (-26.5 %) | 178 (-11 %) | 117 (-41.5 %) |

V.6 Conclusion

L'objectif de ce dernier chapitre était d'appliquer les différents outils développés tout au long de cette thèse à l'évaluation d'un itinéraire routier. Pour cela, on a utilisé des mesures de déflexion réalisées avec le curviamètre, sur deux sections de chaussées différentes. Chaque

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

section a une longueur d'environ 8 kilomètres et les mesures ont été réalisées dans les deux sens de circulation, ce qui permet de disposer de 4 séries de mesures. Les niveaux de déflexion maximale et de rayon de courbure sont sensiblement identiques pour ces quatre séries de mesures.

Pour chaque série de mesures, un bassin de déflexion moyen a d'abord été défini, puis une structure de référence a été calée sur chaque bassin moyen.

Ensuite, la procédure de correction des mesures du curviamètre a été appliquée à l'ensemble des bassins mesurés sur les deux sections. Pour cela, une procédure de calcul automatique des bassins corrigés, permettant de traiter un grand nombre de mesures, a été développée. Pour les sections étudiées, avec de faibles niveaux de déflexion, on a constaté que la procédure de correction n'affecte pratiquement pas la déflexion maximale en dessous d'une valeur $d_{max} < 10 \text{ mm}/100$ environ. Pour de plus forts niveaux de déflexion, la correction augmente la déflexion maximale, ce qui est cohérent avec les résultats des chapitres précédents, qui montrent que le curviamètre sous-estime la déflexion obtenue sous un essieu de référence à roues jumelées. Une méthode de découpage en zones homogènes a également été testée sur les mesures de déflexion brutes (valeurs de déflexion caractéristique), et les mesures corrigées. On a constaté que la procédure de correction ne modifie pas le découpage en zones homogènes.

Ensuite, des indicateurs optimisés ont été définis pour chacune des sections étudiées. Pour la première section, à structure bitumineuse, on a défini deux indicateurs : I_{NMB} caractérisant le module de l'assise bitumineuse et I_{NSOL} , caractérisant le module du sol. Pour la deuxième section, à structure mixte, on a choisi l'indicateur I_{NINT} , caractérisant l'état de l'interface GC/BBSG, et l'indicateur I_{NSOL} , caractérisant le module du sol. Ces indicateurs optimisés ont d'abord été calculés sur les bassins utilisés pour déterminer les structures de référence. Une étude de sensibilité des indicateurs à la variation des modules des autres couches de la chaussée, et à la variation de l'état des interfaces a été réalisée. Elle a montré que les indicateurs choisis étaient très peu sensibles aux variations de ces autres grandeurs, et donc bien adaptés à la détection des défauts choisis

Ensuite, les indicateurs ont été calculés sur plusieurs échantillons de bassins de déflexion, représentatifs de différents niveaux de déflexion, puis sur l'ensemble des deux itinéraires. Des tendances ont pu être dégagées :

- Pour la section bitumineuse, on a constaté que les valeurs élevées de déflexion étaient fortement liées à une baisse de l'indicateur I_{NMB} , traduisant une baisse des modules des couches bitumineuses. Par contre, l'indicateur I_{NSOL} restait relativement constant le long de l'itinéraire, indiquant un niveau de portance de plateforme assez homogène.
- Pour la section à structure mixte, on a constaté que les valeurs élevées de déflexion étaient associées à des valeurs élevées de l'indicateur I_{NINT} , traduisant un fort endommagement de l'interface GC/BBSG. Par contre, comme pour la section bitumineuse, l'indicateur I_{NSOL} présentait des variations assez faibles, indiquant un sol relativement homogène.

Chapitre V : Application des procédures de correction et de détection de défauts à l'échelle d'un itinéraire

Ces résultats sont encourageants, et montrent que si on a une connaissance suffisante de la structure de chaussée étudiée, les indicateurs optimisés peuvent être utilisés à l'échelle d'un tronçon routier, pour analyser les mesures de déflexion, et identifier les couches ou les interfaces endommagées, et même quantifier leur niveau d'endommagement.

Des calculs inverses ont finalement été réalisés sur quelques bassins de déflexion, présentant des niveaux de déflexion maximale différents, ou des valeurs d'indicateurs différentes. Ces calculs ont montré que les valeurs des indicateurs I_{NMB} , I_{NINT} et I_{NSOL} étaient cohérentes avec les modules rétro-calculés, déterminés à partir des bassins corrigés. Cette cohérence a été vérifiée à la fois pour des bassins donnant des niveaux de déflexion identiques, mais des valeurs d'indicateurs différentes, et pour des bassins donnant des niveaux de déflexion sensiblement différents, mais des valeurs d'indicateurs très voisines.

En conclusion, les indicateurs optimisés offrent de nouvelles possibilités d'exploitation des mesures du curviamètre, pour mieux évaluer l'état structurel des chaussées. Dans les études menées ici, ils ont été évalués sur des sections de chaussées avec des niveaux de déflexion faibles (de l'ordre de 10 mm/100). Il serait intéressant de compléter ces évaluations sur des sections de chaussées dont le niveau de déflexion maximale est plus important, et en réalisant des investigations complémentaires (carottage, mesures FWD,...) pour confirmer les prévisions de dégradations données par les indicateurs.

Conclusion générale

Le travail de thèse s'inscrit dans un contexte général de gestion de patrimoine routier et de préservation des chaussées. La mesure de déflexion constitue l'une des méthodes de base pour évaluer les caractéristiques mécaniques des chaussées et leur l'état structural. La déflexion peut être mesurée à l'aide d'appareils d'auscultation fixes, comme le FWD, ou mobiles comme le curviamètre ou les déflectographes, permettant de réaliser des mesures quasi-continues. Aujourd'hui, l'exploitation des mesures du curviamètre ou des déflectographes se limite généralement à calculer les valeurs de déflexion maximale et de rayon de courbure. Pourtant, ces appareils permettent de mesurer les bassins de déflexion complets, et donc d'accéder à des informations plus détaillées sur les caractéristiques mécaniques des chaussées. Dans cette thèse, nous avons cherché à améliorer l'interprétation des mesures de ces appareils, en prenant en compte l'ensemble du bassin de déflexion mesuré.

Pour cela, nous avons d'abord étudié en détail le fonctionnement du curviamètre et des déflectographes, ce qui a permis de mettre en évidence que le traitement des mesures de ces appareils introduit des biais de mesure, qui conduisent à sous-estimer la déflexion réelle, et à modifier la forme du bassin de déflexion. Le premier biais est lié à l'hypothèse que la mesure est réalisée sous un essieu isolé, alors qu'en réalité, l'essieu avant du camion de mesure influence la valeur de la déflexion. Le second biais est lié à la longueur limitée sur laquelle le bassin de déflexion est mesuré. Avec le curviamètre, le bassin est mesuré jusqu'à une distance de 3 m de la charge, et on fait l'hypothèse que la que la déflexion, et la pente du bassin de déflexion sont nulles à 3 m de la charge, ce qui est loin d'être vérifié, notamment sur des chaussées rigides, où le bassin de déflexion est bien plus étendu. Pour le déflectographe, la longueur de mesure correspond à la longueur de la poutre de l'appareil, qui est encore plus réduite (de l'ordre de 1.5 m, suivant la version) ; de plus, les points d'appui de la poutre de mesures sont supposés fixes pendant le déplacement de l'appareil, ce qui n'est pas vérifié, puisque ces points se situent dans la zone d'influence des charges.

Après avoir mis en évidence les biais de mesure des déflectographes et du curviamètre, des solutions ont été recherchées pour essayer de les minimiser. Cela a conduit à développer une procédure originale de correction des mesures de ces appareils. Dans le cas des déflectographes, on s'est limité au déflectographe de dernière génération, le déflectographe Flash, qui est celui qui présente la meilleure précision de mesure.

La procédure de correction repose sur l'utilisation d'un modèle simple décrivant le bassin de déflexion, le modèle de Jouve et Martinez. Ce modèle comporte trois paramètres : la déflexion maximale d , la position du point d'inflexion du bassin de déflexion λ et un facteur de forme du bassin de déflexion n . La procédure de correction est indépendante des caractéristiques de la chaussée. Par superposition de charges et en appliquant le principe de mesure des appareils, une simulation du bassin de déflexion mesuré par les appareils est obtenue. Une procédure de minimisation de l'écart entre le bassin simulé et le bassin mesuré permet de caler les paramètres du modèle. Le modèle calé est ensuite utilisé pour simuler la

Conclusion générale

réponse de la chaussée sous le chargement d'un jumelage standard, qui représente la mesure corrigée.

La procédure de correction a été testée, d'abord de manière théorique, puis sur des mesures in situ, sur plusieurs types de chaussées. Elle a montré tout son intérêt sur chaussées bitumineuses et souples, pour les deux appareils. On a montré que les bassins corrigés sont plus proches des bassins de référence sous jumelage standard, par leur forme mais également par leur niveau de déflexion maximale. Les bassins de déflexion corrigés peuvent également être utilisés pour estimer les modules des couches de chaussées, par une procédure de calcul inverse, alors que les mesures brutes conduisent à des valeurs de modules peu réalistes.

L'approche basée sur le modèle de Jouve et Martinez permet de recalculer un bassin de déflexion correspondant à d'autres conditions de chargement. On peut ainsi harmoniser les mesures de déflexion d'appareils différents en référent à une charge type. Ainsi, les bassins corrigés sous jumelage standard peuvent être utilisés pour le calcul inverse des modules, et ceux sous une charge type FWD permettent de calculer les différents indicateurs, développés pour cet appareil.

Dans la suite du travail, on s'est intéressé à la sensibilité des mesures du curviamètre et du déflectographe Flash à la présence de différents types de défauts dans les structures de chaussées (modules faibles, interfaces décollées) dans le but de définir des indicateurs, permettant d'identifier ces défauts. Pour cela, une procédure de calcul par éléments finis, en 3D, de la réponse de la chaussée sous le chargement du curviamètre ou du déflectographe, a été développée. Ces calculs ont ensuite été utilisés pour simuler l'influence de différents défauts, généralisés (présents sur toute la structure) ou localisés, sur les bassins de déflexion mesurés. Différents cas de défauts (décollements, baisses de module) ont été étudiés, pour 3 types de structures de chaussées (souple, bitumineuse épaisse et mixte).

Dans un premier temps, on a étudié l'influence des défauts sur plusieurs indicateurs « classiques », utilisés pour analyser les mesures de déflexion, issus de la bibliographie : la déflexion maximale, le rayon de courbure, la pente du bassin de déflexion, ainsi que après correction des mesures, les indicateurs BLI, MLI et LLI, issus d'une charge de type FWD. La sensibilité des indicateurs à un type de défaut donné a été comparée avec les performances métrologiques des appareils. On a montré que parmi les indicateurs classiques c'est la déflexion maximale qui est la plus sensible à une variation de modules des couches. L'indicateur LLI est également sensible aux variations de module de la plate-forme. En ce qui concerne les décollements d'interfaces, c'est le rayon de courbure qui s'avère l'indicateur le plus sensible, et également dans une moindre mesure l'indicateur BLI. L'étude a également montré que si un endommagement généralisé (tout le long de l'itinéraire) peut généralement être détecté, la détection de défauts localisés est beaucoup plus difficile, et nécessite également que la mesure soit réalisée à l'aplomb du défaut.

En vue d'améliorer la détection des défauts, une méthode de construction d'indicateurs optimisés, sensibles à un type de défaut donné, a été développée. La méthode

Conclusion générale

repose sur la construction de fonctions de pondération du bassin de déflexion qui maximise la sensibilité d'une fonction à la présence de défaut. Les indicateurs obtenus sont directement à la variation de module de la couche de chaussée endommagée. Un processus de normalisation de ces indicateurs permet de comparer plus facilement la gravité des différents défauts rencontrés.

Ces indicateurs ont été évalués de façon théorique, sur trois structures de chaussées, et pour plusieurs types de défauts (variations de module, décollement d'interface, généralisés ou ponctuels). On a mis en évidence, dans tous les cas, une bonne corrélation entre les valeurs prises par l'indicateur, et les valeurs de module des couches, ou de rigidité des interfaces. Pour les défauts d'interface localisés, les mesures des appareils doivent comme avec les indicateurs classiques se situer à proximité du centre du défaut, pour permettre sa détection. Enfin, les nouveaux indicateurs optimisés ont été comparés avec les indicateurs classiques, et on a montré que les nouveaux indicateurs présentent des variations relatives nettement plus grandes en présence d'un défaut, et sont donc nettement plus sensibles. De plus, la sensibilité de ces indicateurs à un seul type de défaut constitue une originalité qui permet d'identifier la nature et la localisation du défaut. Ils fournissent ainsi une indication beaucoup plus précise sur la position du défaut dans la structure que les indicateurs classiques

Les méthodes de correction du bassin de déflexion, et de détection des défauts ont d'abord été évaluées sur des données de mesure du curviamètre réalisées sur plusieurs sites expérimentaux. Pour chaque site, la structure de référence a d'abord été établie. La première évaluation a porté sur des mesures de répétabilité réalisées sur trois sections expérimentales dont les niveaux de déflexions maximales étaient relativement différents (entre 10 mm/100 et 90 mm/100). Après avoir étudié la dispersion des mesures, la procédure de correction a été appliquée à l'ensemble des bassins mesurés. L'efficacité de la procédure de correction a été confirmée sur ces différents sites : la forme des bassins et le niveau maximum de déflexion ont été largement améliorés, par rapport aux bassins de déflexion de référence. Des calculs inverses ont aussi été réalisés, et ont permis d'obtenir des valeurs de modules proches des valeurs de référence.

Les indicateurs optimisés ont également été calculés sur ces 3 sections expérimentales. Une méthode permettant de s'assurer de la représentativité des indicateurs calculés a été proposée. Un indice I_{simM_c} , qui représente l'écart entre le bassin de déflexion moyen de la section, et le bassin obtenu lorsque le module d'une de ses couches est doublé ou divisé par deux, a été défini. Il permet de choisir les couches auxquelles le bassin de déflexion est le plus sensible. On considérera les couches dont l'indice est le plus élevé. De plus, cet indice, relatif à la variation des modules d'une couche doit être supérieur à l'indice $I_{moy_{bassin}}$ représentant la dispersion des mesures d'un appareil. Dans nos études, ce dernier indice a été estimé en calculant l'écart maximum entre le bassin moyen et les bassins de déflexion mesurés lors des essais de répétabilité. Il en résulte que l'indice I_{simM_c} doit donc être au moins égal à 2 % pour s'affranchir de la dispersion des mesures et donc permette une étude de l'endommagement associé.

Conclusion générale

Avec les mesures de répétabilité réalisées sur les 3 sections expérimentales, on a montré que les indicateurs relatifs aux modules des couches peuvent varier de façon significative avec la dispersion des mesures, entre -0.25 et 0.5 environ pour les indicateurs normalisés, pour les mesures du curviamètre. Cet écart pourrait être réduit avec l'utilisation d'appareils plus répétables, ou en calculant les indicateurs sur des bassins moyens, déterminés sur une zone homogène.

Par la suite, la méthode de détection de défaut reposant sur la construction d'indicateurs spécifiques a également été évaluée sur une section du manège de fatigue de l'IFSTTAR de Nantes. Deux types de défauts d'interface ont volontairement été introduits dans cette section de chaussée (interface sans couche d'accrochage, interposition d'une couche de sable ou de géotextile). Ces données ont permis de vérifier la sensibilité des indicateurs relatifs à un décollement d'interface sur des défauts de nature et de dimensions connues. Elles ont montré que les indicateurs permettaient de localiser parfaitement les défauts, et également de quantifier leur gravité

Enfin, les méthodes proposées ont été appliquées à l'analyse des bassins de déflexion recueillies à l'échelle d'un itinéraire de plusieurs kilomètres de long. Des données de mesures au curviamètre, réalisées sur 2 tronçons routiers, ont été utilisées. Une structure de référence a été définie pour chaque tronçon à partir des informations disponibles en se basant sur le bassin moyen recueilli le long du tronçon. Pour appliquer les méthodes à l'échelle de l'itinéraire, des procédures automatisées de correction des mesures et de calcul des indicateurs sur un grand nombre de mesures ont été développées.

L'application de la méthode de correction montre que pour des faibles niveaux de mesure ($d_{max} \leq 10$ mm/100), le niveau de déflexion maximale après correction varie peu mais la forme du bassin est corrigée. En revanche, pour des niveaux de déflexion plus importants, la déflexion maximale corrigée est supérieure à la déflexion mesurée.

Ensuite les indicateurs optimisés ont été construits sur la structure de référence. Au voisinage de cette structure de référence, la dispersion des bassins conduit à une sensibilité des indicateurs identiques à celle de l'étude précédente sur la dispersion des mesures. On a montré que ces indicateurs permettaient de mieux interpréter les variations de déflexion à l'échelle d'un itinéraire, en localisant les défauts (décollement d'une couche par exemple). Par la suite, la procédure de calcul inverse confirme la présence de défauts détectés pour les indicateurs optimisés. Une dernière comparaison avec les indicateurs classiques montre que les indicateurs optimisés sont plus sensibles à la présence de défauts.

Il aurait été intéressant d'effectuer des carottages au niveau des différentes zones endommagées, mais aussi saines pour vérifier si l'endommagement identifié par les indicateurs correspond bien à celui en place, notamment pour les zones comprenant des niveaux de déflexion élevée.

Perspectives

Ce travail a porté sur l'amélioration de l'interprétation des mesures de déflexion du curviamètre et du déflectographe Flash. Il a permis de proposer de nouvelles pistes d'interprétation et d'utilisation plus approfondies de ces mesures et ouvre plusieurs perspectives pour la poursuite de ces recherches :

Tout d'abord, la procédure de correction des mesures mise en place pour ces deux appareils d'auscultation est généralement satisfaisante puisqu'elle permet largement de réduire l'écart entre la déflexion de référence sous jumelage standard et celle corrigée. De plus, la forme du bassin corrigée est beaucoup plus proche que celle du bassin de référence. Cette procédure de correction n'est pas dépendante de la structure et les bassins corrigés sont indépendants des appareils de mesure. Il serait alors envisageable d'implémenter ces procédures directement dans les systèmes d'acquisition des mesures de déflexion. En plus, de la mesure brute, les appareils pourraient fournir les mesures corrigées, au choix sous jumelage standard ou roue simple ou tout simplement les 3 paramètres de Jouve & Martinez. L'harmonisation des mesures liées à cette procédure permettra une comparaison plus facile des mesures d'appareils différents tant pour étudier l'état d'un réseau à un instant donné que pour suivre dans le temps l'état de ce réseau en utilisant différents appareils.

L'application de la procédure de correction pour de très faible niveau de mesure et notamment sur chaussée rigide s'avère peu satisfaisante. L'amélioration de la procédure de correction pour ce type de structure est un sujet de recherche à approfondir.

Concernant les indicateurs optimisés, ceux-ci sont très sensibles à un changement de forme du bassin de déflexion. Leur construction nécessite de connaître la structure de référence. Il serait intéressant d'étudier plus en détails les fonctions de pondération générées pour chaque indicateur. Celles-ci sont directement liées aux valeurs des indicateurs obtenues et donnent davantage de poids à certaines portions du bassin. Une étude pour toute une gamme de structure pourrait peut-être permettre de dégager des tendances générales pour une famille de structures, voire toutes les structures et ainsi définir des fonctions de pondérations applicables sur toute une famille sans connaître réellement la structure de référence.

La dépendance des indicateurs optimisés entre eux est également à approfondir. En effet, bien que les indicateurs soient conçus pour être insensibles aux variations des autres couches, on observe une légère liaison entre les indicateurs. Celle-ci impose donc un ordre d'utilisation des indicateurs. Dans les cas étudiés, un changement de plateforme influence assez significativement un indicateur relatif au module d'une couche bitumineuse alors qu'un changement de module de cette couche bitumineuse n'a aucun effet sur un indicateur relatif à la plateforme. Des études complémentaires sur l'influence de paramètres telles que l'épaisseur des couches ou la présence de fissures sont encore à analyser. D'autre part, la prise en compte des dispersions de mesure ou l'insertion d'une fonction erreur des appareils pourraient

Perspectives

permettre de diminuer largement la zone de non connaissance de l'état de la couche ($[-0.25, 0.5]$ pour le curviamètre) et ainsi d'être plus précis quant à l'état résiduel de la couche étudiée.

De même que pour la procédure de correction, les indicateurs optimisés à grand rendement pourraient être directement insérés dans les systèmes de mesure. Leur mise en place requiert tout de même d'appuyer leur validation et également la connaissance d'informations sur les caractéristiques initiales des couches de chaussée à étudier. La connaissance de ces caractéristiques est directement liée à l'obtention d'indicateurs satisfaisants. Il serait intéressant d'avoir accès à une base de données regroupant l'intégralité des caractéristiques de chaussées (épaisseurs, matériaux, modules des couches).

Par la suite, on pourrait imaginer l'utilisation des indicateurs optimisés pour la mise en place d'une procédure de calcul inverse incluant la détection et la caractérisation des défauts.

Le déflectographe comme le curviamètre réalise des mesures tous les 5 m. cette densité de mesure est insuffisante pour détecter des défauts locaux de faible longueur. Il faut donc envisager des appareils permettant de densifier les mesures. Pour le curviamètre, on pourrait également envisager d'augmenter le nombre de géophone pour avoir une mesure tous les 0.2 m par exemple qui constitue la distance d'influence d'une fissure ou d'un décollement. On augmenterait ainsi la probabilité de détecter un défaut localisé. Cependant pour cela il faut résoudre le problème de calibration simultanée de 75 géophones avant montage sur l'appareil.

On voit apparaître aujourd'hui des appareils de déflexion s'intégrant dans le trafic et effectuant une mesure quasi continue comme le TSD ou le RAPTOR. L'ensemble des travaux de cette thèse pourrait être transposé à ce type d'appareil pour exploiter au mieux leur mesure. La méthode de correction devra prendre en compte l'ensemble des principes de mesure de ces appareils y compris corriger les aspects dynamiques. La construction d'indicateurs optimisés devra elle aussi intégrer le principe de mesure des appareils y compris le calcul de la moyenne du bassin de déflexion sur une distance prédéterminée pour estimer la sensibilité à des endommagements locaux.

Annexes

| | | |
|----------|---|------------|
| A | Annexe A : Tableaux des indicateurs usuels de la mesure de déflexion | 274 |
| B | Annexe B : Détermination de l'abaque comportant toutes les combinaisons possibles de d, λ et n..... | 275 |
| C | Annexe C : Détermination de l'indice I, choix de la meilleure combinaison d, λ et n pour le(s) bassin(s) mesuré(s) et réintroduction des paramètres d, λ et n pour déterminer le bassin de déflexion corrigé sous jumelage standard | 276 |
| D | Annexe D : Etude de sensibilité des indicateurs classiques à la présence de défauts | 277 |
| D.1 | Sensibilité des indicateurs à un endommagement généralisé de la chaussée | 277 |
| D.1.1 | Rappel des valeurs de référence des indicateurs classiques de la mesure de déflexion | 277 |
| D.1.2 | Sensibilité des indicateurs à un changement de module des matériaux bitumineux | 279 |
| D.1.3 | Influence d'un changement de portance de la plateforme | 285 |
| D.1.4 | Sensibilité des indicateurs à un changement d'état d'interface | 289 |
| D.1.5 | Bilan sur la sensibilité des indicateurs de déflexion à un changement généralisé de la structure de chaussée (variation de module ou décollement d'interface) | 293 |
| D.2 | Sensibilité des indicateurs à une variation localisé de modules de couches de la chaussée | 294 |
| D.2.1 | Exploitation de la mesure des appareils..... | 295 |
| D.2.2 | Indicateurs classiques de la mesure de déflexion | 296 |
| D.2.3 | Influence des variations de module des couches sur les indicateurs obtenus à partir des mesures corrigées..... | 298 |
| D.2.4 | Bilan sur la sensibilité des indicateurs de déflexion à un défaut local de la structure de chaussée..... | 299 |

Références bibliographiques

AFNOR, 1991. NF P98 200-1. Dans: *Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 1 : définitions, moyens de mesure, valeurs caractéristiques.*

AFNOR, 1992. NF P98 200-2. Dans: *Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 2 : détermination de la déflexion et du rayon de courbure avec le deflectomètre Benkelman modifié.*

AFNOR, 1993. NF P98 200-3: *Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 3 : détermination de la déflexion avec le deflectographe 02.*

AFNOR, 1993. NF P98 200-4: *Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 4 : détermination de la déflexion avec le deflectographe 03.*

AFNOR, 1993. NF P98 200-5: *Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 5 : détermination de la déflexion avec la deflectographe 04.*

AFNOR, 1997. NF P98 200-7: *Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 7 : détermination de la déflexion et du rayon de courbure avec un curviamètre.*

AFNOR, 2000. *NF EN 13285: Graves non traitées - Spécifications.*

AFNOR, 2006. *NF P 98-170: Chaussées en béton de ciment - Exécution et contrôle.*

AFNOR, 2013. *NF EN 14227: Mélanges traités aux liants hydrauliques.*

AFNOR, 2014. *NF P 98-121: Graves-émulsion.*

AFNOR, 2017. *NF EN 13108 : Mélanges bitumineux, Spécifications des matériaux.*

Alongi, A. V., Cantor, T. R., Kneeter, C. P. & Alongi, J. A., 1982. Concrete Evaluation by Radar Theoretical Analysis. Dans: T. R. Board, éd. *Transportation Research Record 853*. Washington, D.C.: National Research Council, pp. 31-37.

Autret, P., 1969. Utilisation du produit Rd pour l'auscultation des chaussées à couche de base traitées.. *Bulletin de Liaisons du Laboratoire des Ponts et Chaussées n°42*, Décembre, pp. 67-80.

Références bibliographiques

Autret, P., 1972. Evolution du déflectographe Lacroix, pourquoi?. *Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées*, pp11-17(60).

Baaj, H., 2002. *Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés*. Thèse de doctorat.

Balay, J.-M., 2001. CESAR-LCPC: Manuel de formation et mode d'emploi. v3.3. 7ème édition.

Balay, J.-M., 2013. Manuel d'utilisation du logiciel ALIZE; Version 1.5. p. 184.

Baltzer, S. et al., 2010. Continuous bearing capacity profile of 18,000 km Australian road network in 5 months. Dans: *24th ARRB Conference*. Melbourne.

Bertrand, L., Boutonnet, M., Cazeneuve, J. & Chabrol, J., 1998. Catalogue des dégradations de surface des chaussées. *Méthode d'essai LPC n°52*.

Bertrand, L. & Lepert, P., 1997. Relevé des dégradations de surface de chaussée. *Méthode d'essai LPC n°38-2*.

Bertrand, L. et al., 1996. Application d'un radar pulsé monostatique à l'auscultation des chaussées. Dans: *Méthode d'essai LPC n°42*. s.l.:LCPC.

Boussinesq, J., 1885. *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des corps élastiques*. Paris: Chauthier Villars.

Bowders, J. J. J. & Koerner, R. M., 1982. Buried Container Detection Using Ground Penetrating Radar. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 7, pp. 1-17.

Braber, R. & Henia, M. O., 2008. Falling Weight Deflectometer et déflectographe Lacroix: Comparaison, domaine d'application et perspectives. Dans: *Route et trafic n°7-8*.

Brengarth, M. & Roche, J.-P., 1978. Mesure du rayon de courbure des déflexions sur chaussée - Utilisation d'un servo inclinomètre de précision. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Sept/Oct, p. N°97.

Broutin, M., 2010. Assessment of flexible airfield pavements using Heavy Weight Deflectometers. Dans: Paris: Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p. 370.

Burmister, D. M., 1943. The theory of stresses and displacements in layered systems and applications of the design of airport runways. *Proceedings of the highways Research board*, 23, pp. 126-148.

Références bibliographiques

Bush III, A. & Alexander, D., 1985. *Computer program BISDEF*, Vicksburg MS: U.S. Army Corps Engineers WES.

Carvalho, R. et al., 2012. Simplified Techniques for Evaluation and Interpretation of Pavement Deflections for Network-Level Analysis. Dans: *Publication Number: FHWA-HRT-12-023*. Federal Highway Administration.

Centre de Recherche Routière, 2018. DimMet. <http://qc.spw.wallonie.be/fr/certifications/index.html>.

CESAR, 2016. *Progiciel élément finis pour le génie civil*.

Chabot, A., 1997. Analyse des efforts à l'interface entre les couches des matériaux composites à l'aide de modélisations Multiparticulaires des Matériaux Multicouches M4. Thèse : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1997. Dans: *Thèse de doctorat* . Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Chatti, K., 2004. Use of Dynamic Analysis for Interpreting Pavement Response in Falling Weight Deflectometer Testing. *Materials Evaluation*, 62(7)(American Society), pp. 764-774.

Chatti, K. et al., 2017. *Enhanced Analysis of Falling Weight Deflectometer Data for Use With Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design and Analysis and Recommendations for Improvements to Falling Weight Deflectometers*, Washington, D.C.: Federal Highway Administration.

Chatti, K., Ji, Y. & Harichandran, R., 2006. Dynamic Backcalculation of Pavement Layer Parameters Using Frequency and Time Domain Methods. *Proceedings, 10th International Conference on Asphalt Pavements*, Volume Quebec City, Quebec, Canada..

Chatti, K., Ji, Y. & Harichandran, R., 2004. Dynamic Time Domain Backcalculation of Layer Moduli, Damping and Thicknesses in Flexible Pavements.. *Transportation Research Record* , Volume National Research Council, Washington, D.C, pp. 106-116.

Chea, S., 2006. *Contribution à l'auscultation structurelle des chaussées mixtes: détection des défauts d'interface à l'aide de la déflexion*, Rennes: Thèse de doctorat INSA.

Chea, S. & Martinez, J., 2005. Détection des défauts d'interfaces entre couches de chaussées à l'aide de la déflexion de surface.

Chea, S. & Martinez, J., 2008. Using surface deflection for detection of interface damage between pavement layers. *European Asphalt Technology Association*.

Chengchao, G., Fuming, W. & Yanhui, Z., 2016. Assessing pavement interfacial bonding condition. *Construction and Building Materials*, Volume 124, pp. 85-94.

Références bibliographiques

Cho, Y., Koo & H.M., 2003. A behavior analysis of concrete overlay based on the characteristics of asphalt pavements.. *The TRB 82nd Annual Meeting*.

Cong, L., Guo, Z. Y., Fang, J. G. & Yang, Y. S., 2006. Analysis and evaluation of transverse-cracked semi-rigid base asphalt pavements using FWD data. *In Proceedings of GeoShanghai international conference*, Reston(VA: ASCE), pp. 1-6.

COST 336, 1999. Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation. *Final report of the 1996 COST Action 336*.

Dassault Système, 2011. *Abaqus 6.11 Manuel d'utilisation*.

De Boissoudy, A., Gramsammer, J., Keryell, P. & Paillard, M., 1984. Appareils d'auscultation. Le déflectographe 04. *Bulletin de liaison Laboratoires des Ponts et Chaussées n°129*, janvier-février.

Desai, C. S., Zaman, M. M., Lightner, J. G. & Siriwardane, H. J., 1984. Thin-layer Element for Interfaces and Joints. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Volume 8, pp. 19-43.

Di Benedetto, H. & Corte, J.-F., 2005. *Matériaux routiers bitumineux 2 : Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*. Collection traité Mécanique et Ingénierie des matériaux éd. Hermès Sciences.

Diamanti, N. & Redman, D., 2012. Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks. *Journal of Applied Geophysics*, Volume 81, pp. 106-116.

Du Mesnil-Adelée, M. & Peybernard, J., 1984. Traitement automatique des résultats de mesures en continu. *Bulletin de Liaison LCPC*, pp. 76-81.

Duong, N. S., 2017. *Instrumentation de chaussées: la route intelligente qui s'auto-détecte ?*. Thèse de doctorat éd. Ecole Centrale de Nantes.

Dynatest, 2018. DYNATEST RAPTOR® (RAPID PAVEMENT TESTER).

Elseifi, M., Abdel-Khalek, A. M. & Dasari, K., 2012. *Implementation of Rolling Wheel Deflectometer (RWD) in PMS*. Louisiana Transportation Research Center.

Elseifi, M., Al-Qadi, I. & Yoo, P., 2006. Viscoelastic modeling and field validation of flexible pavements. *Journal of Engineering Mechanics*, 1322(2), pp. 172-178.

Fernandes, F. M. & Pais, J. C., 2017. Laboratory observation of cracks in road pavements with GPR. *Construction and Building Materials*, Volume 154, pp. 1130-1138.

Références bibliographiques

- Fernando, E., Maser, K. R. & Dietrich, B., 1994. Implementation of ground penetrating radar for network-level pavement evaluation in Florida, GPR 94. Dans: Kitchner, éd. *Proc. of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*. Ontario CA: Vol. I of 3 , pp. 351-365.
- Ferne, B., Langdale, P., Round, N. & Fairclough, R., 2009. *Development of the UK Highways Agency traffic*. London, Taylor & Francis, pp. 409-18.
- Flora, W. F., Ong, G. P. & Sinha, K., 2010. *Development of a Structural Index as an Integral Part of the Overall Pavement Quality in the INDOT PMS: JOINT TRANSPORTATION RESEARCH PROGRAM*.
- Grégoire, C. & Van Geem, C., 2013. Use of radar in Road Investigation BRRC Experience. Dans: *Conference: Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. BRRC.
- Grenier, S. & K. J. M., 2002. Evaluation of asphalt concrete pavement discontinuities on falling weight deflectometer measurements. *In Proceedings of the 6th international conference on the bearing capacity of roads and airfields*, Volume Berkshire: Transport Research Laboratory, p. 617–627 .
- Grenier, S., 2007. *Analyse dynamique du déflectomètre à masse tombante*, Université de LAVAL: Thèse de doctorat.
- Harichandran, R. S., Mahmood, T., Raab, A. & Baladi, G., 1993. Modified Newton Algorithm for Backcalculation of Pavement Layer Properties. *Transportation Research Record* , 1384(Washington D.C.), pp. 15-22.
- Hogg, A., 1938. Equilibrium of a thin plate symmetrically loaded, resting on an elastic foundation on infinite depth. *The London, Edimburg and dublin Magazine and Journal of Sciences..*
- Hogg, A., 1944. Equilibrium of a Thin Slab on an Elastic Foundation of Finite Depth. *Phil. Mag*, 35(243), pp. 265-276.
- Horak, E., 2008. Benchmarking the Structural Condition of Flexible Pavements with Deflection Bowl Parameters. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 50(2), pp. 2-9.
- Horak, E. & Emery, S., 2009. *Evaluation of airport pavements with FWD deflection bowl parameter*. Amsterdam.
- Hornych, P., 2008. Etude expérimentale et modélisation du comportement des matériaux de chaussées non traités. *Thèse d'habilitation à diriger les recherches*, p. Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur de l'Université Bordeaux 1.

Références bibliographiques

Hornych, P., Chazallon, C., Allou, F. & El Abd, E., 2007. Prediction of permanent deformations of unbound granular materials in low traffic pavements. *Roads Materials and Pavement Design*, 8(4), pp. 643-666.

Huet, C., 1965. *Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés*. Université de Paris.

Hu, S., Zhou, F. & Walubita, L., 2009. Development of a Viscoelastic Finite Element Tool for Asphalt Pavement Low Temperature Cracking Analysis. *Road Materials and Pavement Design*, Volume 10, pp. 833-858.

Indian Roads Congress, 1997. Guidelines for Strengthening of Flexible Road Pavements Using Benkelman Beam Deflection. Dans: New Delhi.

Jendia, S., 1995. Bewertung der Tragfähigkeit von bituminösen Straßenbefestigungen. Dans: i. G. ISSN 0344-970-X, éd. Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH), p. Heft 45.

Jeuffroy, G., 1955. Considération théorique sur le calcul des chaussées en béton. *Revue Générale des Routes*, Volume 264.

Kang, Y., 1998. Multifrequency Back-Calculation of Pavement-Layer Moduli. *Journal of Transportation Engineering*, 124(1), pp. 73-81.

Keryell, P. & Benoist, J., 1972. Le Défectomètre à Boulet. Dans: *Bulletin de Liaison Du Laboratoire des Ponts et Chaussées n°57*, pp. 33-46.

Keymanesh, M. R., 2001. Contribution à l'étude de la déflexion des structures de chaussées. Dans: *Thèse de doctorat*. p. 200.

Krarup, J., Rasmussen, S., Aagaard, L. & Hjorth, P., 2006. *Output From The Greenwood Traffic Speed Deflectometer*.

Langdale, P., Round, N., Ferne, B. & Fairclo, R., 2009. *Development of the UK highways agency traffic speed deflectometer*.

LCPC & SETRA, 1994. *Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Guide technique*. Paris.

LCPC & SETRA, 1998. Catalogue des structures types de chaussées neuves. Dans: *Réseau Routier National*. Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement.

Lee, S. W., Mahoney, J. P. & Jackson, N. C., 1988. Verification of backcalculation of pavement moduli. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Issue 1196, pp. 85-95.

Références bibliographiques

Lepert, P., 1996. *Exécution et exploitation des carottages de chaussées, Méthode d'essai LCP n°43*, LCPC Editor.

Lepert, P., Aussedat, G. & Simonin, J.-M., 1997. Evaluation du curviamètre. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mai-juin, pp. 3-11.

Lepert, P., Aussedat, G. & Simonin, J.-M., 1997. Evaluation du curviamètre MT 15. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mai-juin, pp. 3-11.

Lepert, P. et al., 2001. Mesure et interprétation du profil en travers. Dans: *Méthode d'essai n°49*. LCPC.

Lepert, P., Simonin, J.-M. & Kobish, R., 1997. Le FWD : performances, utilisations en France et en Europe. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mai-juin, pp. 19-26.

Lièvre, D., 2015. *Logiciel DECZONH*.

Li, Y., 1999. *Asphalt pavement fatigue cracking modeling*. Etat de Louisiane : Thèse de doctorat.

Loken, M., 2007. Use of Ground Penetrating Radar to Evaluate Minnesota Roads. Dans: Maplewood: Minnesota Department of Transportation.

Lytton, R., Roberts, F. & Stoffels, S., 1986. *Determination of Asphalt Concrete Pavement Structural Properties by Non Destructive Testing*, Texas Transportation Institute, College Station: Final Report .

Lytton, R. et al., 1993. Development and validation of Performance Prediction Models and Specifications for ASPHALT Binders and Paving Mixes. *Report SHRP-A-357*, Strategic Highway Research Program(National Research Council, Washington, D.C.).

Magnuson, A. & Lytton, R. B. R., 1991. Comparison of Computer Predictions and Field Data for Dynamic Analysis of Falling-Weight Deflectometer Data. *Transportation Research Record 1293*, Volume Transportation Research Board, Washington, DC..

Martinez, J. & Jouve, P., 1990. *Rational determination of pavement deflection from Benkelman beam measurements*. Trondheim, 3rd Int. Conf. on the Bearing Capacity of Roads and Airfields.

Martinez, J. & Jouve, P., 1993. Rational determination of pavements deflection from Lacroix Deflectograph measurements. Dans: A. CORREIA, éd. *Proceedings of the European Symposium Euroflex 1993*. Lisbon.

Références bibliographiques

Maser, K. & Scullion, T., 1992. Influence of Asphalt Layering and Surface Treatments on Asphalt Base Layer Thickness Computations Using Radar. Dans: *Report No. TX-92-1923-1* Texas Transportation Institute.

Molenaar, A., 1983. Structural performance and design of flexible road constructions and asphalt concrete overlays. Dans: *Thèse de doctorat*. Delft University of Technology.

Monismith, C., Secor, G. & Secor, K., 1980. Reflection cracking, analyse, laboratory studies and design consideration. Dans: *Proceeding A.A.P.T.* pp. 268-313.

Nasser, H., 2016. Méthode de résolution du M4-5n par éléments finis mixtes pour l'analyse des chaussées avec discontinuités. Dans: *Thèse de doctorat*. Nantes: Ecole Centrale de Nantes.

Nesnas, K. & Nunn, M., 2004. A model for top-down reflection cracking in composite pavements. Dans: *Cracking in Pavements*. Liège: 5th International RILEM Conference.

NORME ISO 5725-1, 1994. 1211994. Dans: *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure -- Partie 1,2,3,4 et 6*, p. 18.

Nougier, J., 1989. *Méthodes de calcul numérique*. Editions Masson éd.

Ong, C., Newcomb, D. & Siddharthan, R., 1990. Comparison of Dynamic and Static Backcalculation Moduli for Three-Layer Pavements. Transportation Research Record 1293.. TRB, National Research Council(Washington, D.C;), pp. 86-92.

Oudin, H., 2011. *Méthodes des éléments finis*. Nantes: Ecole Centrale de Nantes.

Paquet, J., 1977. Un nouvel appareil d'auscultation des chaussées: Le Curviamètre. *Revue générale des Routes et des aérodromes*, Avril, pp. 79-107.

Paquet, J., 1977. Un nouvel appareil d'auscultation des chaussées: Le Curviamètre. *Revue générale des Routes et des aérodromes*, Avril, pp. 79-107.

Qiu, X., Yang, Q. & Wang, F., 2014. Diagnostic analysis of dynamic deflection for cracked asphalt pavements under FWD impulsive loading. *Journal of Vibroengineering*, Volume 16 (5), pp. 2426-2437.

Quijano Murillas, A., 2010. *Application de méthodes et d'outils de mécanique-empirique pour la conception et la réhabilitation des chaussées*, Québec: Université de LAVAL.

Rigo, J. et al., 1993. Evaluation of crack propagation in an overlay subjected to trafic and thermal effects. Dans: *The second International Rilem Conference*, pp. 146-158.

Références bibliographiques

Rmeili, E. & Scullion, T., 1997. Detecting Stripping in Asphalt Concrete Layers Using Ground Penetrating Radar . Dans: *Transportation Board Paper 97-0508*, p. 25.

Robert, B., Delaval, E. & Martin, J.-M., 2009. Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques. Dans: *Méthode d'essai LCP n°46*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Roddis, W. M., Master, K. R. & Gisi, A. J., 1992. Radar Pavement Thickness Evaluation for Varying Base Conditions. Dans: T. R. Board, éd. *Transportation Research Record 1355*. Washington, D.C.: National Research Council, pp. 90-98.

Romanoshi, S. & Li, Y., 2002. Experimental characterization and modeling of fatigue and crack propagation in asphalt concrete layers. Dans: Lisbonne: 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads Railways and airfields.

Saarenketo, T. & Scullion, T., 1994. Ground penetrating radar applications on roads and highways. Dans: C. Station, éd. *Research Report No. TX-95/1923-2F*. Texas Transportation Institute.

Saarenketo, T. & Scullion, T., 1996. Laboratory and GPR tests to evaluate electrical and mechanical properties of Texas and finnish base course aggregates. Dans: *Proceedings of the Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar*. Sendai, Japon, pp. 477-482.

Sadoun, A., Broutin, M. & Simonin, J.-M., 2016. Assessment of HWD ability to detect debonding of pavement layer interfaces. *8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements*, Volume RILEM Bookseries 3, pp. 763-769.

Salasca, S., 1998. *Phénomènes de contact dans les chaussées en béton: Modélisation théorique et validation expérimentale*. Ecole centrale de Nantes éd. Nantes: Thèse de doctorat.

Sayegh, G., 1966. *Contribution à l'étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux* Université de Paris.

Scullion, T., 1998. Incorporating a Structural Strength Index into the Texas Pavement Evaluation System. Dans: *Report No. FHWA/TX-88/409-3F*. Washington, DC.: Federal Highway Administration.

Sedran, T. & De Larrard, B., 2000. *BétonlabPro 2 - Logiciel de formulation de bétons - Version exécutable sous Windows. logiciel sur CD ROM avec aide en ligne*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

SETRA, 2009. Chapitre 2: Recueil des données d'auscultations. Dans: Collections "Les outils", éd. *Les renforcements de chaussées - Diagnostic*. Guide Technique.

Références bibliographiques

SETRA, 2009. Les renforcements de chaussées. Dans: Collections "Les outils", éd. *Diagnostic et conception*. s.l.:Guide technique.

Shoukry, S., William, G. & Riad, M., 2004. Effect of temperature variations on mid-slab cracking in jointed concrete pavements. Dans: *Cracking in pavement*. Liège: 5th International RILEM Conference.

Simonin, J.-M., 1997. Etudes routières - Déformabilité de surface des chaussées - Execution. Dans: *Méthodes d'essai LPC n°39*. LCPC.

Simonin, J.-M., Geffard, J.-L. & Hornych, P., 2015. *Performance of Deflection Measurement Equipment and Data*. Berlin, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE).

Simonin, J.-M., Hornych, P., Le Boursicaud, V. & Villain, G., 2016. Diagnostic structurel, Nouvelles méthodes non destructives. *Révue générale des routes et de l'aménagement*, Février, pp. 26-29.

Simonin, J.-M., Kerzhero, J.-P., Hornych, P. & Gouy, T., 2013. *Comparison of NDT methods to detect debonded interfaces*. Trondheim, Norway.

Simonin, J.-M., Kerzhero, J.-P., Hornych, P. & Gouy, T., 2013. *Comparison of NDT methods to detect debonded interfaces*. Trondheim, Norway.

Simonin, J.-M. & Riouall, A., 1997. Evaluation des déflectographes. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, mai-juin, pp. 39-47.

Steele, D. et al., 2009. *Development of a High Speed Rolling Wheel Deflectometer*. Washington D.C., 88th Transportation Research Board Annual Meeting.

Tarn, W. & Brown, S., 1989. Back-Analyzed Elastic Stiffnesses : Comparison Between Different Evaluation Procedures. *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli.. ASTM STP 1026*, Édition A. J. Bush III et G. Y. Baladi(American Socie).

Thiaw, S., 2006. *Dimensionnement mécanistique-empirique des structures de chaussées: Application du tronçon routier Séo-Diourbel*, Dakar: Ecole Supérieure Polytechnique .

Tran, Q., Chabot, A., Ehlacher, A. & Tamagny, P., 2003 . Modèle simplifié pour le calcul de chaussées . Dans: *16eme Congrès Français de Mécanique*.

Tran, Q., Chabot, A., Ehlacher, A. & Tamagny, P., 2004. A simplified modelling for cracking in pavements. Dans: *5th International Conference of Cracking in pavements*.

Tran, Q. D., 2004. Modèle simplifié pour les chaussées fissurées. Dans: *Thèse de doctorat*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Références bibliographiques

Triki, R., 1990. *Evaluation structurelle des chaussées à partir de leurs bassins de déflexion relevés au déflectographe ou au déflectomètre*, INSA Rennes.

Turkiyyah, G., 2004. Feasibility of Backcalculation Procedures Based on Dynamic FWD Response Data. WA-RD 586.1.. Volume Washington State Department of Transportation, Olympia, WA.

Uddin, W. Z. D. & F. F., 1994. Finite Element Simulation of pavement discontinuities and dynamic load response. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Issue 1448, pp. 100-106.

Ullidtz, P., 1987. Pavement Analysis. *ELSEVIER*.

Uzan, J., 1994. Dynamic Linear Backcalculation of Pavement Material Parameters. *Journal of Transportation Engineering*, 120(1)(American Society of Civil), pp. 109-125.

Van Buylaere, A., 2009. *Note d'information relative aux coefficients d'étalonnage dans PEGASE*.

Van Buylaere, A., 2016. *Curviamètre, Mesure des caractéristiques structurelles des chaussées*, BRRC.

Van Buylaere, A., 2017. *FWD; Mesure des caractéristiques structurelles des chaussées*, BRRC.

Van Cauwelaert, F., 1995. *Stresses and displacement in multi-layered orthotropic systems - Theoretical background to the stress/strain calculation program used within the NOAH software*.

Van Geem, C., 2009. Note sur l'algorithme souvent utilisée en Belgique pour le calcul des zones homogènes à partir de mesures de déflexion maximale.. Dans: *Note interne CRR*. Wavre.

Van Geem, C., 2017. Influences of measurement conditions on structural indicators obtained from FWD data. *BCRRA*, pp. 573-578.

Van Geem, C., 2017. Reproducibility of decisions for rehabilitation of existing roads based on deflection measurements with curviameter or FWD. *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, pp. 615-622.

Van Geem, C., Nigro, P. & Berlemont, B., 2014. The Use of Deflection Measurements in Pavement Management of the Primary Road Network of Wallonia, Belgium.

Références bibliographiques

Van Geem, C. & Perez, S., 2015. Structural Evaluation of a Dual Two-Lane by Curviameter and FWD Data, Back-Calculation and Dimensioning for Rehabilitation. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, pp. 723-732.

Vanelstraete, A., Leonard, D. & Veys, J., 2000. Structural design of road with steel reinforcing nettings. Dans: *4th International RILEM Conference*, pp. 57-67.

Vialletel, H. & Simonin, J.-M., 1997. Le déflectographe Flash. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, mai-juin, pp. 49-52.

Westergaard, H., 1926. Stresses in Concrete pavements Pavements computed by theoretical analysis. Dans: *Public Roads, Vol.7*.

Wurckler, S., 2010. *Développement de techniques d'auscultation de chaussées*, INSA de Rennes.

Xie, Z., Shen, J., Guo, Z. & Cong, L., 2015. Effect of Distresses on Deflection Basins and Backcalculation Modulus of Asphalt Pavement with Cement-Treated Base. *International Journal of Pavement Research and Technology*, pp. 283-288.

Yoo, P., 2006. Flexible pavement responses to different loading amplitudes considering layer interface conditions and lateral shear forces.. *International Journal of Pavement Engineering*, 7(1), pp. 73-86.

Yoo, P. & Al-Qadi, I., 2007. Effect of transient dynamic loading on flexible pavements.. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1990, pp. 129-140.

Yusuf, A. M., 2007. Evaluation of Interlayer Bonding in HMA Pavements. *Wisconsin Department of Transportation*.

Annexe A : Tableaux des indicateurs usuels de la mesure de déflexion

| Indice | Définition | Description |
|---|--|---|
| D_0 : Déflexion maximale | $D_0 = D_{max}$ (D_0 = Déflexion au centre de la plaque du FWD) | Donne une indication sur toutes les couches de chaussées. |
| RoC: Rayon de courbure | $RoC = \frac{L^2}{(2 * D_0 * (1 - D_{200}/D_0))}$ avec L=200 m dans le cas du FWD | Donne une indication de l'état structural des couches de surface et de base. |
| Rd : Produit Rd | $Rd = RoC * D_0$ | Pour une chaussée souple, traduit l'état du corps de chaussée. |
| D_i : Déflexion | Déflexion mesurée au capteur i | |
| CI : Courbure | $CI = D_i - D_{i+1}$ | Donne une indication de l'état structural des couches de surface et de base. |
| BLI : Base Layer Index ou SCI : Surface Curvature Index | $BLI = D_0 - D_{300}$ | Donne une indication sur les états des couches de surface. |
| MLI : Middle Layer Index ou BDI : Base Damage Index | $MLI = D_{300} - D_{600}$ | Donne une indication sur les états des couches de base. |
| LLI : Lower Layer Index ou BCI : Base Curvature Index | $LLI = D_{900} - D_{600}$ | Donne une indication sur les états des couches de base et de fondation. |
| F : Shape Indicator | $F_i = (D_{i-1} - D_{i+1})/D_i$ | L'indicateur F2 semble donner une meilleure corrélation tandis que F1 présente une faible corrélation. |
| S : Slope variance | $S = D_1 - D_i, i \in [3; 6]$ | |
| SD : Slope of Deflection | $SD = \tan^{-1}(D_0 - D_2)/x_2$ | Corrélations faibles |
| Sp : Spreadability | $S_p = \frac{D_0 + D_1 + D_2 + D_3 + D_4}{5D_0} * 100$ | Suppose refléter la réponse de la structure entière, mais présente de faibles corrélations. |
| I : Reciprocal indicator | $I_i = 1/D_i$ | |
| RA : Rectangular Area Indicator | $RA = (\sum_{i=1 \text{ à } 7} D_i)/D_i$ | Suppose refléter la réponse de la structure entière. |
| TA : Trapezoidal Area Indicator | $TA = \frac{(D_1 + D_7 + \sum_{i=2 \text{ à } 6} 2D_i)}{D_i}$ | Suppose refléter la réponse de la structure entière. |
| $X_{i,i+1}$: Self-prescribed indicator | $X_{i,i+1} = D_i + D_{i+1}$ | |
| SSI: Structural strength index | $SSI = -1.945 - 0.021X_{12} + 0.52X_{67}$ $SSI = f(\delta_i)$ | Variation de 0% (structure inadaptée au trafic) à 100% (structure parfaitement adaptée au trafic). Basé sur l'évaluation statistique de déflexions et permet de caractériser l'état de la couche de forme et la structure de la chaussée de façon indépendante. |

Annexe B : Détermination de l'abaque comportant toutes les combinaisons possibles de d, λ et n

L'abaque est construit pour les combinaisons suivantes :

- d varie de 1 à 100 par pas de 1 ;
- λ varie de 0.2 à 2.5 par pas de 0.1 ;
- n varie de 0.5 à 2 par pas de 0.1 ;

Les étapes de construction de l'abaque sont présentées ci-dessous :

- Pour chacune des 34500 combinaisons possibles de d, λ et n:
 - A partir de la fonction de Jouve et Martinez et d'un jeu de d, λ et n, calcul de la déflexion engendrée par chaque charge de l'appareil sur le géophone du curviamètre ou sur les trois points d'appuis de la poutre du déflectographe Flash ;
 - Cumul des déflexions engendrées par les six charges des appareils pour l'obtention de la déflexion absolue simulée sous les appareils ;
 - Prise en compte des principes et hypothèses de mesure des appareils ;
 - Obtention de la simulation du bassin de déflexion mesuré par les appareils pour un jeu de paramètres d, λ et n.
- Obtention de 34500 fichiers contenant les simulations des bassins de déflexion mesurés par les appareils.
- Selon le pas de mesure des appareils, la simulation des bassins de déflexion doit être ajustée.

Annexe C : Détermination de l'indice I , choix de la meilleure combinaison d , λ et n pour le(s) bassin(s) mesuré(s) et réintroduction des paramètres d , λ et n pour déterminer le bassin de déflexion corrigé sous jumelage standard

Les étapes de cette procédure sont présentées ci-dessous :

- Calcul de l'indice I entre le(s) bassin(s) mesuré(s) par les appareils et l'ensemble des simulations des bassins mesurés issus des 34500 combinaisons possibles de d , λ et n .
- Pour chaque indice I déterminé, seul le plus faible est conservé et les paramètres d , λ et n définis pour chaque bassin mesuré sont enregistrés.
- A l'aide des paramètres d , λ et n définis pour chaque bassin mesuré par les appareils et de la fonction de Jouve et Martinez, le bassin de déflexion sous jumelage standard est déterminé.

Annexe D : Etude de sensibilité des indicateurs classiques à la présence de défauts

Cette annexe complète l'étude de sensibilité conduite au chapitre 3 sur la sensibilité des indicateurs classiques à la présence d'un endommagement localisé d'interface. On introduit ici soit un endommagement généralisé d'interface ou de module d'une couche ou soit un endommagement localisé de variations de modules de couches. La démarche reste la même et consiste à comparer les valeurs des indicateurs calculés à partir des mesures des appareils (déflexion maximale, rayon de courbure et la valeur maximale de la pente) ou du bassin de déflexion corrigé (Dmax, rayon, pente, BLI, MLI ou LLI) aux valeurs de référence représentatives de la structure saine.

D.1 Sensibilité des indicateurs à un endommagement généralisé de la chaussée

L'effet d'une variation générale du module d'une couche du modèle a été étudié pour les trois structures de chaussées sélectionnées. Une première variation a porté sur le module des couches bitumineuses. Cette variation peut provenir soit d'un endommagement généralisé soit d'une température de matériaux différente. Une augmentation de la température conduit à la diminution des modules des matériaux bitumineux des couches de chaussée. La seconde analyse s'est intéressée à l'effet d'un changement du module de la plateforme, qui peut être causé par un endommagement de la plateforme, où une chute de portance due à une variation de l'état hydrique, par exemple. Les modules des différentes couches ont été considérés constants sur toute la longueur de la section. Il a donc été suffisant de simuler un seul bassin de déflexion mesuré, pour chaque structure.

D.1.1 Rappel des valeurs de référence des indicateurs classiques de la mesure de déflexion

Les valeurs de référence ont été établies au chapitre 3. Elles sont calculées pour la structure saine avec une température des matériaux bitumineux de 15°C. On distingue les indicateurs de référence issus des mesures des appareils et les indicateurs estimés sous une charge standard de référence à laquelle on cherche à se ramener par application de la méthode établie au Chapitre II.

D.1.1.1 Valeurs de référence pour la mesure des appareils

Le Tableau D-1 rappelle les valeurs des indicateurs classiques (déflexion maximale, courbure, rayon de courbure et valeur maximale de la pente du bassin) déterminées pour les

Annexe D : Etude de sensibilité des indicateurs classiques à la présence de défauts

trois chaussées de référence de l'étude. Elles sont extraites du Chapitre III (Tableau III.5). Les niveaux de déflexion maximale et de rayon de courbure sur chaussées souple et bitumineuse sont des valeurs couramment enregistrées lors de campagne de mesure. Cependant, sur chaussée mixte, la déflexion maximale est très faible et le rayon de courbure très important. Le curviamètre et le déflectographe Flash ne sont pas à même de relever avec une précision suffisante de tels niveaux de valeurs.

Tableau D-1 : Valeurs des indicateurs classiques de la mesure de déflexion pour les chaussées étudiées (sans défaut), et valeurs correspondantes de justesse et de répétabilité de la déflexion maximale et de la courbure.

| | | Déflexion maximale (mm/100) | | Courbure (10^{-4} m^{-1}) | | Rayon de courbure (m) | | Valeur maximale de la pente (10^{-5} m/m) | |
|----------------------|---------------------|-----------------------------|----------|---------------------------------------|----------|-----------------------|----------|---|----------|
| | | Curviamètre | D. Flash | Curviamètre | D. Flash | Curviamètre | D. Flash | Curviamètre | D. Flash |
| Chaussée souple | Niveau de référence | 42.8 | 50.4 | 16.6 | 15.4 | 602 | 647 | 43.2 | 40.2 |
| Chaussée bitumineuse | Niveau de référence | 37.5 | 45.1 | 11.2 | 9.4 | 889 | 1060 | 36.4 | 36.3 |
| Chaussée mixte | Niveau de référence | 2.6 | 7.6 | 2.2 | 2.2 | 4630 | 4460 | 10.4 | 6.6 |

D.1.1.2 Valeurs de référence calculée sous une charge de référence standard

L'application de la procédure de correction va permettre de corriger la mesure de l'appareil de ses biais de mesure mais aussi d'estimer un bassin de mesure sous une charge standard comme un jumelage de référence. On cherchera donc ici à comparer ces valeurs corrigées à celles de référence directement calculé sous une charge de référence.

Le Tableau D-2 présente les valeurs des différents indicateurs obtenues pour les structures de référence (sans défauts), par un calcul direct sous la charge d'un jumelage standard. Outre les indicateurs précédemment évalués, les index utilisés pour le FWD (BLI, MLI et LLI) sont également évalués. Les niveaux de déflexion maximale, de la valeur maximale de la pente et même de rayon de courbure obtenus après correction sont légèrement plus importants que les niveaux de référence sans correction définis dans le Tableau D-1.

Tableau D-2 : Indicateurs classiques déterminés suite à la procédure de correction sur les bassins de déflexion des structures de chaussées de référence.

| | $D_{maxRefc}$ (mm/100) | Rc_{Refc} (m) | $Pente_{maxRefc}$ (10^{-5} m/m) | BLI_{Refc} (mm/100) | MLI_{Refc} (mm/100) | LLI_{Refc} (mm/100) |
|----------------------|---------------------------|--------------------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Chaussée souple | 51.9 | 972 | 40 | 5 | 10.6 | 10.2 |
| Chaussée bitumineuse | 48.1 | 1535 | 31 | 3.3 | 7.8 | 8.7 |

D.1.2 Sensibilité des indicateurs à un changement de module des matériaux bitumineux

Le changement de module des matériaux bitumineux a été simulé ici en considérant une variation de température, mais il pourrait également correspondre à un endommagement du matériau. Cette étude porte sur l'influence d'un changement de température de ces couches sur les mesures du curviamètre et du déflectographe Flash pour les trois structures étudiées. Le Tableau D-3 présente les différentes températures qui ont été prises en compte, et les valeurs correspondantes des modules des couches bitumineuses, pour chaque température. Les modules de référence sont ceux déterminés pour 15 °C, et on a considéré la même variation de température pour toutes les couches de la chaussée. On note qu'un écart de 10 °C par rapport à la température de référence de 15 °C conduit à un écart sur les modules de l'ordre de 50 %. Une augmentation de la température de 10 °C est équivalente à une diminution du module de 50 % (endommagement du matériau), tandis qu'une diminution de la température de 10 °C conduit à une augmentation du module d'environ 50 % (rigidification du matériau).

Tableau D-3 : Modules des couches bitumineuses en fonction de la température.

| Matériau | Module à 5 °C (MPa) | Module à 10 °C (MPa) | Module à 15 °C (MPa) | Module à 20 °C (MPa) | Module à 25 °C (MPa) | Module à 30 °C (MPa) |
|----------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| BBSG | 11405 | 9310 | 7000 | 4690 | 3245 | 1800 |
| GB3 | 13685 | 11970 | 9000 | 6030 | 4515 | 3000 |

D.1.2.1 Analyse des mesures des appareils

La Figure D-1 présente la simulation des bassins mesurés par le curviamètre et le déflectographe Flash pour les différentes températures pour la structure bitumineuse. Une augmentation de la température conduit à une diminution du module des couches bitumineuses et ainsi à une augmentation de la déflexion. Plus la température est élevée, plus le niveau de déflexion est important. Ainsi, le niveau de la déflexion maximale mesurée passe de 30 mm/100 à 5 °C à 65 mm/100 à 30 °C pour le curviamètre et de 36 mm/100 à 72 mm/100 pour le déflectographe Flash.

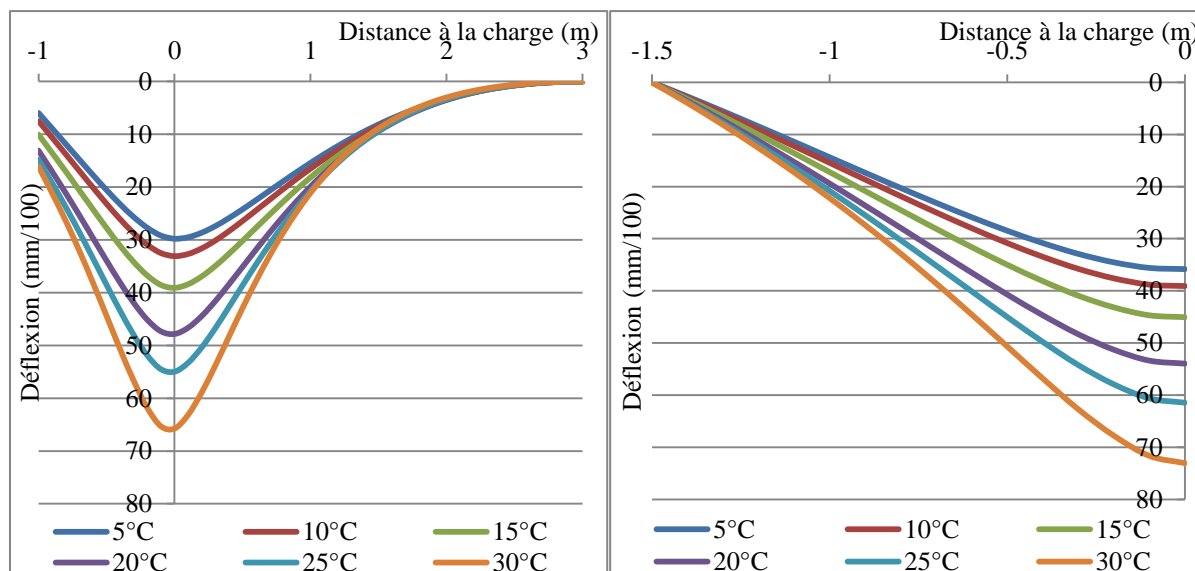


Figure D-1 : Simulation de bassins de déflexion mesurés sur chaussée bitumineuse pour différentes températures (1) Curviamètre - (2) Déflectographe Flash.

D.1.2.2 Influence des variations de module sur les indicateurs de la mesure de déflexion

La Figure D-2 présente, en fonction de la température, l'évolution des valeurs normalisées de déflexion maximale, de rayon de courbure et de pente par rapport à la valeur de référence estimée à une température de 15°C (Tableau D-1).

L'augmentation de la température influence chaque indicateur de façon différente. En effet, une augmentation de la température conduit à une augmentation de la déflexion maximale et de la pente, mais à une diminution du rayon de courbure.

Les variations de la déflexion normalisée ($\frac{D_{max}}{D_{maxRef}}$) dépendent de la structure et de l'appareil.

Elles restent assez limitées pour les chaussées souples ($0.8 < \frac{D_{max}}{D_{maxRef}} < 1.3$) pour les 2 appareils. Cette structure, avec des couches bitumineuses peu épaisses, est moins sensible aux variations de température de ces couches. Pour ce type de structure, le niveau de mesure dépasse la borne supérieure de l'intervalle de justesse normalisé (1.2) seulement pour une température supérieure à 25°C. Au-delà de cette température, la variation de mesure est donc significative, et peut donc affecter l'interprétation de cette mesure. On peut remarquer que ce résultat est cohérent avec les conditions d'exécution des mesures définies dans la méthode d'essai de la mesure de déflexion (Simonin, 1997), qui précise que la température des matériaux bitumineux doit être inférieure à 25°C.

Pour les chaussées bitumineuses épaisses, les variations de déflexion avec la température sont plus importantes, et sont comprises entre 0.7 et 1.6 (déflectographe Flash) ou 1.8 (curviamètre), pour la plage de température considérée. Les mesures du curviamètre sont un

Annexe D : Etude de sensibilité des indicateurs classiques à la présence de défauts

peu plus sensibles aux changements de température que les celles du déflectographe Flash. Les deux limites de l'intervalle de justesse (≈ 0.77 et ≈ 1.22) sont dépassées. La variation de température induit des écarts plus significatifs du niveau de mesure. On peut en déduire que pour ce type de chaussées, il serait préférable de limiter de façon plus importante les conditions d'exécution ou de validité des mesures, afin de pouvoir distinguer une variation de modules due à l'endommagement des matériaux d'un simple changement de température de mesure, surtout dans le cas du suivi régulier d'une structure de chaussée, par plusieurs campagnes de mesures successives.

Pour les chaussées mixtes, le niveau de déflexion maximale est très faible (2.6 mm/100 pour le curviamètre et 7.6 mm/100 pour le Flash). La déflexion normalisée varie fortement avec la température. En valeur relative, elle varie entre 0.6 et 1.7 pour le déflectographe Flash et peut varier d'un rapport 3 pour le curviamètre. Malgré ces variations relatives importantes, le niveau de mesure reste dans tous les cas très faible (≈ 10 mm/100), inférieur à la précision de mesure des appareils. L'utilisation de cet indicateur sur structure mixte semble donc inefficace puisque la mesure de déflexion est trop faible pour permettre la détection de variations de modules.

Pour les trois structures, le rayon de courbure normalisé $\frac{R_c}{R_{cRef}}$ varie entre 0.4 et 1.5 et les six courbes ont sensiblement le même profil. Le niveau de mesure n'est en dehors de l'intervalle de justesse que pour les valeurs faibles de rayon. La limite est franchie pour des températures supérieures ou égale à 25°C. Le changement de niveau est alors bien significatif pour les chaussées souples et bitumineuses. Pour la structure rigide, le niveau de mesure reste toujours largement supérieur à 1500 m, en dehors de la gamme de mesure des appareils. Comme pour la déflexion maximale, on retrouve la condition d'exécution des mesures de la méthode d'essai qui précise que la température des matériaux bitumineux doit être inférieure à 25 °C.

Pour le paramètre valeur maximale de la pente du bassin de déflexion, il n'existe pas de spécifications de justesse et de répétabilité, ni de résultats d'évaluation qui pourraient être comparés à nos simulations. Ce paramètre n'est d'ailleurs pas relevé de façon courante actuellement. Les variations obtenues vont dans le même sens que pour la déflexion maximale. Le rapport entre la pente mesurée à une température donnée et la valeur de référence varie de 0.8 à 5 °C à plus de 1.3 pour 30 °C. A l'exception de la structure mixte, les calculs de la pente pour les deux appareils donnent des résultats comparables jusqu'à 25 °C. Au-delà, les écarts calculés pour la chaussée mixte avec le déflectographe Flash sont plus importants que pour les autres cas.

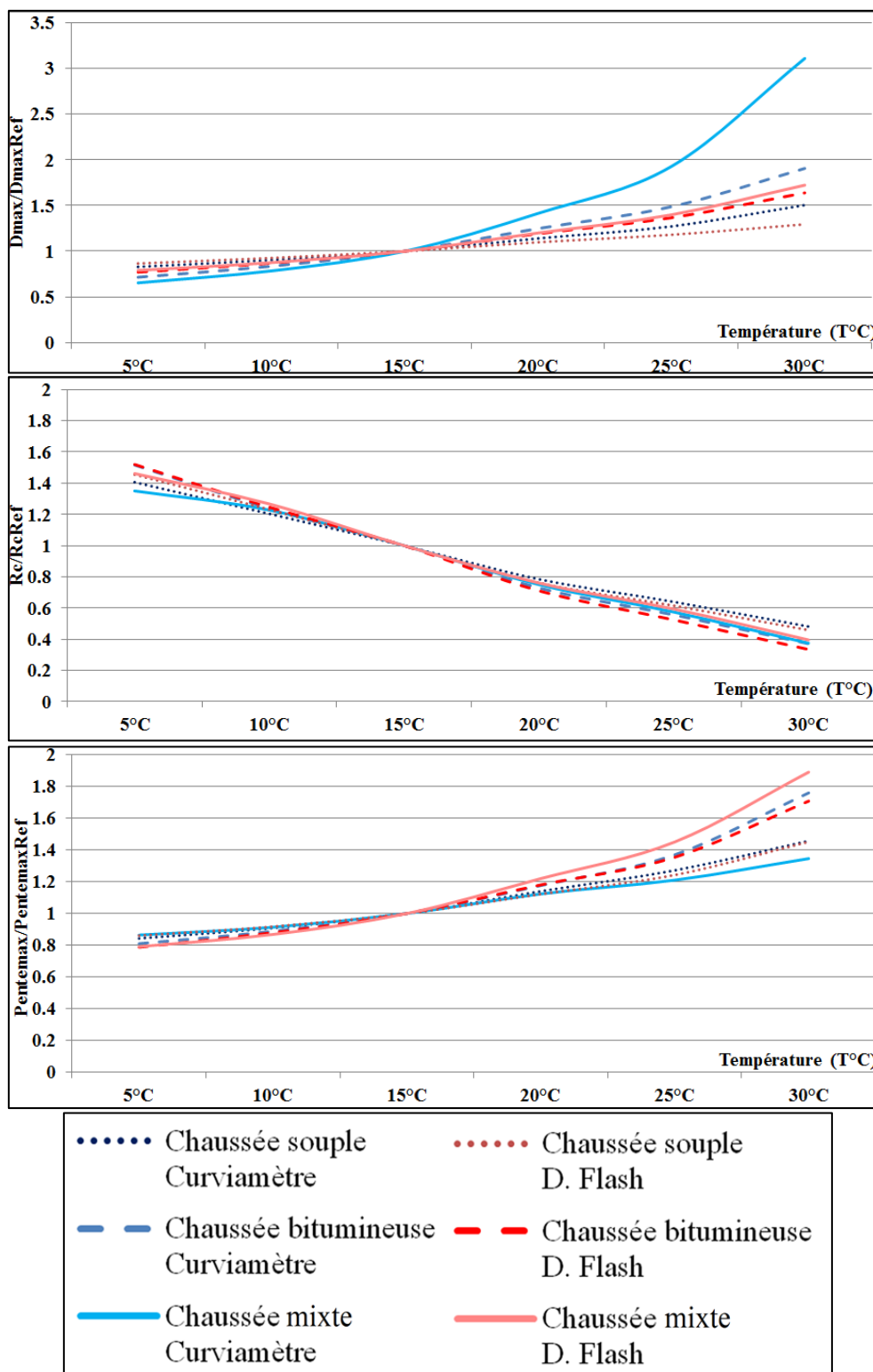


Figure D-2 : Variation des indicateurs de déflexion maximale, de rayon de courbure et de pente par rapport à une référence de 15°C.

La détection de variation de module est possible par l'utilisation du rayon de courbure et de la déflexion maximale au-delà de 25 °C (pour une température de référence de 15 °C) pour les chaussées souple et bitumineuse. Le paramètre valeur maximale de la pente paraît également

intéressant pour détecter les variations de modules. Cependant, aucune étude sur la justesse et la répétabilité de ce paramètre n'a été conduite. Sur chaussée mixte, au vu du faible niveau de déflexion mesuré, l'utilisation des indicateurs classiques n'est pas pertinente et aucune variation de module ne peut être détectée.

D.1.2.3 *Analyse de la sensibilité des indicateurs de mesure de déflexion issus des mesures corrigées*

La procédure de correction proposée au chapitre précédent consiste à transformer la mesure d'un appareil, en prenant en compte son mode de fonctionnement, pour se ramener à la mesure qui serait obtenue sous un jumelage standard. Le bassin de référence unique, pour les 2 appareils, est donc celui obtenu directement par le calcul sous la charge d'un jumelage standard. La procédure de correction a été appliquée sur les mesures simulées précédemment. Dans ce chapitre, la procédure a été appliquée à la fois aux mesures du curviamètre et du déflectographe Flash et dans l'ensemble des solutions possibles, on a retenu le triplet de paramètres « d_f, λ_f et n_f » qui satisfait à un indice $I \leq 5\%$ pour les deux appareils (Chapitre II, équation II.19)). Cet indice I calcule l'écart entre le bassin mesuré par l'appareil et le bassin ajusté par la procédure de correction. L'application de la procédure de correction sur chaussée mixte n'a pas permis d'obtenir un triplet unique satisfaisant au critère d'un indice I inférieur à 5 %. De plus, les indicateurs déduits de cette mesure corrigée sont aberrants (rayon de courbure > 17000 m). Pour ces raisons, seules les valeurs d'indicateurs obtenues sur les chaussées souple et bitumineuse épaisse sont analysées dans cette partie.

La Figure D-3 présente pour les chaussées bitumineuse épaisse et souple, et pour une température de 5 °C dans les couches, les simulations des bassins mesurés par le curviamètre et le déflectographe Flash, le bassin de référence sous jumelage standard et le bassin corrigé (identique ici pour les 2 appareils). Alors que les bassins mesurés par les appareils sous-estiment largement la déflexion de référence, le niveau de déflexion du bassin corrigé est quasiment égal à cette référence. De plus, l'allure du bassin corrigé est comparable à celle du bassin de référence. Le bassin corrigé est symétrique et n'est plus dépendant des hypothèses de mesure des appareils. Ces observations sont vraies sur structure bitumineuse et souple, pour les six températures étudiées.

Annexe D : Etude de sensibilité des indicateurs classiques à la présence de défauts

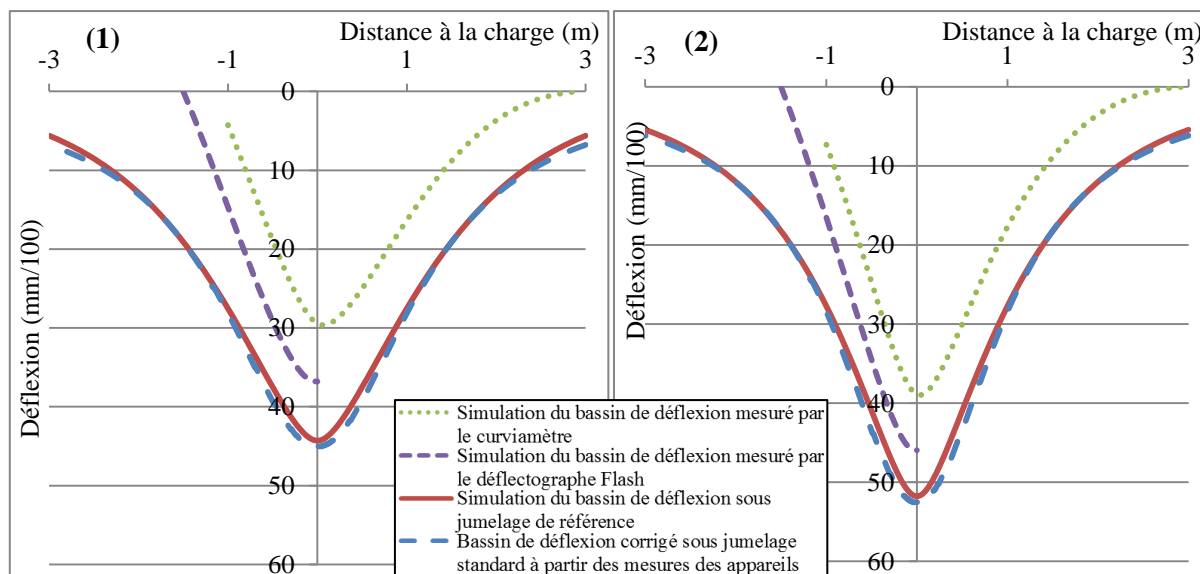


Figure D-3 : Comparaison de la simulation de la mesure du curviamètre et du déflectographe Flash, du bassin de référence sous jumelage standard et du bassin corrigé - Température dans les couches 5°C – (1) Chaussée bitumineuse – (2) Chaussée souple.

Le Tableau D-4 présente les indicateurs classiques normalisés issus des mesures de bassin de déflexion corrigées. En comparant ces valeurs avec celles du Tableau D-2, on peut conclure que :

- Après correction, les variations sur le paramètre déflexion maximale sont similaires à celles obtenues pour les mesures brutes pour le déflectographe Flash, et un peu plus réduites pour le curviamètre. Seules des températures supérieures à 25 °C conduisent à une augmentation significative du niveau de mesure.
- Pour le rayon de courbure, les variations sont proches des résultats précédents pour les 2 appareils. On retrouve des écarts significatifs au-delà de 25 °C.
- Les variations de la valeur maximale de la pente ont été amplifiées par rapport aux mesures brutes, notamment pour les températures élevées, sur chaussée bitumineuse. Ce paramètre pourrait constituer un indicateur plus sensible que la déflexion maximale et le rayon de courbure à un endommagement de matériau (ou à une variation de température). Cependant en l'absence d'évaluation métrologique, on manque d'information pour définir à partir de quel seuil de variation cet indicateur est significatif.
- Les index BLI, MLI et LLI sont pertinents avec une augmentation de 50 % de leur valeur pour des températures supérieures à 25 °C ou 30 °C, pour les deux structures. Les plus fortes variations sont calculées pour la structure bitumineuse. Les index BLI et MLI, relatifs à l'état des couches de surface et de base, sont logiquement plus sensibles à la variation des modules des couches bitumineuses que l'index LLI, utilisé normalement pour caractériser la plateforme (dont le module était ici constant).

Annexe D : Etude de sensibilité des indicateurs classiques à la présence de défauts

Tableau D-4 : Indicateurs classiques estimés à partir des bassins corrigés sous jumelage standard pour les 3 types de structures et les différentes températures.

| | | $\frac{D_{maxC}}{D_{maxRefC}}$ | $\frac{Rc_C}{Rc_{RefC}}$ | $\frac{Pente_{maxC}}{Pente_{maxRefC}}$ | $\frac{BLI_C}{BLI_{RefC}}$ | $\frac{MLI_C}{MLI_{RefC}}$ | $\frac{LLI_C}{LLI_{RefC}}$ |
|----------------------|------|--------------------------------|--------------------------|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Chaussée souple | 5°C | 0.91 | 1.34 | 0.80 | 0.76 | 0.79 | 0.83 |
| | 10°C | 0.95 | 1.17 | 0.89 | 0.86 | 0.88 | 0.91 |
| | 20°C | 1.08 | 0.83 | 1.16 | 1.19 | 1.17 | 1.13 |
| | 25°C | 1.15 | 0.74 | 1.29 | 1.34 | 1.31 | 1.25 |
| | 30°C | 1.27 | 0.68 | 1.48 | 1.47 | 1.48 | 1.46 |
| Chaussée bitumineuse | 5°C | 0.87 | 1.48 | 0.73 | 0.68 | 0.70 | 0.73 |
| | 10°C | 0.93 | 1.24 | 0.84 | 0.81 | 0.82 | 0.84 |
| | 20°C | 1.12 | 0.75 | 1.27 | 1.33 | 1.30 | 1.25 |
| | 25°C | 1.26 | 0.59 | 1.55 | 1.67 | 1.61 | 1.50 |
| | 30°C | 1.55 | 0.41 | 2.09 | 2.39 | 2.23 | 1.97 |

D.1.3 Influence d'un changement de portance de la plateforme

Une seconde série de simulations a été réalisée pour étudier l'influence d'une variation du module de la plateforme sur les mesures du curviamètre et du déflectographe Flash. Cette variation de portance peut être liée à un endommagement du matériau ou à une variation d'état hydrique. Le Tableau D-5 rappelle les correspondances entre classes de plateforme et valeurs de module d'élasticité du sol. L'évaluation a été réalisée pour les trois structures. La plateforme PF2, correspondant à une valeur de module de 50 MPa, a été prise comme référence.

Tableau D-5 : Correspondance entre niveau de plateforme et valeur de module du sol.

| | | | | | |
|--------------|-----|------------|-------|-----|-----|
| Plateforme | PF1 | PF2 | PF2qs | PF3 | PF4 |
| Module (MPa) | 20 | 50 | 80 | 120 | 200 |

D.1.3.1 Analyse des mesures des appareils

La Figure D-4 représente la simulation des mesures du curviamètre et du déflectographe Flash, pour différents niveaux de module de la plateforme, pour la chaussée bitumineuse. L'augmentation de la rigidité de la plateforme conduit à une diminution très significative du niveau de déflexion mesuré par les appareils. Ainsi, en modifiant la classe de plateforme de PF1 à PF4, la déflexion maximale est divisée par 3, passant de 52 à 16 mm/100 pour le curviamètre et de 68 à 20 mm/100 pour le déflectographe Flash. La simulation du bassin mesuré sur la chaussée avec une plateforme PF1 présente l'écart le plus important avec les autres cas étudiés.

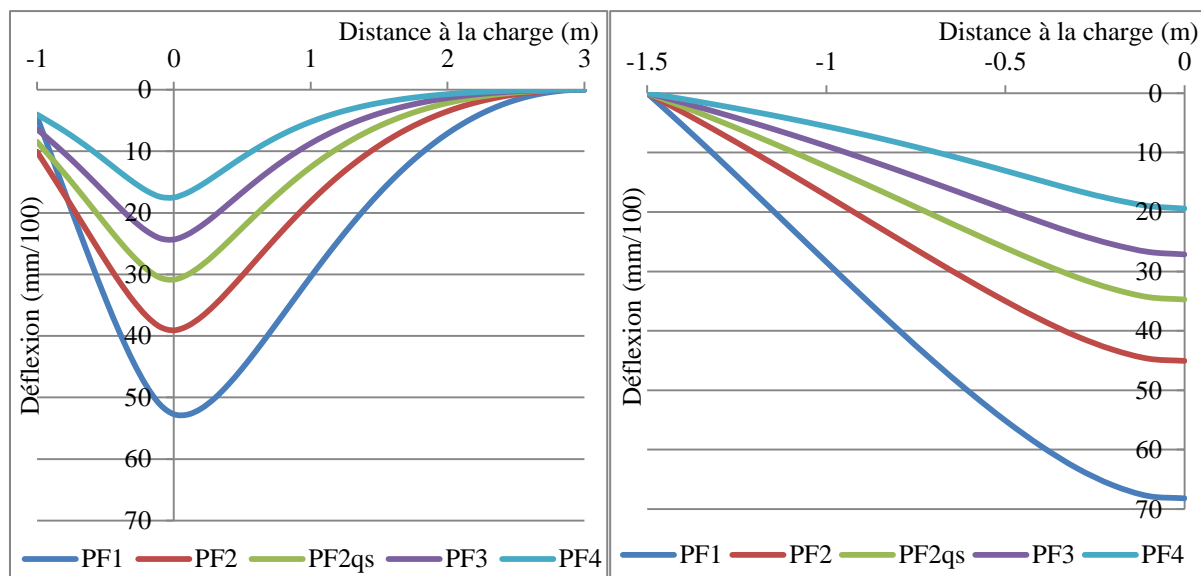


Figure D-4 : Simulation de bassins de déflexion mesurés pour différents niveaux de portance de la plateforme - Chaussée bitumineuse - (1) Curviamètre - (2) Défectographe Flash.

D.1.3.2 Influence des variations de portance de la plate-forme sur les indicateurs de mesure de déflexion.

La Figure D-5 présente l'évolution des indicateurs normalisés, pour un changement de portance de la plateforme, en prenant comme référence la plateforme PF2 (normalisation par rapport aux valeurs de référence du Tableau D-1).

Pour la chaussée mixte, les résultats sont différents des autres structures. Cependant pour cette structure, la grande rigidité de la chaussée conduit à des niveaux de déflexion maximale très faibles (<3 mm/100 pour le curviamètre et <8 mm/100 pour le Flash) et des valeurs de rayon de courbure très grandes (>3500 m), dont les variations ne sont pas significatives.

Pour les autres structures, la déflexion maximale diminue avec l'augmentation de la rigidité de la plateforme. Les variations sont plus importantes pour le défectographe Flash que pour le curviamètre. Pour les 2 appareils, les changements de classe de portance de la plateforme sont détectables, sauf pour le passage de la classe PF2 à PF2qs.

Le rayon de courbure augmente avec la rigidité de la plateforme, mais cet indicateur est assez peu sensible aux caractéristiques de la plateforme. Les valeurs de $\frac{Rc}{Rc_{Ref}}$ sont comprises entre 0.8 et 1.3, et restent donc dans l'intervalle de justesse défini pour la plateforme de référence. Ces variations sont trop faibles pour détecter un changement de classe de plateforme.

Enfin, la pente diminue avec l'augmentation de la rigidité de la plateforme. Cet indicateur apparait proportionnellement plus sensible que la déflexion maximale et que le rayon de

Annexe D : Etude de sensibilité des indicateurs classiques à la présence de défauts

courbure à un changement de plateforme puisque le rapport $\frac{Pent_{max}}{Pent_{max\ ref}}$ varie entre 0.45 et 1.7 pour l'ensemble des structures.

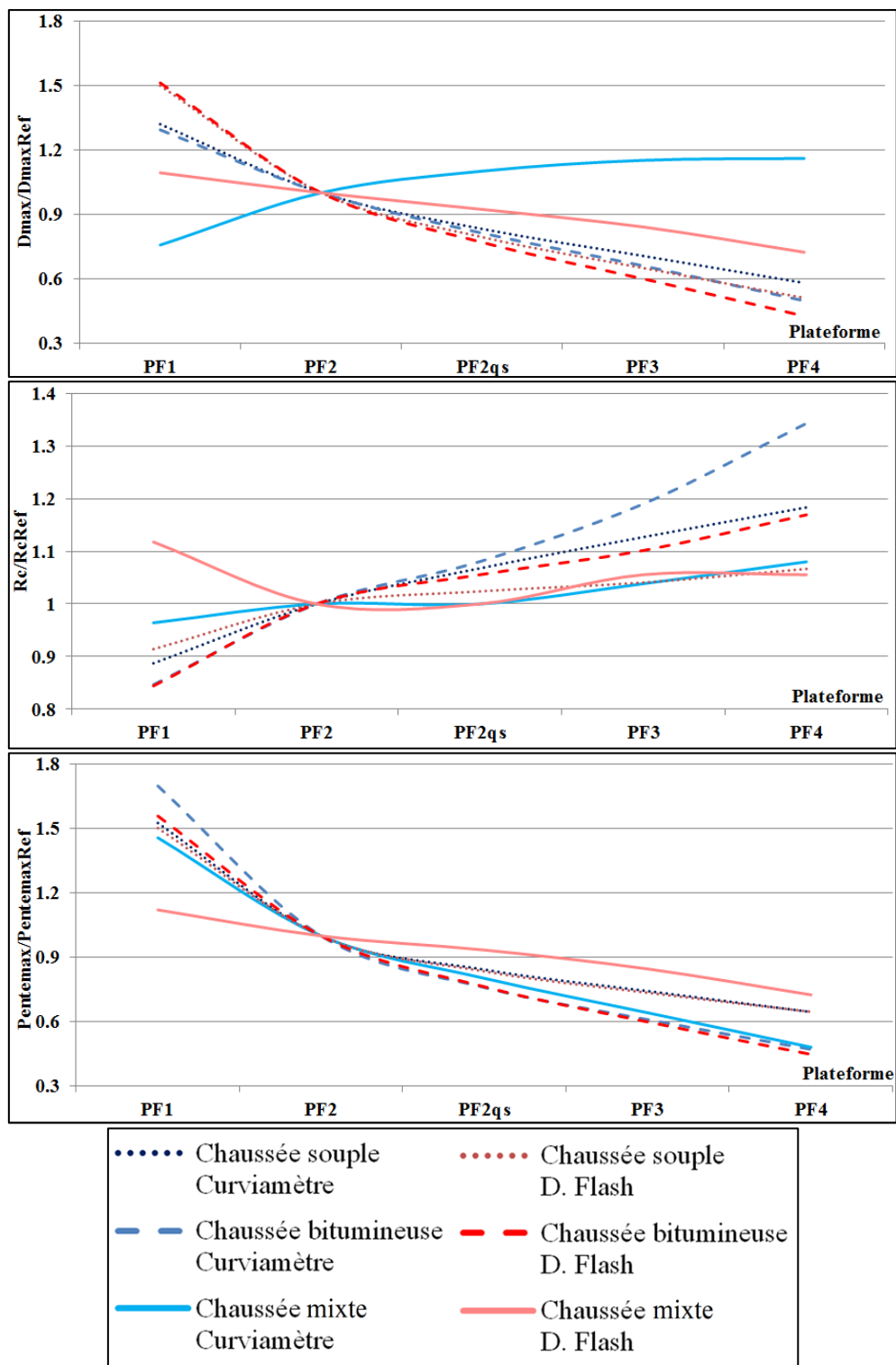


Figure D-5 : Variations des indicateurs classiques de la mesure de déflexion pour un changement de plateforme.

D.1.3.3 *Analyse de la sensibilité des indicateurs classiques de la mesure de déflexion issus des mesures corrigées*

Comme précédemment, la procédure de correction a été appliquée sur l'ensemble des bassins simulés et dans chaque cas de structure. Des valeurs identiques des paramètres d_f , λ_f et n_f ont été déterminées pour les mesures du curviamètre et du déflectographe Flash. La correction permet d'obtenir des bassins corrigés indépendants de l'appareil. Le bassin corrigé doit être proche du bassin théorique calculé à partir de la structure de référence, ce qui est vérifié par la valeur de l'indice I (indice $I < 5\%$, comme au § III.3.2.1.3). Pour la chaussée mixte, la procédure de correction n'a pas permis de satisfaire la condition sur l'indice I. Seuls les indicateurs obtenus sur les chaussées souple et bitumineuse épaisse ont donc été étudiés. La Figure D-6 compare les simulations des bassins mesurés par le curviamètre, le bassin de référence sous jumelage standard et celui corrigé, pour les chaussées bitumineuse épaisse et souple, sur une plateforme PF2qs. Comme vu au Chapitre II, plus la rigidité de la plateforme augmente, plus la mesure des appareils est proche de la valeur de référence. La procédure de correction est tout de même bénéfique à chaque fois et permet d'obtenir un niveau de déflexion maximale et une forme du bassin nettement plus proches de la référence.

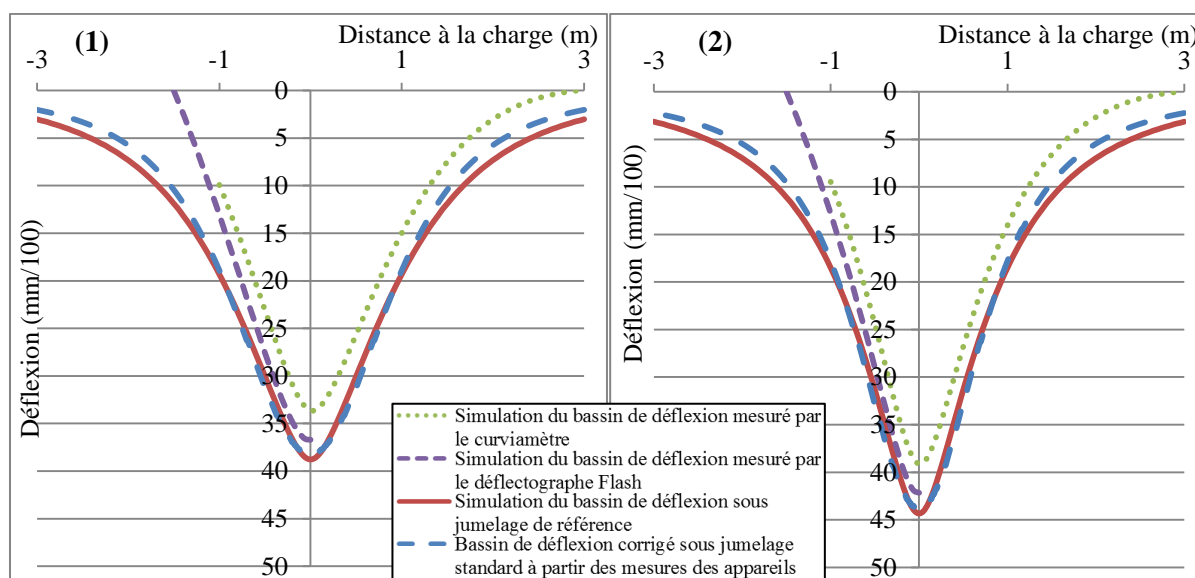


Figure D-6 : Comparaison entre les mesures simulées du curviamètre et du déflectographe Flash, le bassin de référence sous jumelage standard et le bassin corrigé – Plateforme PF2qs – (1) Chaussée bitumineuse – (2) Chaussée souple.

Le Tableau D-6 présente les indicateurs classiques normalisés issus des mesures de bassin de déflexion corrigées, et les compare aux valeurs obtenues pour les structures de référence (Tableau D-2). En considérant la précision des appareils, et en prenant la structure PF2 comme référence, on peut conclure que :

- Les variations de la déflexion maximale sont significatives, et permettent de distinguer les classes de plateforme PF1, PF3 et PF4.

Annexe D : Etude de sensibilité des indicateurs classiques à la présence de défauts

- Les variations du rayon de courbure sont trop faibles pour être significatives.
- Les écarts sur la pente et les index BLI, MLI et LLI, restent proportionnellement un peu plus faibles que ceux obtenus pour la déflexion maximale. Parmi ces indicateurs, c'est l'index LLI qui est le plus sensible aux variations de portance de la plate-forme, confirmant sa capacité à caractériser les couches profondes de la chaussée.

Tableau D-6 : Indicateurs classiques de la mesure de déflexion déterminés à partir des bassins corrigés sous jumelage standard, pour différents niveaux de portance de la plateforme.

| | | $\frac{D_{maxC}}{D_{maxRefC}}$ | $\frac{Rc_C}{Rc_{RefC}}$ | $\frac{Pente_{maxC}}{Pente_{maxRefC}}$ | $\frac{BLI_C}{BLI_{RefC}}$ | $\frac{MLI_C}{MLI_{RefC}}$ | $\frac{LLI_C}{LLI_{RefC}}$ |
|----------------------|-------|--------------------------------|--------------------------|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Chaussée souple | PF1 | 1.9 | 0.9 | 1.3 | 1.1 | 1.2 | 1.4 |
| | PF2qs | 0.8 | 1 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.8 |
| | PF3 | 0.6 | 1.1 | 0.8 | 0.9 | 0.8 | 0.7 |
| | PF4 | 0.5 | 1.1 | 0.7 | 0.9 | 0.7 | 0.6 |
| Chaussée bitumineuse | PF1 | 2 | 0.8 | 1.4 | 1.2 | 1.3 | 1.4 |
| | PF2qs | 0.7 | 1.1 | 0.8 | 0.9 | 0.8 | 0.8 |
| | PF3 | 0.5 | 1.3 | 0.7 | 0.8 | 0.7 | 0.7 |
| | PF4 | 0.4 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.5 |

D.1.4 Sensibilité des indicateurs à un changement d'état d'interface

Cette dernière partie étudie la sensibilité des mesures du curviamètre et du déflectographe Flash à un décollement généralisé d'interface (c'est-à-dire affectant toute la longueur de la chaussée). Les différentes configurations étudiées sont présentées dans le Tableau III-4. On n'a pas envisagé le cas de plusieurs interfaces dégradées simultanément.

D.1.4.1 Exploitation des mesures des appareils

La Figure D-7 présente la simulation des mesures du curviamètre et du déflectographe Flash pour la chaussée bitumineuse épaisse, avec un défaut généralisé d'état d'interface situé à 6 cm et 14 cm de profondeur. On peut voir que la déflexion maximale augmente de façon très significative avec la présence d'un décollement pour les deux appareils, mais également avec la profondeur du défaut. Elle passe de 37 mm/100 à 53 mm/100 et 57 mm/100 respectivement pour le curviamètre et de 45 mm/100 à 62 mm/100 et 65 mm/100 respectivement pour le déflectographe Flash. L'augmentation de la déflexion est donc supérieure à 40 % dans tous les cas considérés.

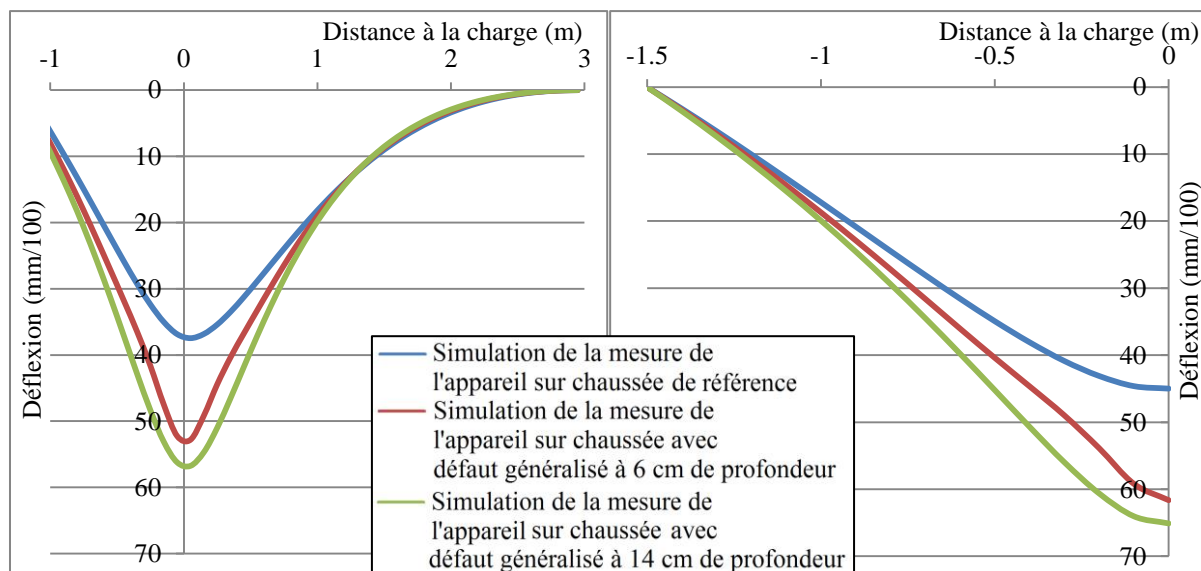


Figure D-7 : Simulation de bassins de déflexion mesurés sur chaussée sans défaut ou avec un décollement généralisé à 6 cm ou 14 cm de profondeur - Chaussée bitumineuse (1) Curviamètre - (2) Défectographe Flash.

D.1.4.2 Influence d'un décollement sur les indicateurs de la mesure de déflexion

Le Tableau D-7 compare, pour les trois structures, les valeurs des différents indicateurs obtenues avec des interfaces décollées, avec les valeurs calculées pour les structures de référence sans défauts (Tableau D-1), en donnant les valeurs des rapports $\frac{D_{max}}{D_{max_{Ref}}}$, $\frac{Rc}{Rc_{Ref}}$ et $\frac{Pente_{max}}{Pente_{max_{Ref}}}$. Comme on considère ici un décollement généralisé, les valeurs de ces indicateurs sont constantes sur toute la longueur de la chaussée. On voit que plus la chaussée est rigide, plus la déflexion maximale et la pente diminuent alors que le rayon de courbure augmente. Pour un type de structure donnée, la profondeur du défaut a également une influence. L'analyse des différents indicateurs montre que :

- La déflexion normalisée maximale reste dans l'intervalle de justesse pour la chaussée souple. Pour la structure bitumineuse, l'augmentation de cet indicateur est significative pour les 2 interfaces (variation de 40 à 50 % du niveau de déflexion, suivant la position de l'interface et le type d'appareil). Pour la structure mixte, l'effet d'un décollement est très important, puisque la déflexion varie dans un rapport de 2, voire plus. Cependant même si cet écart est grand en valeur relative, il reste faible en valeur absolue, et donc peu significatif, compte tenu du faible niveau de mesure (<12 mm/100 dans tous les cas).
- Le rayon de courbure normalisé diminue de façon significative en présence d'un décollement, pour les trois types de structures. Pour la structure mixte, cette réduction est spectaculaire, puisque le rayon de courbure passe de 4400 m (hors limite de mesure des appareils) à moins de 1000 m dans la majorité des cas. Sur chaussée bitumineuse la réduction est aussi très forte, pour les 2 cas d'interface. Dans tous les cas, la réduction du rayon de courbure est plus importante pour les interfaces situées en partie supérieure de la structure.

Annexe D : Etude de sensibilité des indicateurs classiques à la présence de défauts

- La valeur maximale de la pente du bassin de déflexion augmente en présence d'un décollement. L'augmentation relative est à peu près du même ordre de grandeur que celle de la déflexion. Cet indicateur est plus sensible pour les couches les plus profondes. L'estimation de ce paramètre pourrait donc s'avérer être un indicateur tout aussi intéressant que la déflexion maximale et le rayon de courbure pour détecter la présence de défaut.

Tableau D-7 : Variations relatives des indicateurs du bassin de déflexion pour différents cas de décollements d'interface.

| | Curviamètre | | | Déflectographe Flash | | |
|----------------------|--|---|---|--|---|---|
| | Profondeur du décollement (6 cm : Chaussée souple et bitumineuse/ 8 cm : Chaussée mixte) | Profondeur du décollement (14 cm : Chaussée bitumineuse/ 15cm : Chaussée mixte) | Profondeur du décollement (23 cm : Chaussée mixte) | Profondeur du décollement (6 cm : Chaussée souple et bitumineuse/ 8 cm : Chaussée mixte) | Profondeur du décollement (14 cm : Chaussée bitumineuse/ 15cm : Chaussée mixte) | Profondeur du décollement (23 cm : Chaussée mixte) |
| | $\frac{D_{max}}{D_{maxRef}}$ | | | | | |
| Chaussée souple | 1.2 | / | / | 1.2 | / | / |
| Chaussée bitumineuse | 1.4 | 1.5 | / | 1.4 | 1.4 | / |
| Chaussée mixte | 2.1 | 4.1 | 5.2 | 1.5 | 2.2 | 2.6 |
| | $\frac{Rc}{Rc_{Ref}}$ | | | | | |
| Chaussée souple | 0.6 | / | / | 0.6 | / | / |
| Chaussée bitumineuse | 0.3 | 0.5 | / | 0.3 | 0.4 | / |
| Chaussée mixte | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.3 |
| | $\frac{Pente_{max}}{Pente_{maxRef}}$ | | | | | |
| Chaussée souple | 1.5 | / | / | 1.3 | / | / |
| Chaussée bitumineuse | 1.5 | 1.6 | / | 1.4 | 1.5 | / |
| Chaussée mixte | 1.7 | 2 | 1.9 | 1.9 | 2.3 | 2.2 |

D.1.4.3 Influence d'un décollement d'interface sur les indicateurs déterminés à partir des mesures de déflexion corrigées.

Comme précédemment, la procédure de correction a été appliquée sur les simulations de bassins mesurés, pour les trois structures étudiées. Les paramètres optimisés d_f , λ_f et n_f ont été choisis identiques pour les deux appareils, tout en s'assurant que la condition assurant

Annexe D : Etude de sensibilité des indicateurs classiques à la présence de défauts

un bon ajustement ($I = \frac{S}{S_{mes}} \leq 5\%$) est satisfaite. La procédure de correction n'a pas donné de bons résultats pour la structure mixte.

La Figure D-8 présente les simulations des bassins mesurés par les deux appareils sur une chaussée bitumineuse, avec un décollement d'interface généralisé à 6 cm et 14 cm de profondeur respectivement. La procédure de correction donne des résultats satisfaisants, et permet d'obtenir des valeurs de déflexion maximale, et des formes de bassins proches de la référence.

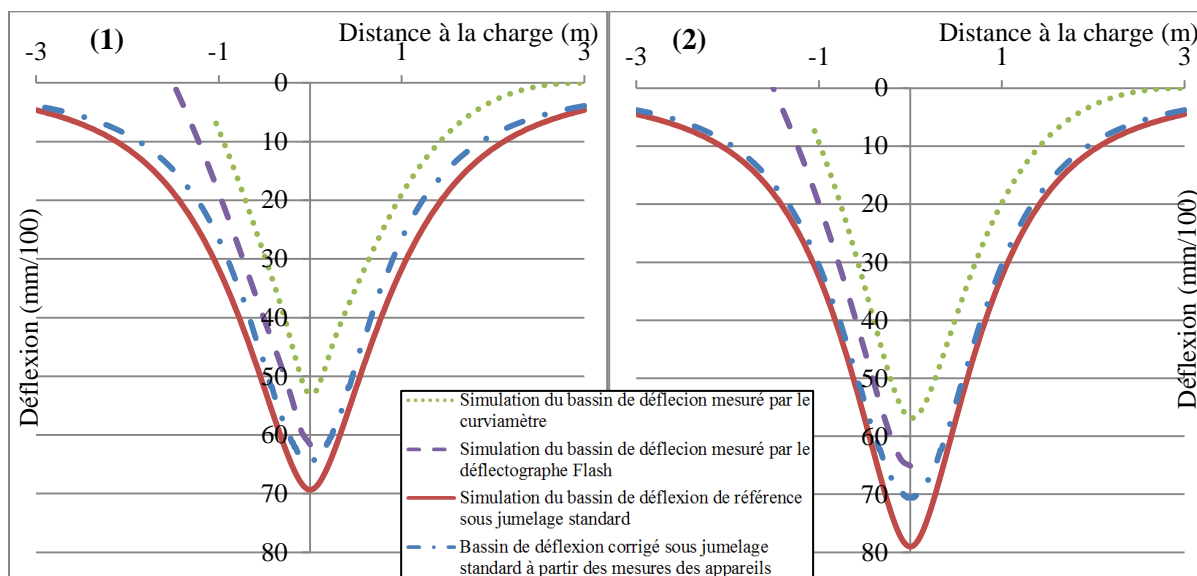


Figure D-8 : Comparaison des bassins de déflexion corrigés obtenus avec un décollement d'interface généralisé avec les bassins de référence. Chaussée bitumineuse - décollement à 6cm de profondeur (1) - décollement à 14cm de profondeur (2).

Le Tableau D-8 compare, pour les deux structures, les valeurs des différents indicateurs obtenues avec des interfaces décollées, avec les valeurs calculées pour les structures de référence sans défauts (Tableau D-1).

Si on se réfère aux limites de justesse établies pour les mesures brutes, on peut conclure que :

- la déflexion maximale ne constitue pas un ici indicateur suffisamment sensible pour détecter un décollement, sauf pour le décollement situé à 14 cm de profondeur sur la structure bitumineuse.
- Le rayon de courbure présente également une sensibilité limitée pour détecter les défauts d'interface situés à 14 cm de profondeur, mais détecte les défauts d'interface situés à 6 cm de profondeur.
- Les 4 autres indicateurs, pente, BLI, MLI et LLI sont tous sensibles à la présence de défauts d'interface. L'indicateur LLI est le moins sensible, mais reste proportionnellement plus sensible que la déflexion maximale. L'indicateur BLI montre l'augmentation la plus importante avec une sensibilité proche de celle du rayon de courbure. Comme pour le rayon de courbure, le calcul de cet indicateur s'effectue

Annexe D : Etude de sensibilité des indicateurs classiques à la présence de défauts

au voisinage du sommet du bassin de déflexion ce qui explique sans doute leur niveau de sensibilité proche.

Tableau D-8 : Indicateurs normalisés de la mesure de déflexion déterminés à partir des bassins corrigés sous jumelage standard, pour différents cas de décollement d'interfaces.

| | | $\frac{D_{maxC}}{D_{maxRefC}}$ | $\frac{Rc_C}{Rc_{RefC}}$ | $\frac{Pente_{maxC}}{Pente_{maxRefC}}$ | $\frac{BLI_C}{BLI_{RefC}}$ | $\frac{MLI_C}{MLI_{RefC}}$ | $\frac{LLI_C}{LLI_{RefC}}$ |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Chaussée souple | Décollement généralisé à 6 cm | 1.1 | 0.6 | 1.3 | 1.5 | 1.3 | 1.1 |
| Chaussée bitumineuse | Décollement généralisé à 6 cm | 1.2 | 0.4 | 1.6 | 2 | 1.7 | 1.4 |
| | Décollement généralisé à 14 cm | 1.3 | 0.5 | 1.8 | 2.3 | 1.9 | 1.5 |

D.1.5 Bilan sur la sensibilité des indicateurs de déflexion à un changement généralisé de la structure de chaussée (variation de module ou décollement d'interface)

Dans les paragraphes précédents, on s'est intéressé à l'effet d'un changement de propriétés d'une structure de chaussée (changement de module, ou décollement d'interface) sur le bassin de déflexion. Un tel changement généralisé (observé sur tout le linéaire de la structure) peut être représentatif d'un endommagement généralisé ou également d'un changement de température de mesure.

L'objectif était d'évaluer la sensibilité du bassin de déflexion et de différents indicateurs classiques caractérisant ce bassin, issus de la bibliographie, à de tels changements. Cette évaluation visait à permettre, dans un second temps, de proposer de nouveaux indicateurs optimisés, plus performants (c'est l'objet de la dernière partie de ce chapitre).

Plusieurs cas de «défauts » ont été étudiés, et on peut en tirer les tendances suivantes :

Une réduction du module des couches bitumineuses, par augmentation de la température ou par endommagement généralisé de ces couches conduit à une diminution de la déflexion maximale et de la pente du bassin de déflexion et à une augmentation du rayon de courbure pour tous les cas étudiés.

Une augmentation de la portance de la plateforme conduit à une réduction de la déflexion maximale et de la pente tandis que le rayon de courbure augmente. Pour les deux appareils, cette observation est vraie sur chaussées souple, bitumineuse et mixte pour le deflectographe Flash. En revanche, sur structure mixte, l'augmentation de la rigidité de la plateforme

engendre une augmentation de la déflexion maximale mesurée par le curviamètre. Cette conséquence est directement liée au type de structure et aux principes de fonctionnement des appareils. En effet, pour une chaussée rigide, les hypothèses de mesure du curviamètre conduisent à l'obtention de ces mesures.

De même, la présence d'un décollement généralisé d'interface conduit à une augmentation de la déflexion maximale et de la pente mais à une réduction du niveau de rayon de courbure. Les variations observées sont différentes suivant le type de structure, et d'autant plus importantes que la structure est rigide.

Sur chaussées souple et bitumineuse et considérant les performances métrologiques des appareils, ils sont capables de détecter des changements de température (relatifs à de fortes variations de modules) au-delà de 25 °C (pour une référence à 15 °C). La détection des modifications de la plateforme est également possible par les appareils à partir d'un module de plateforme différent de PF2qs (pour une référence de plateforme PF2).

Pour un endommagement généralisé de l'interface, les défauts sont tous détectables avec l'utilisation de la déflexion maximale. L'indicateur de la valeur maximale de la pente est dans la majorité des configurations plus sensible que la déflexion maximale et le rayon de courbure. Des études complémentaires pourraient être menées pour déterminer les performances métrologiques de la pente. Le faible niveau de déflexion maximale mesurée et l'important rayon de courbure calculé sur chaussée mixte ne permet pas de détecter de défauts sur ce type de structure.

La procédure de correction permet d'obtenir un niveau de déflexion et une forme du bassin corrigé proches du bassin de référence sur chaussée souple et bitumineuse. De plus, le calcul des indicateurs BLI, MLI et LLI associés au FWD peuvent être exploités pour déterminer la présence d'éventuels défauts. Un changement de plateforme affectera davantage LLI alors qu'un changement de module de la couche bitumineuse rend les indicateurs BLI et MLI plus sensibles. Ces indicateurs permettent de préciser la zone de couches endommagées dans la chaussée.

D.2 Sensibilité des indicateurs à une variation localisé de modules de couches de la chaussée

Une dernière étude a été menée afin de déterminer l'effet d'une variation locale de modules sur les mesures du curviamètre et du deflectographe Flash. Deux cas indépendants ont été considérés pour la chaussée bitumineuse :

- Une diminution du module de la seconde couche bitumineuse, le long de l'itinéraire de 11 000 MPa à 7 000 MPa.
- Une diminution du module de la plateforme, de 70 MPa à 30 MPa.

Annexe D : Etude de sensibilité des indicateurs classiques à la présence de défauts

Le Tableau D-9 rappelle les épaisseurs et modules des couches de la structure, en indiquant les couches dont le module varie.

Tableau D-9 : Hypothèses de variation des modules de deux couches de la structure bitumineuse.

| Epaisseur des couches (m) | Modules de référence (MPa) | Modules minimaux (MPa) | Modules maximaux (MPa) |
|---------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.06 | | 7000 | |
| 0.08 | 9000 | 7000 | 11000 |
| 0.08 | | 9000 | |
| 6 | 50 | 30 | 70 |
| Semi-infinie | | 55000 | |

La Figure D-9 présente les variations des modules dans les couches le long de la section. Les modules des deux couches varient tous les 2 m entre 5 m et 25 m.

Le long de la section, les bassins de déflexion obtenus avec le déflectographe et le curviamètre ont été calculés tous les 0.1 m. La mesure du curviamètre a été simulée entre les abscisses 10.1 m et 17.3 m ; celle du déflectographe Flash entre 11.6 m et 17.8 m. Ces limites sur la position des mesures ont été choisies afin de limiter les effets de bord. Pour ces abscisses, le module de la couche bitumineuse passe de 9900 à 8400 MPa pour le curviamètre (9500 à 8400 MPa pour le déflectographe Flash) soit de 1.1 à 0.93 fois le module de référence. Celui de la plateforme passe de 59 à 44 MPa pour le curviamètre (56 à 44 MPa pour le déflectographe Flash) soit 1.18 à 0.88 fois le module de référence.

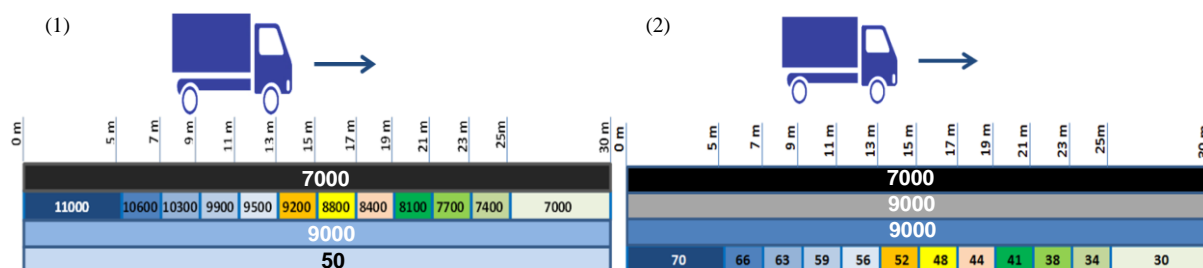


Figure D-9 : Hypothèses d'évolution des modules des couches de la couche bitumineuse (1) et de la plateforme (2) – Structure souple

D.2.1 Exploitation de la mesure des appareils

La Figure D-10 présente les bassins de déflexions mesurés par le curviamètre le long de l'itinéraire pour une variation de modules de la couche bitumineuse (1) et de la plateforme (2). Lorsque le module de la couche bitumineuse varie, les écarts entre les bassins de déflexion sont très faibles. En considérant la justesse de l'appareil, il est impossible de détecter cette variation de module. Pour une variation de portance de la plateforme, la déflexion maximale augmente de 6mm/100 entre les deux bassins extrêmes. Au vu des performances du curviamètre, cet écart maximal serait tout juste perceptible sur une mesure individuelle.

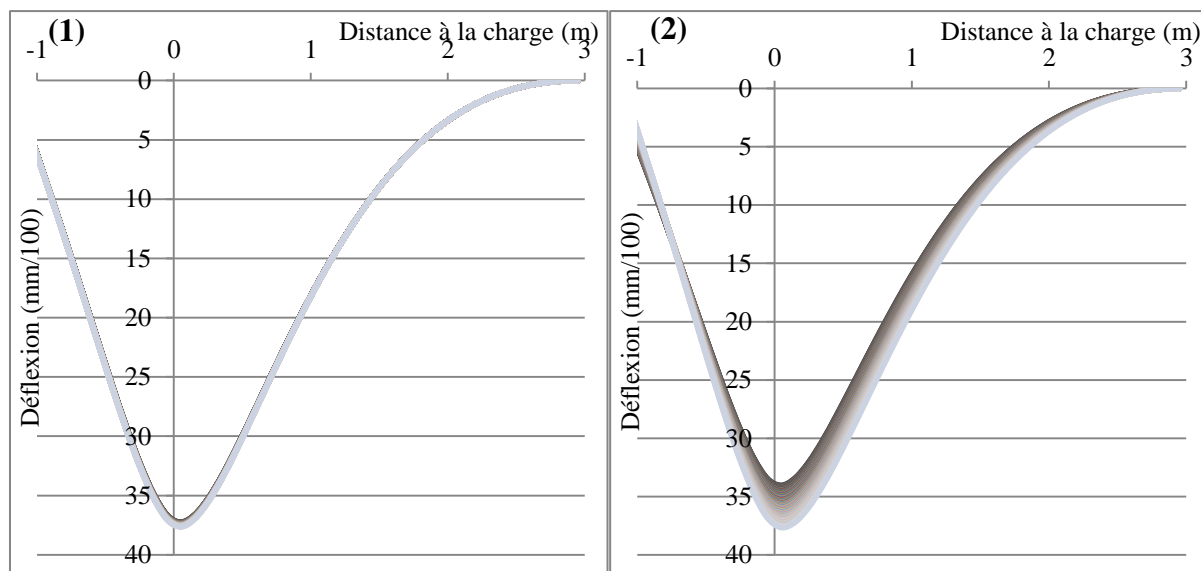


Figure D-10 : Simulation de bassins de déflexion mesurés par le curviamètre sur une chaussée bitumineuse dont le module d'une couche varie – (1) Variation du module de la couche bitumineuse – (2) Variation du module de la plateforme.

D.2.2 Indicateurs classiques de la mesure de déflexion

La première étape a consisté à étudier l'effet des variations de modules des couches sur les indicateurs classiques de la mesure de déflexion. Le même cheminement que précédemment a été suivi.

La Figure D-11 présente l'évolution le long de l'itinéraire des indicateurs normalisés : la déflexion maximale, le rayon de courbure et la valeur maximale de la pente. Ces indicateurs ont été normalisés par rapport à la valeur de référence de l'indicateur obtenue sur la chaussée de référence (cf Tableau D-1). On notera que la déflexion normalisée atteint la valeur de 1 à des abscisses différentes pour les deux appareils. Cette différence est liée au principe de mesure de chaque appareil. Ainsi, la déflexion est supposée nulle à 3 m après l'essieu arrière dans le cas du curviamètre alors qu'elle est supposée nulle à 1.5 m avant cet essieu pour le déflectographe Flash.

La variation de module de la couche bitumineuse de +10 % à -7 % a très peu d'effet sur les mesures des appareils. Les indicateurs normalisés varient, autour de la valeur de référence de seulement 1 % pour la déflexion maximale et la pente et de 2 % pour le rayon de courbure. Les variations de module de la plateforme de +10 % à -12 % conduisent à des variations à peine plus importantes allant de 6 % à 8 % pour la déflexion maximale et la pente et de seulement 4 % pour le rayon de courbure. Ces variations sont peu significatives, compte tenu de la dispersion des mesures des appareils.

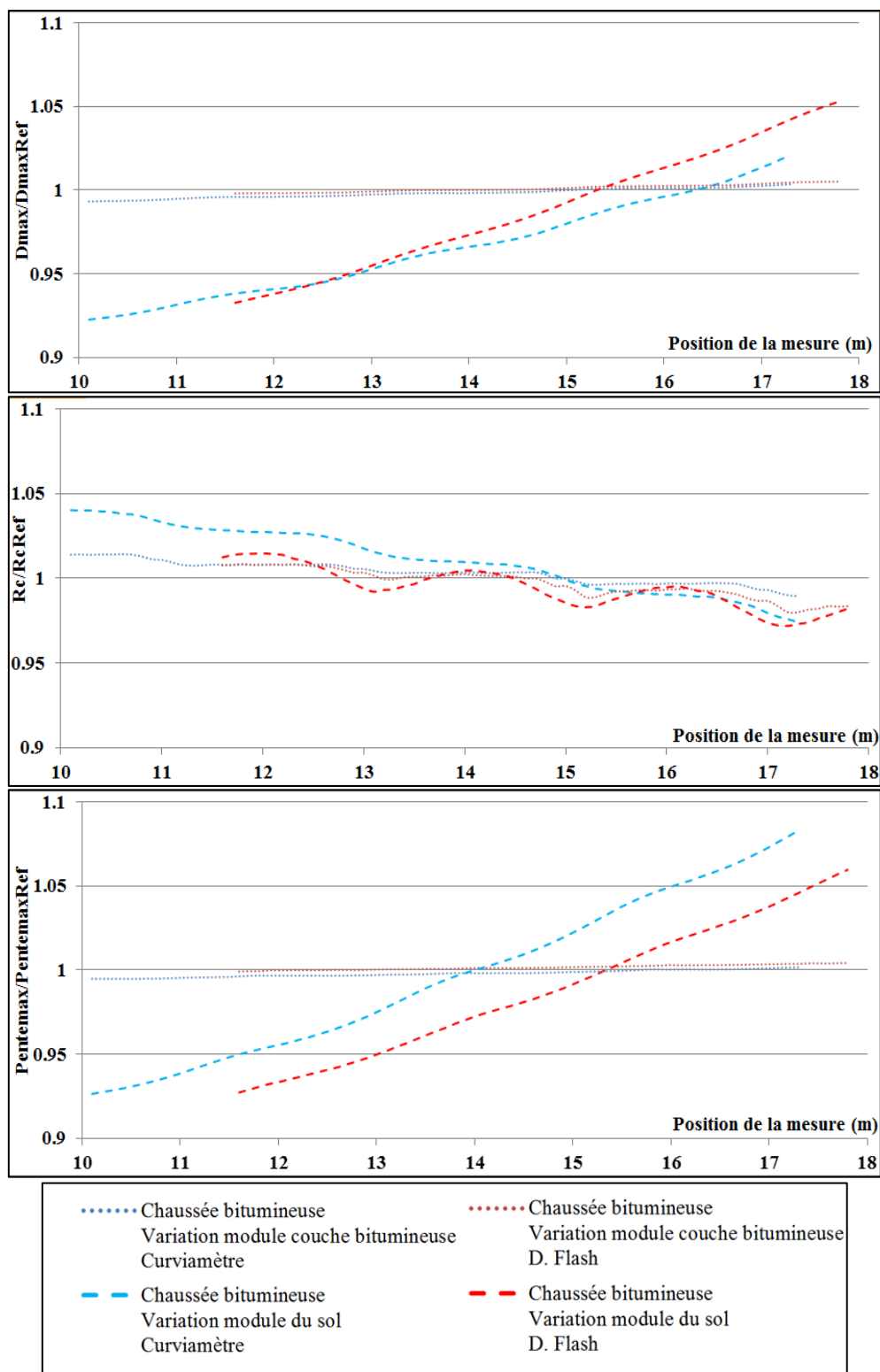


Figure D-11 : variations de la déflexion maximale, du rayon de courbure et de la pente sur la section bitumineuse

D.2.3 Influence des variations de module des couches sur les indicateurs obtenus à partir des mesures corrigées.

La procédure de correction a été appliquée sur les déflexions simulées au centre de chaque zone avec un module différent (cinq bassins de déflexion ont été simulés à chaque fois). La Figure D-12 présente des exemples de bassins simulés mesurés par le curviamètre et le déflectographe pour un changement de la couche bitumineuse (1) et de la plateforme (2), à la fin de la zone de mesure. Le bassin de référence sous jumelage standard (rouge) a été déterminé pour une structure homogène avec un module de 8400 MPa pour la couche bitumineuse, ou un module de 44 MPa pour la plateforme. Sans correction, les bassins obtenus avec le curviamètre et le déflectographe sont assez éloignés du bassin de référence (écarts de 15 mm/100 et 10 mm/100 respectivement pour la déflexion maximale, et forme de bassin peu réaliste). Comme précédemment, la procédure de correction a permis d'obtenir des déflexions maximales beaucoup plus proches du bassin de référence, et des formes de bassins de déflexion symétriques.

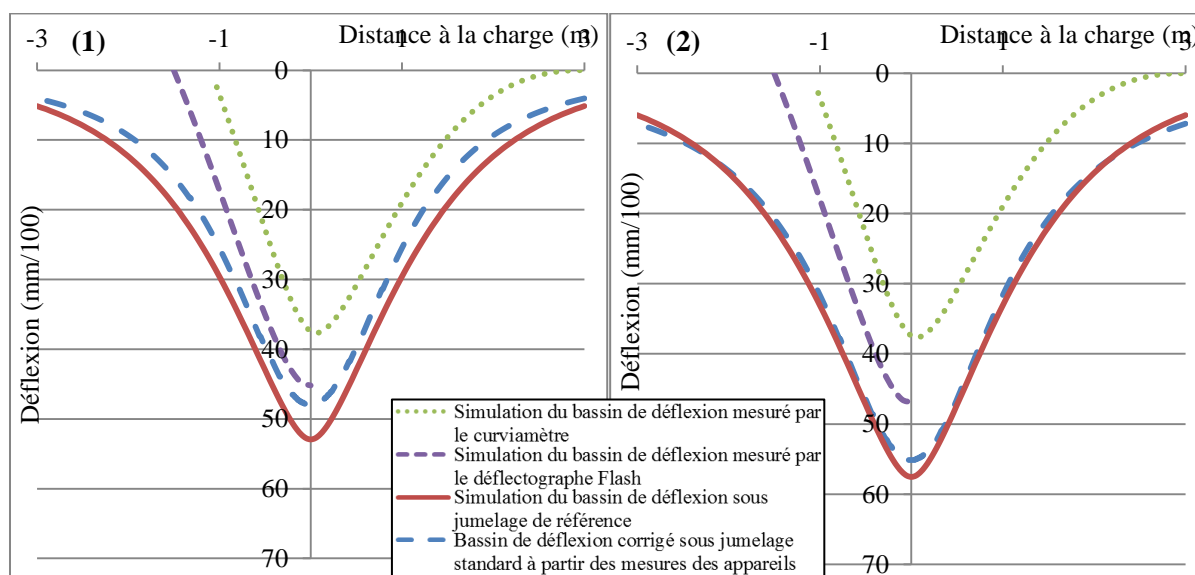


Figure D-12 : Comparaison de bassins de déflexion calculés pour le curviamètre et le déflectographe Flash avec le bassin de référence – (1) Changement de module de la couche bitumineuse – (2) Changement de module de la plateforme.

Les valeurs des différents indicateurs classiques (Dmax, Rc, Pente, BLI, MLI et LLI) obtenues à partir des déflexions corrigées sont données dans le Tableau D-10. Elles ont été normalisées par les valeurs de référence correspondantes (Tableau D-1). Les indicateurs obtenus pour un changement de module de la couche bitumineuse n'ont pas été présentés, car ils restent constants sur toute la section (compte tenu des très faibles écarts des bassins de déflexion). Seuls les indicateurs obtenus pour différents modules de la plateforme (56 MPa, 52 MPa, 48 MPa et 44 MPa) sont donnés. On peut voir que :

- la déflexion maximale est l'indicateur qui varie le plus (écart de 14 % pour un module de la plateforme de 44 MPa). Cette variation est plus importante que dans le cas sans

Annexe D : Etude de sensibilité des indicateurs classiques à la présence de défauts

correction, mais reste inférieure au seuil de 20 %, qui permet d'indiquer que 2 mesures sont significativement différentes avec une probabilité supérieure à 99 %. Les variations des autres indicateurs restent toutes inférieures à 5 % y compris pour l'indice LLI, supposé caractériser les couches profondes de la chaussée et la plateforme. Il semble donc tout aussi difficile de détecter des variations de portance de la plateforme sur la base des mesures corrigées.

Tableau D-10 : Indicateurs de la mesure de déflexion calculés à partir des mesures corrigées, pour des variations locales du module de la plate-forme

| | | $\frac{D_{maxC}}{D_{maxRefC}}$ | $\frac{Rc_C}{Rc_{RefC}}$ | $\frac{Pente_{maxC}}{Pente_{maxRefC}}$ | $\frac{BLI_C}{BLI_{RefC}}$ | $\frac{MLI_C}{MLI_{RefC}}$ | $\frac{LLI_C}{LLI_{RefC}}$ |
|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Changement de la plateforme | Module de la plateforme à 56 MPa | 0.96 | 0.99 | 0.96 | 1.00 | 0.98 | 0.95 |
| | Module de la plateforme à 52 MPa | 1.00 | 1.01 | 1.00 | 0.99 | 1.00 | 1.00 |
| | Module de la plateforme à 48 MPa | 1.10 | 0.98 | 1.01 | 1.02 | 1.01 | 1.01 |
| | Module de la plateforme à 44 MPa | 1.14 | 0.95 | 1.04 | 1.05 | 1.04 | 1.04 |

D.2.4 Bilan sur la sensibilité des indicateurs de déflexion à un défaut local de la structure de chaussée.

Dans cette partie, on a étudié l'effet sur la déflexion de défauts locaux (baisse de module) et la sensibilité de différents indicateurs à ce type de défauts.

On s'est intéressé à des variations locales des modules de la couche de base bitumineuse et de la plateforme, dans le cas d'une chaussée bitumineuse épaisse. Des variations progressives de ces modules, par zones de 2 m, ont été simulées. On a montré que pour la structure étudiée, les indicateurs classiques de la mesure de déflexion sont très peu sensibles à un changement du module de la couche bitumineuse. Un changement du module de la plateforme conduit à des variations un peu plus importantes des indicateurs (de l'ordre de 10 %). La correction des mesures de déflexion ne permet pas d'améliorer ces résultats.

Ces études montrent qu'un endommagement localisé est difficilement détectable par le déflectographe et le curviamètre, compte tenu de leurs performances métrologiques.

Titre : Nouvelles utilisations des mesures de bassins de déflexion pour caractériser l'état structurel des chaussées

Mots clés : Auscultation des chaussées, Essai non destructif, Bassins de déflexion, Correction des mesures de déflexion, indicateurs optimisés

Résumé : L'évaluation des caractéristiques structurelles des chaussées permet l'optimisation de leur maintenance. La mesure de déflexion est une mesure de base de cette évaluation. Aujourd'hui, seuls la déflexion maximale et le rayon de courbure sont analysés. Pourtant, le curviamètre et le deflectographe relèvent le bassin de déflexion complet dont l'analyse permettrait d'extraire des paramètres plus sensibles à l'endommagement des chaussées. Actuellement, l'interprétation des mesures est seulement qualitative et aucun calcul inverse de l'état de dommage de la structure n'est réalisé. La thèse vise à améliorer l'interprétation des mesures de déflexion. Le fonctionnement des appareils a montré que leurs hypothèses de mesure conduisent à des biais de mesure. Pour pallier ce problème, une procédure de correction des mesures a été mise en place. La comparaison avec des bassins théoriques a

montré que la méthode de correction était satisfaisante. Ensuite, une étude numérique visant à déterminer la sensibilité du bassin de déflexion à la présence de différents défauts a été conduite. Celle-ci a montré que les indicateurs classiques de la mesure de déflexion étaient peu sensibles à un endommagement dans la chaussée. Une méthodologie a donc été développée pour la création d'indicateurs optimisés à un type de défauts spécifiques. L'étude sur cas théoriques a conduit à l'obtention de résultats concluants. L'ensemble de ces travaux a ensuite été validé sur sites expérimentaux pour des mesures de répétabilité, mais également sur site avec la présence avérée de défauts. Finalement, la thèse a envisagé l'utilisation des travaux précédents sur des mesures réelles recueillies sur itinéraire.

Titre : New uses of deflection bowls measurements to characterize the structural conditions of pavements.

Mots clés : Pavement monitoring, Non-destructive testing, deflection bowls, Correction of deflection measurements, Optimized indicators.

Résumé : The evaluation of the structural characteristics of pavements is involved in their maintenance. The measurement of deflection is a key indicator of this evaluation. Currently, only the maximum deflection and the radius of curvature are analyzed. However, the curviameter and the deflectograph are able to record the whole deflection bowl and the parameters deduced from this measurement could help to better characterized damages on pavements. The interpretation of the measurements is only qualitative and back-calculation of pavement layer moduli gives unsatisfactory results. The thesis aims to improve the interpretation of deflection measurements. The working principle of these apparatus and the measurement assumptions introduce several measurement biases.

To overcome these issues, a correction process has been developed. The comparison with theoretical basins has given satisfactory results on bituminous or flexible pavements. Then, a numerical study has been conducted to determine the influence of pavements damages on the deflection measurement. By this study, it has been showed that the usual indicators of the deflection measurement are not able to detect all damages. So, a methodology has been developed in order to create an optimized indicator specified to a special defect. A study on numerical results has been conducted to validate the implementation of these indicators. Then, the correction method and these new indicators have been tested on experimental sites with and without damages. At last, the research works have been studied at network level.