



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Corrélation entre déflexions FWD et Benkelman

Korrelation zwischen FWD- und Benkelmandeflektionen

Correlation between FWD and Benkelman deflections

Infralab SA
Robert Braber, Responsable du département Auscultation
Anthony Gautier, Ingénieur Auscultation

**Projet de recherche VSS 2011/503 sur demande de l'Association Suisse
des Professionnels de la Route (VSS)**

Octobre 2017

1618

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Corrélation entre déflexions FWD et Benkelman

Korrelation zwischen FWD- und Benkelmandeflektionen

Correlation between FWD and Benkelman deflections

Infralab SA
Robert Braber, Responsable du département Auscultation
Anthony Gautier, Ingénieur Auscultation

**Projet de recherche VSS 2011/503 sur demande de l'Association Suisse
des Professionnels de la Route (VSS)**

Impressum

Instance de recherche et équipe de projet

Direction du projet

Robert Braber

Membres

Anthony Gautier

Commission d'experts responsable

Commission d'experts 4.1 : Bemessung Erdbau - Oberbau

Commission de suivi

Président

Martin Horat, Tiefbaument der Stadt Zürich

Membres

Mehdi Ould-Henia, nibuXs

Nicolas Bueche, nibuXs

Erhard Kählin, SACR

Frédéric Stoppa, Astra

Martin Arraigada, EMPA

Auteur de la demande

Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Source

Le présent document est téléchargeable gratuitement sur <http://www.mobilityplatform.ch>.

Table des matières

Impressum	4
Résumé	7
Zusammenfassung	8
Summary	9
1 Objectifs du rapport de recherche	11
1.1 Contexte	11
1.2 Description du problème	11
1.3 Résultats attendus	11
2 Description des matériels	13
2.1 Poutre Benkelman.....	13
2.1.1 Introduction.....	13
2.1.2 Mesures à la poutre Benkelman	13
2.1.3 Correction des mesures	14
2.2 Falling Weight Deflectometer (FWD)	18
2.2.1 Introduction.....	18
2.2.2 Mesures au FWD	19
2.2.3 Exploitation des mesures	21
2.2.4 Correction des mesures	21
2.3 Répétabilité / reproductibilité.....	29
2.3.1 Définitions.....	29
2.3.2 Répétabilité	29
2.3.3 Reproductibilité	30
2.4 Synthèse	36
3 Corrélations existantes FWD – Benkelman.....	37
4 Mesures comparatives FWD - Benkelman.....	41
4.1 Programme de mesures.....	41
4.2 Méthodologie de mesures.....	42
4.3 Comparaison des déflexions brutes.....	43
4.4 Comparaison des déflexions déterminantes.....	48
5 Diagramme de renforcement FWD	53
5.1 Etablissement du diagramme de renforcement FWD	53
5.2 Comparaison des renforcements entre Benkelman et FWD	55
5.3 Mesures FWD avant et après renforcement	58
5.3.1 Programme de mesures.....	58
5.3.2 Comparaison des déflexions avant et après renforcement	58
5.3.3 Comparaison avec le diagramme de renforcement FWD.....	61
6 Conclusions.....	65
6.1 Mesures comparatives Benkelman - FWD	65
6.2 Diagramme de renforcement FWD	66
6.3 Propositions pour la suite de recherche.....	66
Annexes	67
Glossaire	107
Bibliographie	109
Clôture du projet	111

Index des rapports de recherche en matière de route	115
--	------------

Résumé

Les mesures de déflexions permettent de définir la qualité portante d'une chaussée. Couplées à un trafic prévisionnel pour une durée d'utilisation de 10 ou 20 ans, la norme SN 640 733b permet au moyen d'un diagramme de renforcement de savoir si la chaussée est suffisamment dimensionnée ou dans le cas contraire de définir l'épaisseur de renforcement nécessaire pour supporter le trafic prévisionnel.

Ce diagramme de renforcement existe actuellement pour les mesures de déflexions à la poutre Benkelman et au Défectographe Lacroix. Ce mandat de recherche a pour objectif de déterminer une corrélation entre la déflexion centrale FWD et la déflexion mesurée avec la poutre Benkelman, puis d'établir, à partir de cette corrélation, un diagramme de renforcement FWD qui pourrait être introduit dans la norme SN 640 733b.

Dans la littérature, de nombreuses corrélations existent entre les déflexions Benkelman et FWD. Cependant, ces corrélations sont généralement peu documentées et ne tiennent pas compte des conditions de mesure en Suisse ni des spécificités des normes suisses, comme la correction en température et la correction saisonnière des déflexions.

Les investigations menées dans le cadre de ce mandat ont démontré que la corrélation entre les déflexions brutes Benkelman et FWD est insuffisante, et ceci pour les raisons suivantes : différence dans la méthode de mesure entre les deux appareils, faible reproductibilité des déflexions Benkelman et fiabilité de l'appareil de mesure Benkelman utilisé dans le cadre de ce projet.

En revanche, la corrélation des déflexions déterminantes FWD et Benkelman est plus convaincante. Le fait de lisser les déflexions, en additionnant la moyenne et 2 écart-types par zone homogène, permet de réduire l'influence défavorable de déflexions divergentes et d'aboutir à la corrélation suivante : $dv_{BB} = 1.19 \cdot dv_{FWD} + 15.5$ (déflexions déterminantes dv en [1/100 mm], charge 50 kN).

Cette corrélation a été utilisée pour établir un diagramme de renforcement pour le FWD. L'utilisation de ce diagramme a montré des résultats encourageants. Les épaisseurs de renforcement calculées à partir du diagramme de renforcement nouvellement établie pour le FWD sont proches de celles calculées avec la poutre Benkelman. Par ailleurs, les mesures FWD effectuées avant et après renforcement ont révélé des résultats cohérents, avec des gains de déflexions mesurés comparables aux gains théoriques issus du nouveau diagramme de renforcement FWD.

Compte tenu des incertitudes liées à la comparaison entre les déflexions Benkelman et FWD, un doute existe sur la robustesse du diagramme de renforcement établi. Avant d'être introduit dans la norme SN 640 733b, des campagnes de mesures complémentaires avant et après renforcement au FWD devraient être effectuées, soit pour tester et valider le diagramme de renforcement établi dans ce rapport, soit pour établir un nouveau diagramme de renforcement FWD sans passer par une corrélation Benkelman – FWD.

Zusammenfassung

Deflektionsmessungen werden verwendet, um die Tragfähigkeit einer Fahrbahn zu bestimmen. Gekoppelt mit einer Verkehrsprognose für eine Lebensdauer von 10 bis 20 Jahren, erlaubt es die Norm SN 640 733b, mit Hilfe eines Verstärkungs-Diagramms, abzuklären ob die Strasse ausreichend dimensioniert ist oder nicht. Andernfalls erlaubt sie es, die benötigte Verstärkungsdicke des projektierten Verkehrsaufkommens zu definieren.

Dieses Verstärkungs-Diagramm besteht derzeit für Deflektionsmessungen mit dem Benkelmanbalken und dem Lacroix Deflektographen. Dieses Forschungsprojekt hat zum Ziel, eine Korrelation zwischen zentralen FWD- und Benkelmandeflektionen zu bestimmen, und um ein FWD Verstärkungs-Diagramm zu erstellen, welches in der Norm SN 640 733b eingeführt werden könnte.

Es existieren mehrere Korrelationen zwischen Benkelman- und FWD Deflektionsmessungen in der Literatur. Allerdings sind diese in der Regel schlecht dokumentiert und berücksichtigen nicht die spezifischen Messbedingungen in der Schweiz oder die Besonderheiten der Schweizer Normen, wie zum Beispiel die Korrektur bezüglich der Temperatur und der Jahreszeit.

Der Forschungsauftrag hat gezeigt, dass die Korrelation zwischen den Rohdaten der Benkelman- und FWD Deflektionsmessungen nicht ausreichend ist, und dies aus folgenden Gründen: Unterschiede im Messverfahren zwischen den beiden Geräten, geringen Reproduzierbarkeit der Benkelmandeflektionen und die Zuverlässigkeit des in diesem Auftrag verwendeten Benkelman Messgerätes.

Allerdings ist die Korrelation zwischen den massgebenden FWD und Benkelman Deflektionsmessungen überzeugender. Das Glätten der Messungen, indem der Mittelwert und 2 Standardabweichungen pro homogener Fläche addiert werden, reduziert die negativen Auswirkungen der divergierenden Deflektionen und führt zu folgender Korrelation: $dv_{BB} = 1.19 \cdot dv_{FWD} + 15.5$ (dv in [1/100 mm] Last von 50 kN).

Diese Korrelation wurde verwendet, um ein Verstärkungs-Diagramm für den FWD zu erstellen. Die Verwendung dieses Diagrammes zeigte ermutigende Ergebnisse. Die berechneten Verstärkungsdicken des FWD Diagrammes sind jenen des Benkelman Diagrammes ähnlich. Darüber hinaus haben die FWD-Messungen vor und nach der Verstärkung konsistente Ergebnisse ergeben. So ist die Zunahme der gemessenen Deflektionen mit der theoretischen Zunahme aus dem neuen FWD Diagramm vergleichbar.

In Anbetracht der Unsicherheiten in Bezug auf den Vergleich zwischen den FWD- und den Benkelman-Messungen gibt es Zweifel an der Robustheit des Verstärkungs-Diagramms. Bevor dieses in die Norm SN 640 733b eingeführt wird, sollten zusätzliche Feldversuche vor und nach der Verstärkung gemacht werden. Dies um entweder das Diagramm zu testen und zu validieren, oder um ein neues FWD Diagramm zu etablieren, welches nicht auf einer Benkelman - FWD Korrelation basiert.

Summary

In order to define the bearing capacity of a road, deflection measurements should be conducted. By considering the forecasted traffic for the next 10 or 20 years and the deflections, the standard SN 640733b allows, through a reinforcement diagram, to define whether the road is sufficiently designed. If this is not the case, it allows to define the required layer thickness of the reinforcement.

The reinforcement diagram does exist for deflection measurements with a Benkelman beam and for the deflectograph Lacroix. The objective of this research project is to find a correlation between the FWD deflection and the Benkelman deflections and through this correlation, establish a reinforcement diagram for the FWD deflection which can be inserted into the standard SN 640 733b.

Numerous correlations between Benkelman and FWD deflections can be found in literature. However, these correlations are generally not well documented and don't consider the measuring conditions in Switzerland nor the specifications in the swiss standards, like the temperature seasonal correction of the deflections.

The research project has shown that the correlation between the raw deflections of the Benkelman and FWD is insufficient for the following reasons: difference in measuring method between the two devices, low reproducibility of Benkelman deflections and the reliability of the Benkelman device used in this project.

However, the correlation between the determinative deflections of the Benkelman and the FWD are more eloquent. When the average deflection is summed up with 2 standard deviations, the deflections are somehow smoothened. As a consequence, the influence of deviating deflections is minimized. The following relationship was found: $dv_{BB} = 1.19 \cdot dv_{FWD} + 15.5$ (determinative deflections dv in [1/100 mm], load 50 kN).

This correlation was used to establish the reinforcement diagram for the FWD. The application of the diagram gave promising results. The reinforcement thicknesses, as defined through the new FWD reinforcement diagram, were close to those defined through Benkelman deflections. Furthermore, the FWD measurements before and after reinforcement revealed coherent results. The gain in the measured deflections corresponded to the theoretical gain defined through the reinforcement diagram.

Considering the uncertainties related to the correlation between the raw deflections of the Benkelman and the FWD, a doubt regarding the robustness of the FWD reinforcement diagram persists. Before we can introduce these results into the standard SN 640 733b, additional measurements with the FWD (before and after a reinforcement) should be conducted, in order to test and validate the FWD reinforcement diagram as defined in this report or to establish a new FWD reinforcement diagram which will not take into account a correlation between the Benkelman and FWD.

1 Objectifs du rapport de recherche

1.1 Contexte

Les mesures de déflexions permettent de définir la qualité portante d'une chaussée. Couplées à un trafic prévisionnel pour une durée d'utilisation de 10 ou 20 ans, la norme SN 640 733b [1] permet au moyen d'un diagramme de renforcement de savoir si la chaussée est suffisamment dimensionnée ou dans le cas contraire de définir l'épaisseur de renforcement nécessaire pour supporter le trafic prévisionnel.

En Suisse, il existe un certain nombre d'appareils pour effectuer les mesures de déflexions. Trois sont répandus et utilisés dans toute la Suisse :

- Poutre de Benkelman
- Défectographe Lacroix
- Défectomètre à masse tombante (Falling Weight Deflectometer ou FWD)

La poutre de Benkelman, développée par A.C. Benkelman au début des années 50, est décrite dans la norme SN 670 362a. En 1956, M.J. Lacroix, intègre la poutre de Benkelman dans un camion : le défectographe Lacroix est né.

En 1965, M. Bretonniere publie dans le Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers un article intitulé «Etude d'un défectomètre à boulet» qui décrit pour la première fois le principe de mesure d'un défectomètre à masse tombante (Falling Weight Deflectometer). Cet appareil est ensuite repris et optimisé à l'Université Technique de Danemark. Le FWD a été introduit, pour la première fois en Suisse, en 1992.

1.2 Description du problème

Dans la norme SN 640 733b [1] « Entretien des chaussées, Renforcement de superstructures de chaussées avec revêtements bitumineux à l'aide de mesures de déflexion » figurent deux diagrammes de renforcement. Les diagrammes de renforcement pour la poutre Benkelman et le défectographe Lacroix sont basés sur le rapport de recherche n°155, mandat de recherche 4/85 « Oberbauverstärkung von flexiblen Strassen » publié en 1988 [6].

La première parution de la norme SN 640 733b [1] date de 1993. Le premier diagramme de renforcement est basé sur la déflexion déterminante d_v relevée par la poutre Benkelman tandis que le deuxième diagramme est basé sur celle relevée par le défectographe Lacroix. Toutefois, pour le défectomètre à masse tombante FWD (Falling Weight Deflectometer), largement utilisé en Suisse depuis 1992, il n'existe pas de diagramme de renforcement.

1.3 Résultats attendus

La recherche doit permettre d'obtenir une corrélation entre la déflexion centrale FWD et la déflexion mesurée avec la poutre Benkelman, soit l'appareil de référence en Suisse pour les mesures de déflexions [2]. La corrélation obtenue permettra d'établir un diagramme de renforcement FWD qui pourra être introduit dans la norme SN 640 733b après vérification en faisant des mesures FWD avant et après renforcement. Un diagramme de renforcement FWD permettra de définir, d'une manière normalisée et rapide, le renforcement d'une chaussée auscultée. Les bénéficiaires sont le pouvoir public et les entreprises privées.

2 Description des matériels

2.1 Poutre Benkelman

2.1.1 Introduction

La poutre Benkelman permet de relever les déflexions des chaussées souples et les couches de fondation stabilisées ou non. Elle sert d'étalon pour tout autre appareil de mesure de déflexion (Lacroix, FWD, ...).



Fig 2.1 – Poutre Benkelman (source : IMP Baustest AG)

2.1.2 Mesures à la poutre Benkelman

La poutre Benkelman est décrite en détail dans la norme SN 640 362a [2]. Les caractéristiques principales sont répertoriées dans ce chapitre complétées avec les informations obtenues suite à la recherche bibliographique.

La poutre Benkelman permet de mesurer la déflexion des chaussées souples sous l'application d'une charge de 50kN sur une roue jumelée d'un camion statique. En réalité, on ne mesure pas la déflexion de la chaussée mais plutôt la réflexion ou déflexion élastique de retour de la chaussée puisqu'on relève le déplacement vertical du comparateur entre le moment où le comparateur donne une valeur stable (A_0) et le moment où le camion a avancé lentement de 5m et le comparateur donne une valeur stable ($A_{5,0}$).

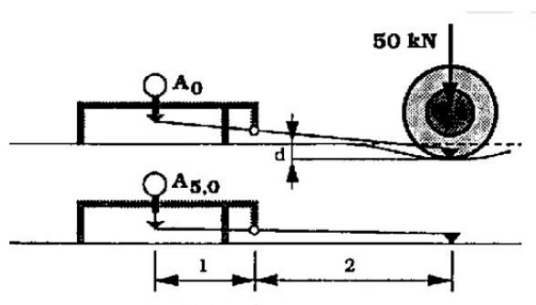


Fig 2.2 – Principe de mesures à la poutre Benkelman [2]

La déflexion (élastique de retour) d est donc :

$$d = 2 \cdot (A_0 - A_{5,0})$$

Eq. 2.1

Selon la norme SN 670 362a, la précision de mesure de l'appareil est de 5/100 mm. L'espace entre les deux pneus jumelés doit être au moins 20 mm. La pression dans les pneus doit être de 700kPa (7 bar).

2.1.3 Correction des mesures

Charge

La vitesse d'application est d'environ 25 s [7]. La charge d'essieu arrière du camion de l'essai doit être de 100 kN $\pm$ 2kN.]. Une charge d'essieu entre 70 et 120 kN est admise « exceptionnellement » mais requiert une correction de la déflexion relevée au moyen de la formule suivante :

$$d_{100} = \frac{100}{L_x} \cdot d_x$$

Eq. 2.2

Où :

d_{100}	déflexion équivalente à une charge d'essieu de 100 kN	[1/100 mm]
d_x	déflexion mesurée sous la charge réelle L_x	[1/100 mm]
L_x	charge de l'essieu arrière réelle	[kN]

La formule suppose une bonne linéarité entre la déflexion et une charge d'essieu comprise entre 70 et 120 kN, ce qui est utile si la charge d'essieu réelle s'écarte de la charge cible de 10 tonnes.

Cependant et dans les conditions des mesures Benkelman standard, cette correction théorique ne peut pas être testée puisque la charge sur l'essieu arrière du camion est fixée dès le début des mesures.

Température de la couche de surface

La température de la couche de surface doit être comprise entre 5 et 25°C. Si elle n'est pas comprise entre 15 et 20°C, il convient de corriger la déflexion avec la formule suivant :

$$d_{20} = d_T + (20 - T)$$

Eq. 2.3

Où

d_{20}	déflexion en 1/100 mm à 20°C	[1/100 mm]
d_T	déflexion mesurée pour la température de la couche de surface T	[1/100 mm]
T	température de la couche de surface	[°C]

On relève que la correction ne dépend pas de la déflexion mesurée mais uniquement de la température de la couche de surface.

Dans le rapport de recherche « Variations saisonnières de la déflexion sur les chaussées souples [8] de 1992, les auteurs (A. Jacot et F. Contausset), préconisaient déjà qu'une correction dépendant de la déflexion mesurée serait plus pertinente qu'une correction systématique de 1/100 mm par °C.

De plus, il serait plus judicieux de considérer la température dans l'enrobé plutôt qu'une température de la couche de surface.

Ligne d'influence

Selon SN 670 362a [2], la ligne d'influence est à définir pour chaque tronçon de mesure. La ligne d'influence permet de contrôler si les points d'appui de la poutre Benkelman se trouvent en dehors de la zone d'influence de la charge. Pour ce faire, il convient de relever la déflexion (élastique de retour) à 0.10m, 0.25m, 0.50 m, 1.0m, 2.5m et à plus de 5 m¹ et de les représenter dans un graphique. On trace la ligne d'influence en calculant les déflexions successives (d_i) comme suit

$$d_i = 2 \cdot (A_i - A_{5,0})$$

Eq. 2.4

Le graphique [Fig 2.3] est un exemple de deux lignes d'influence (ligne bleue et orange).

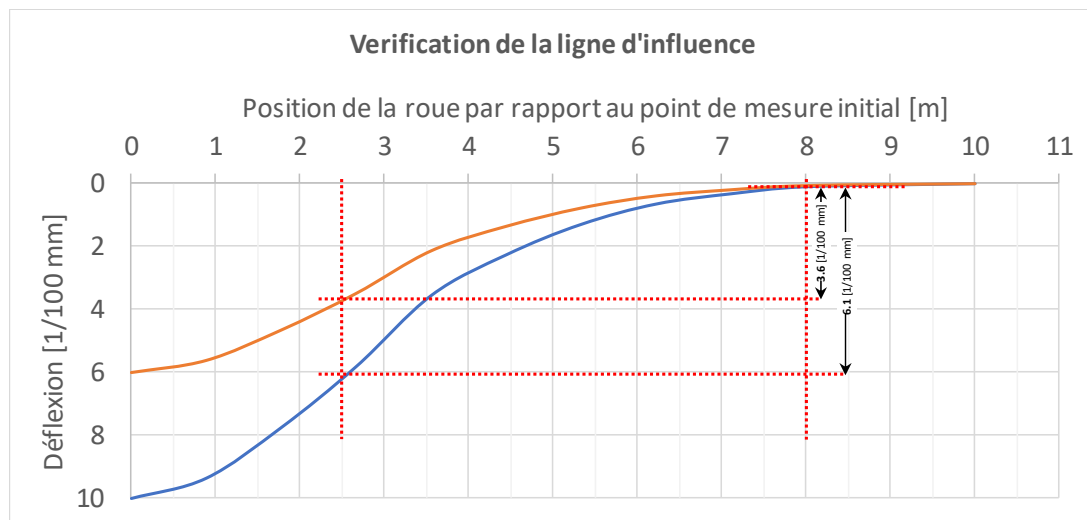


Fig 2.3 – Exemple d'une vérification de la ligne d'influence

Le graphique nous permet de relever la déflexion pour les positions de la roue à 2.5 m et à plus de 8 m. Si la différence entre les deux déflexions est inférieure à 4/100 mm, on peut admettre que les pieds de la poutre de Benkelman sont en dehors de la zone d'influence de la charge. Dans le cas contraire, la déflexion relevée doit être corrigée. Dans l'exemple ci-dessus, les déflexions relatives à la ligne d'influence bleue doivent être corrigées tandis que celles relatives à la ligne d'influence orange ne requièrent pas de correction.

La déflexion corrigée se calcule au moyen de la formule suivante :

$$d_r = 2 \cdot (A_0 - A_{8,0}) + 6.28 \cdot (A_{2,5} - A_{8,0})$$

Calcul de la
déflexion au point
de mesure

Correction selon
vérification de la ligne
d'influence

Eq. 2.5

Où :

d_r	déflexion élastique de retour corrigée	[1/100 mm]
A_0	lecture pour la roue sur le point de mesure	[1/100 mm]
$A_{2,5}$	lecture pour la roue à 2,5 m	[1/100 mm]

¹ Note : la mesure à plus de 8m n'est pas spécifiée dans la procédure de mesure de la ligne d'influence. Or, cette mesure est nécessaire pour calculer la déflexion corrigée [Eq. 2.5].

$A_{8,0}$ lecture finale (roue à plus de 8 m)

[1/100 mm]

En interprétant la formule ci-dessus [Eq. 2.5]:

- la première partie ($2 \cdot (A_0 - A_{8,0})$) permet de calculer la déflexion non-corrigée pour chaque point de mesure,
- la deuxième partie ($6.28 \cdot (A_{2,5} - A_{8,0})$) correspond à la correction issue de la vérification de la ligne d'influence.

La correction des déflexions suite à une vérification de la ligne d'influence n'a pas été prise en compte dans les mesures de déflexions Benkelman de ce rapport, et ceci pour les raisons suivantes :

- la vérification de la ligne d'influence n'a été effectuée que pour les trois derniers chantiers. Le prestataire effectuant les mesures Benkelman a déclaré ne pas faire cette vérification. Infralab a imposé cette vérification pour les trois derniers chantiers.
- après consultation auprès de plusieurs laboratoires suisses, il s'est avéré que peu de laboratoires effectuent systématiquement cette vérification.
- la norme comporte des zones d'ombre au sujet de la ligne d'influence :
 - o la correction de ($6.28 \cdot (A_{2,5} - A_{8,0})$) est applicable dès que la différence de lecture $A_{2,5} - A_{8,0}$ est supérieure à 4 [1/100 mm].
 - pour une différence de 3 [1/100 mm], aucune correction n'est appliquée, tandis que pour une différence de 4 [1/100 mm] la correction appliquée aux déflexions mesurées est de 25 [1/100 mm].
 - pour un tronçon, Chemin du Bois-Murat à Epalinges, la vérification a démontré qu'une correction de la déflexion à hauteur de 44 [1/100 mm] était requise résultant à des déflexions 63 % plus élevées en moyenne (112 au lieu de 68 [1/100 mm]).
 - o la mesure à plus de 8m n'est pas spécifiée dans la procédure de mesure de la ligne d'influence comme décrite dans la norme SN 670 362a. Or, cette mesure est nécessaire pour calculer la déflexion corrigée [Eq. 2.5].

Influence saisonnière

La norme pour le renforcement de superstructures (SN 640 733b [1]) tient compte de la variation des déflexions dans l'année en appliquant un facteur global de correction c sur les déflexions déterminantes [voir chapitre 4.4] qui évolue avec les saisons : le facteur est relativement faible au printemps et élevé en été, comme représenté sur la [Fig 2.4]. Les courbes dans cette figure s'inspirent du mandat de recherche 24/88 [8].

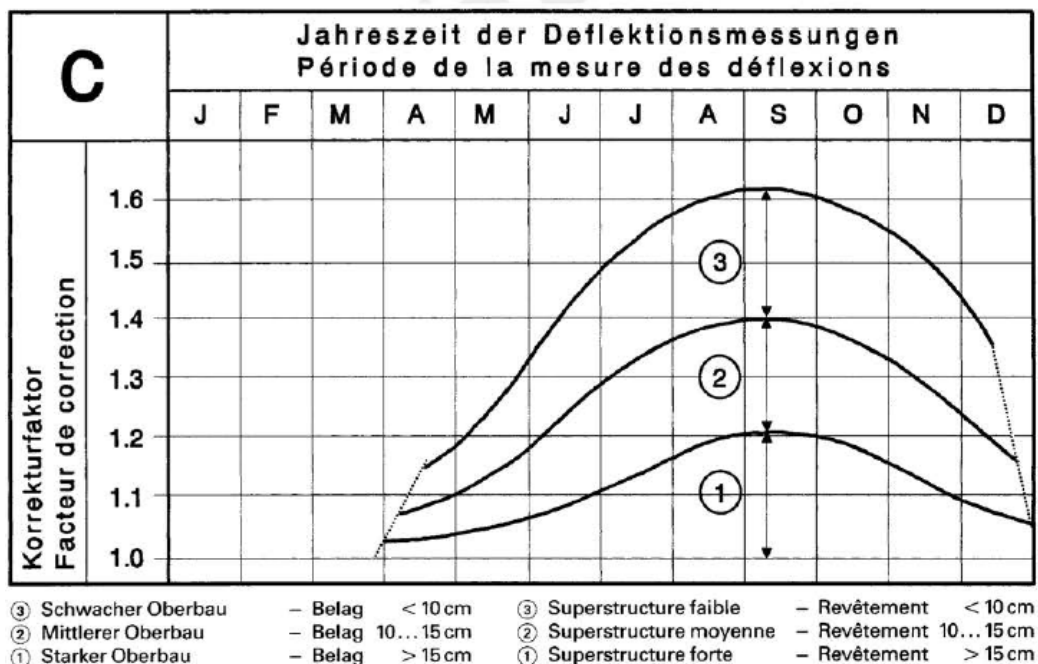


Fig 2.4 – Facteur de correction en fonction de la période de la mesure des déflexions [1]

Ensuite le facteur c dépend de l'épaisseur de la couche du revêtement : domaine 1, 2, et 3.

Afin de savoir si le facteur c se trouve dans la « partie supérieure » ou la « partie inférieure » d'un domaine, la norme donne les instructions du tableau 2.1.

Tab. 2.1 – Paramètres pour la détermination du facteur de correction c

Paramètre	Partie supérieure des domaines 1, 2 ou 3	Partie inférieure des domaines 1, 2 ou 3
Faïençage et/ou flaches	Fréquent	Peu marqué
Période de gel durant l'hiver précédent	Courte	Longue
Profondeur de pénétration du gel durant l'hiver précédent	Inférieure à la moyenne	Supérieure à la moyenne
Conditions hydrologiques avant les mesures	Mesures après une période sèche	Mesures après une période de pluie

2.2 Falling Weight Deflectometer (FWD)

2.2.1 Introduction

Le déflectomètre à masse tombante ou FWD (**F**alling **W**eight **D**eflectometer) est conçu pour mesurer le bassin des déflexions provoqué par une masse tombante appliquée sur une plaque en règle générale d'un diamètre de 30 cm.

Après la mise en station de la remorque au droit du point de mesure, la masse est libérée d'une hauteur variable provoquant une charge entre 7 et 120 kN. Le HWD (**H**heavy **W**eight **D**eflectometer), équipé d'un plus grand nombre de poids, permet d'appliquer une charge entre 30 et 320 kN. Le FWD est adapté à des structures routières souples, semi-rigides et rigides. Une utilisation sur des couches de fondation est possible mais peu fréquente en Suisse. Le HWD est plutôt adapté à des structures routières et aéroportuaires souples, semi-rigides et rigides.



Fig 2.5 – Matériel de mesure, ici le HWD (source : Infralab)

Le principe de mesure entre les deux appareils est identique. La seule différence est la capacité de chargement.

Même si l'appareil utilisé dans le cadre de ce mandat est un HWD, on appellera dans la suite de ce rapport l'ensemble des appareils « FWD ».

La hauteur de chute et la force appliquée sont fixées en fonction de la nature de la structure testée. Le fournisseur du FWD préconise des déflexions centrales (directement sous la plaque de charge) d'au moins 100 microns. En cas de déflexions centrales trop faibles, la charge sous la plaque peut être augmentée en augmentant soit la hauteur de chute soit le poids.

La transmission de la charge se fait par un ressort (buffer en caoutchouc) dont la constante permet de définir la durée du chargement. Les 15 géophones (dont un est au centre de la plaque) enregistrent la déformée longitudinale de la chaussée sur 2 mètres environ du point d'application de la charge.



Fig 2.6 – Positionnement de la plaque de mesure et des géophones du FWD (source : Infralab)

Pour les structures routières, les caractéristiques de chargement sont réglées de manière à obtenir une impulsion d'une durée de 28 ms, soit environ 34 Hz, correspondant à la durée de charge d'un poids lourd circulant à une vitesse moyenne d'environ 70 km/h.

2.2.2 Mesures au FWD

Au droit de chaque station, les déflexions sont enregistrées par les 9 à 15 géophones (exceptionnellement 7 géophones) répartis le long d'une poutre. Le premier géophone est situé au centre de la plaque de chargement, et le dernier à 2 m environ dans l'axe longitudinal et dans le sens des mesures. L'opérateur, qui contrôle tous les éléments sur l'écran de l'ordinateur de bord, fait exécuter au moins deux fois l'essai avant de valider la mesure.

A ce stade, on dispose de la demi-déformée [Fig 2.7] et [Fig 2.8] provoquée par un demi essieu standard, ainsi que de tous les paramètres nécessaires à l'exploitation future des résultats, par exemple :

- la pression de contact sous la plaque,
- la durée d'application de la charge en [ms]
- les déflexions enregistrées par les géophones

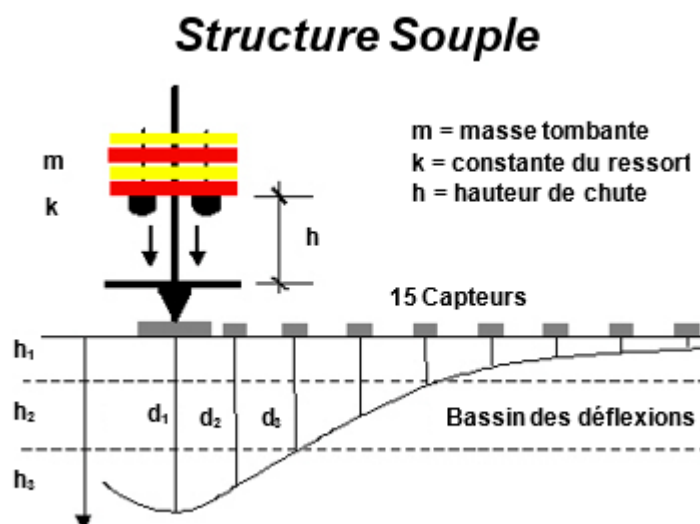


Fig 2.7 – Principe de mesures du bassin de déflexions sur chaussées souples

Un des avantages de l'appareil FWD par rapport à la poutre Benkelman, c'est qu'il est utilisable sur les chaussées rigides.

En effet, l'essai n'étant pas réduit à une seule mesure ponctuelle de la déflexion, les structures rigides discontinues (par exemple dalles béton) peuvent être testées au même titre que les chaussées souples. Les caractéristiques "de référence" de chaque dalle sont mesurées au centre. Au bord et sur le coin, les mêmes caractéristiques sont relevées afin de les comparer aux résultats de référence (centre). La technique de mesures au bord et au coin de dalle est représentée sur la [Fig 2.8].

La possibilité de mesurer simultanément de part et d'autre de la dalle chargée, permet de calculer par exemple la qualité du "transfert de charge" et la "déformation différentielle" au niveau du joint.

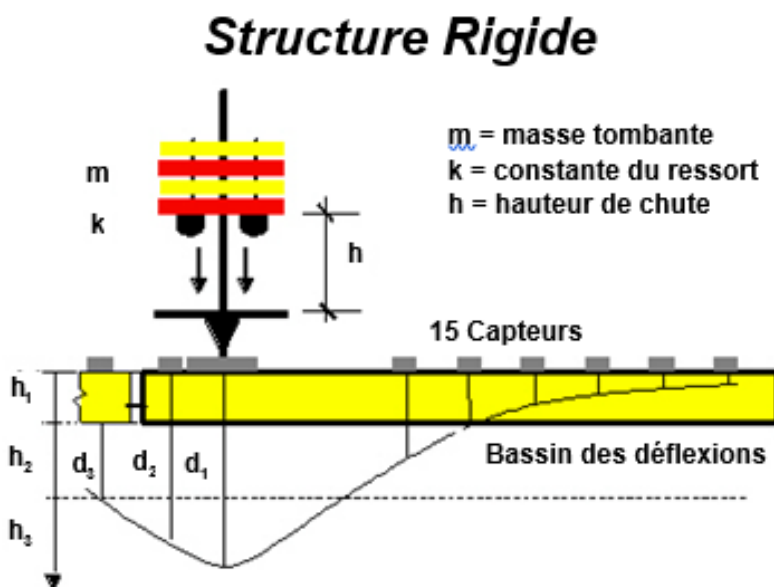


Fig 2.8 – Principe de mesures du bassin de déflexions sur chaussées rigides

2.2.3 Exploitation des mesures

Les utilisateurs d'une poutre de Benkelman exploitent principalement la déflexion centrale et accessoirement le bassin de déflexions.

Bien que le FWD soit conçu pour exploiter analytiquement l'entier de la déformée (9 à 15 déflexions sur environ 2 m de longueur) mesurée au droit de chaque station de mesure, il est possible d'exploiter uniquement la déflexion maximale, donc la déflexion directement sous la plaque.

Dans le cadre de ce projet de recherche, seule la déflexion maximale a été considérée.

Une exploitation analytique – empirique en termes de modules élastiques, contraintes et déformations à l'interface de chaque couche, vies résiduelles, épaisseur de renforcement, valeur PCN, transfert de charge entre deux dalles de béton etc n'est pas traitée dans ce rapport.

2.2.4 Correction des mesures

Intensité de la charge

Dans le cadre de ce mandat, une séquence de mesures au FWD était composé de 4 chutes avec des charges de 40, 40, 50 et 60 kN ce qui correspond à des pressions sous la plaque de mesure de 565, 565, 707 et 849 kPa. Cette séquence de chutes est précédée par une petite chute (appelée « seating drop »), non-comptabilisée, ayant pour objectif de stabiliser la plaque. Le FWD est équipé d'une plaque de mesure segmentée d'un diamètre de 30 cm. La force appliquée sur la plaque est mesurée par une cellule de charge.

La séquence de mesure dans le cadre de ce projet nous a permis d'étudier la linéarité des déflexions FWD mesurées par rapport à la charge sous la plaque.

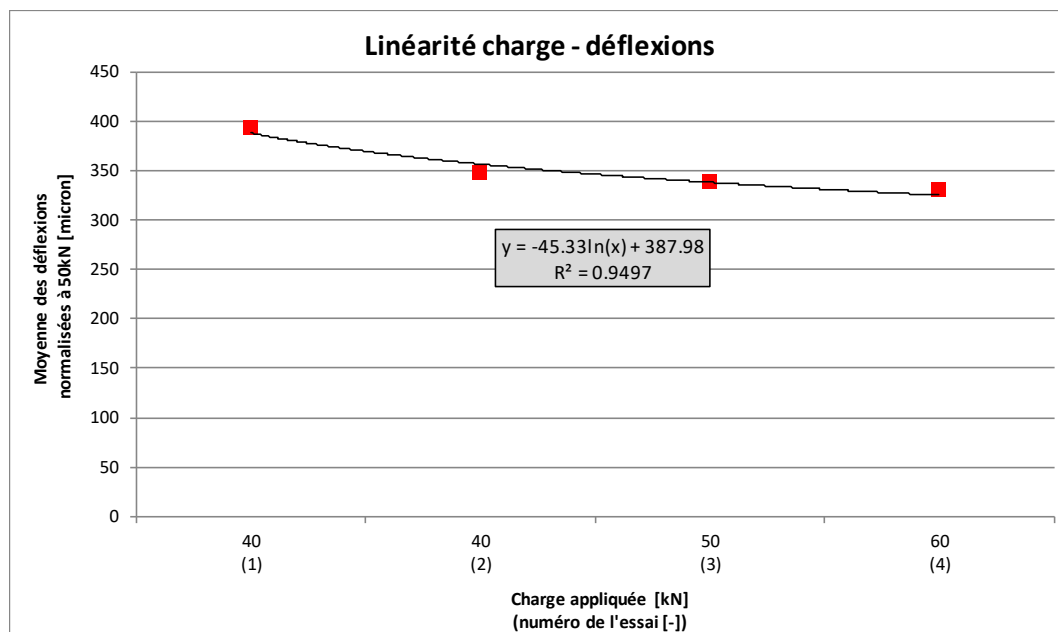


Fig 2.9 – Graphique de linéarité des déflexions en fonction de la charge appliquée

Tab. 2.2 – Linéarité des déflexions en fonction de la charge appliquée

Numéro de l'essai [-]	1	2	3	4
Charge [kN]	40	40	50	60
Déflexion normalisée à 50 kN [1/1000 mm]	392	348	338	330
Différence relative de déflexions entre 2 essais consécutifs		-11%	-3%	-2%

En analysant la séquence de 4 chutes, on observe une non linéarité des déflexions en fonction de la charge.

La différence relative de déflexions entre 2 essais consécutifs diminue avec le nombre d'essai effectué : celle-ci est de 11 % entre le 1^{er} et le 2^{ème} essai tandis qu'elle n'est que de 2% entre le 3^{ème} et 4^{ème} essai. Cette non-linéarité peut être expliquée par la viscoélasticité de la couche bitumineuse et/ ou par la non-linéarité du comportement du sol support vis-à-vis du niveau de chargement [26].

La non-linéarité des déflexions en fonction de la charge est connue. Les constructeurs préconisent un minimum de 3 essais par séquence. A partir du 3^{ème} essai, on peut considérer que la charge soit linéaire en fonction de la déflexion mesurée. De plus, la répétabilité des essais peut être évaluée.

En temps normal, seul le dernier essai est pris en compte dans l'exploitation des données. Dans le cadre de ce projet, les déflexions du 3^{ème} essai sont normalisées à une charge de 50kN selon la même formule que pour la poutre Benkelman [Eq. 2.2]

Fréquence d'application de la charge

Un FWD est censé appliquer une fréquence de charge simulant une charge de trafic se déplaçant à environ 75 km/h.

La formule suivante permet de corréler la fréquence avec la vitesse à laquelle une charge de trafic se déplace [10] :

$$f \text{ (Hz)} = 0.45 \cdot V \text{ (km/h)}$$

Eq. 2.6

La bonne pratique est donc d'avoir une fréquence d'application de charge la plus proche de 34Hz (équivalent à t=28ms). Cette fréquence dépend de la superstructure en place et des buffers du matériel.

La fréquence d'application de la charge a une influence sur les déflexions mesurées. Les mesures de reproductibilité [chapitre 2.3.3] permettent de corriger les déflexions et donc de tenir compte indirectement de l'influence des fréquences d'application de charge de chaque appareil participant aux essais croisés.

Température de l'enrobé

Le Federal Highway Administration a publié en juin 2000 un rapport [11] intitulé « Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement ». Un des objectifs du rapport de recherche était de développer un modèle permettant, à partir de la

température de la surface de la chaussée, de prédire la température d'une couche bitumineuse.

Le modèle développé a été intitulé BELLS, un acronyme des auteurs de la recherche : Baltzer, Ertman-Larsen, Lukanen et Stubstad.

Il existe deux modèles pour prédire la température de l'enrobé à une certaine profondeur : BELLS2 et BELLS3. Les deux modèles sont similaires au modèle de base, le BELLS.

- BELLS2 – utilisé pour les mesures selon le protocole LTPP (Long Term Pavement Performance). Les mesures de déflexions effectuées selon ce protocole prennent plus de temps (environ 3 min contre 40 – 60 s pour des mesures « standard ») et la distance entre les points de mesure n'est que de 7.6m. Par conséquent, le véhicule tracteur fait de l'ombre au point de mesure suivant pendant environ 6 min. Ainsi un modèle a été développé pour des mesures respectant ce protocole, prenant en compte le problème précité de refroidissement du point de mesure suivant.
- BELLS3 – utilisé pour des mesures de déflexions standards dont font parties les mesures effectuées dans le cadre de ce mandat.

La formule du modèle BELLS3 est la suivante :

$$T_D = 0.95 + 0.892 * IR + \{\log(d) - 1.25\} \{-0.448 * IR + 0.621 * (1 - jour) + 1.83 * \sin(hr_{18} - 15.5)\} + 0.042 * IR * \sin(hr_{18} - 13.5)$$

Eq. 2.7

Où

T_D	température de l'enrobé à une profondeur d	[°C]
IR	température de la surface de la chaussée, mesurée au moyen d'un thermomètre infrarouge	[°C]
d	Profondeur à laquelle la température doit être définie	[mm]
1-jour	Température moyenne de l'air, 1 jour avant les mesures	[°C]
sin	Fonction sinusoïdale pour un système horaire de 18 h, avec 2π radians égal à un cycle de 18h.	[-]
hr18	Heure de mesures, dans une horaire de 24h, mais en calculant un cycle avec un sinus considéré à -1 pendant 6h [Fig 2.10]	[-]

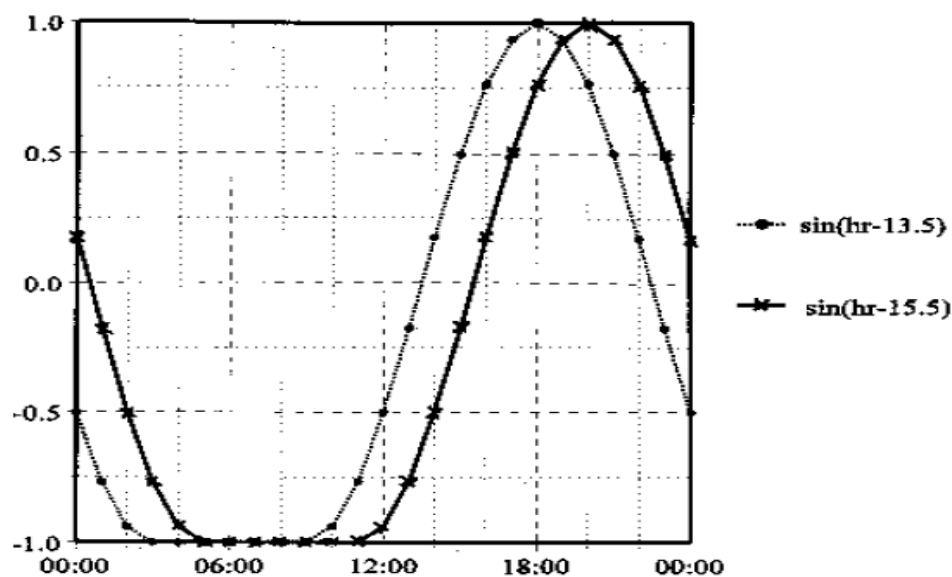


Figure 11. 18-hr cycle sine functions.

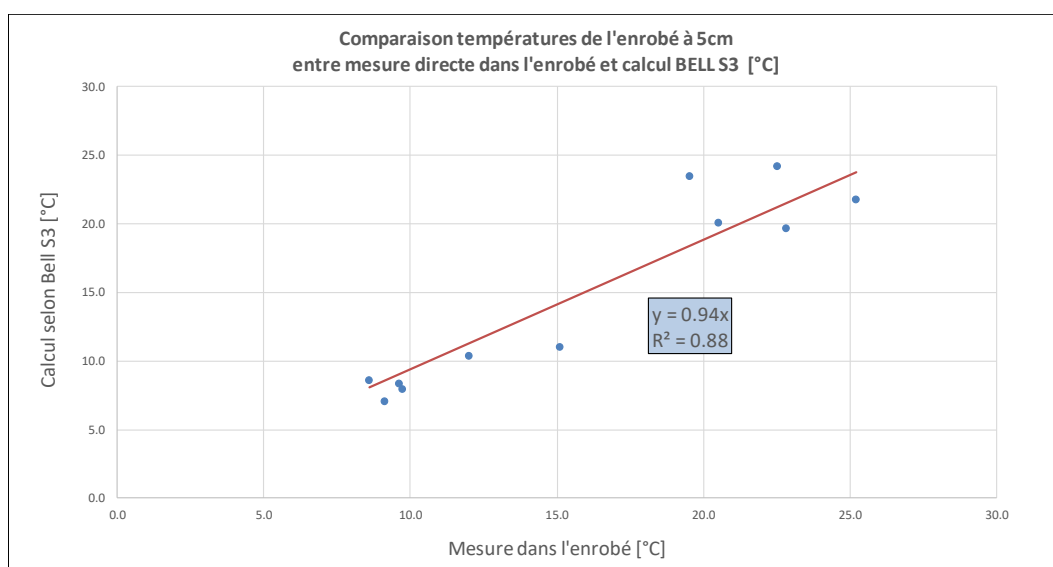
Fig 2.10 – Fonction sinusoïdale pour un système horaire de 18h

Le graphique ci-dessus représente les sinusoides pour un cycle de 18 h avec le sinus considéré à -1 entre 05 :00 et 11 :00 ($\sin(\text{hr}_{18}-15.5)$) et entre 03 :00 et 09 :00 ($\sin(\text{hr}_{18}-13.5)$).

Le FWD est équipé d'un thermomètre à infrarouge qui mesure la température de la surface en temps réel. Lors des mesures, la température de l'enrobé a été mesurée au moyen de trous percés préalablement. Les trous percés avaient des profondeurs de 5 et 10 cm (5 cm seulement en cas d'épaisseur d'enrobé inférieure à 10cm).

Après avoir calculé, au moyen du modèle BELLS3, les températures de l'enrobé à des profondeurs de 5 et 10 cm, ces valeurs ont été comparées aux températures mesurées dans les trous percés.

Les graphiques suivants présentent les corrélations linéaires entre les températures mesurées dans l'enrobé et celles calculées selon BELL S3 pour les profondeurs de 5 et 10 cm :



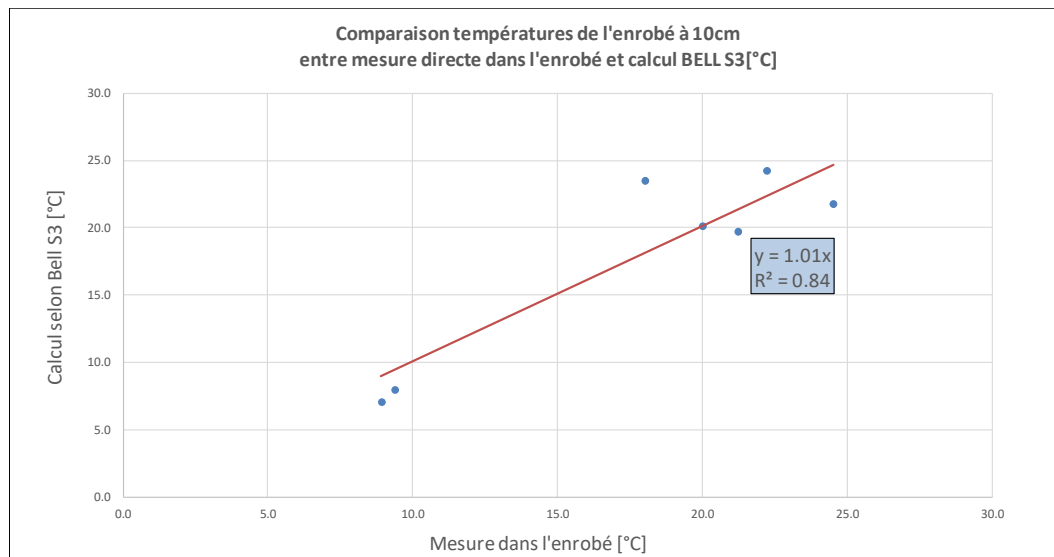


Fig 2.11 – Corrélations linéaires entre les températures mesurées dans l'enrobé et celles calculées selon BELL S3 pour les profondeurs de 5 et 10 cm

Dans les graphiques [Fig 2.11] les valeurs mesurées dans l'enrobé sont des relevés ponctuels, tandis que les valeurs calculées avec BELL S3 sont les moyennes des températures calculées sur l'ensemble des points FWD.

Ces corrélations révèlent que les valeurs calculées sont relativement proches des valeurs mesurées. Il existe peu de valeurs entre les extrémités (10°C et 20-25°C) avec pour conséquence des coefficients R^2 relativement élevés (0.87 à 5 cm et 0.84 à 10 cm).

Pour les analyses de ce rapport, les températures calculées par la formule BELL S3 sont retenues pour les raisons suivantes :

- Bien qu'elle soit théorique, la formule BELL S3 a été testée, éprouvée et utilisée par de nombreux laboratoires à l'international. Cette formule est préconisée par Dynatest, constructeur du matériel FWD.
- Le perçage des trous génère de la chaleur. Le temps nécessaire pour que la température se stabilise peut dépasser une demi-heure.
- La mesure au thermomètre à infrarouge est effectuée au niveau de chaque point de mesure contrairement à la mesure dans les trous qui est ponctuelle. La mesure à l'infrarouge permet d'avoir une information pour chaque point de mesure, avec prise en compte notamment de l'exposition au soleil de chaque point. Les variations de température d'un bout à l'autre d'un tronçon sont parfois importantes (exposition au soleil, changement de revêtement...).
- La formule BELL S3 permet de calculer la température en toute profondeur des matériaux bitumineux, et donc au milieu de l'épaisseur des matériaux, une fois que celle-ci est connue. Cette valeur est ensuite utilisée pour le calcul des déflexions FWD à 20°C.

Correction des déflexions à une température de référence

Afin d'obtenir les déflexions FWD à une température de référence, plusieurs corrections existent dans la littérature.

Pour ce mandat de recherche, la correction retenue est issue du rapport « Characterization of Seasonal Influences on Asphalt Pavements with the use of Falling Weight Deflectometers » [12].

$$TNF = 1 + \left(0.01661 + \frac{-0.67095}{E_{pMB}}\right) \cdot (T_{MB} - 20) + \left(0.00028612 + \frac{-0.01408}{E_{pMB}}\right) \cdot (T_{MB} - 20)^2$$

Eq. 2.8

Où :

TNF Facteur de normalisation de température

[-]

 T_{MB} Température des matériaux bitumineux

[°C]

 E_{pMB} Epaisseur des matériaux bitumineux

[mm]

Cette correction est nécessaire dans ce mandat de recherche pour calculer les déflexions à la température de 20°.

Influence saisonnière

Dans le cadre de ce mandat, des mesures saisonnières ont été programmées afin de comparer les différences de déflexions entre mars et septembre. Pour ce faire, deux chantiers avec des épaisseurs de couche bitumineuse autour de 15 cm ont été sélectionnés.

Légende du tableau 2.3

 E_{pMB} Epaisseur des matériaux bitumineux

[mm]

 T_{MB} Température des matériaux bitumineux

[°C]

Tab. 2.3 – Liste des tronçons testés pour les mesures saisonnières en mars et septembre

Projet	E_{pMB}	Nombre de points	1 ^{ère} campagne de mesure		2 ^{ème} campagne de mesure	
			Date	T_{MB}	Date	T_{MB}
[-]	[mm]	[-]	[jj.mm.aaaa]	[°C]	[jj.mm.aaaa]	[°C]
Chemin Sous-Riette, Crissier	140	46	20.03.2015	21.8	28.09.2015	15.8
Rue de la Vernie, Crissier	160	33	20.03.2015	23.0	28.09.2015	24.0

Afin d'être comparées, les déflexions brutes ont été ramenées à la température de référence de 20°C, selon la formule [Eq. 2.8].

Le graphique ci-après représente la corrélation linéaire entre les déflexions mesurées en mars et en septembre.

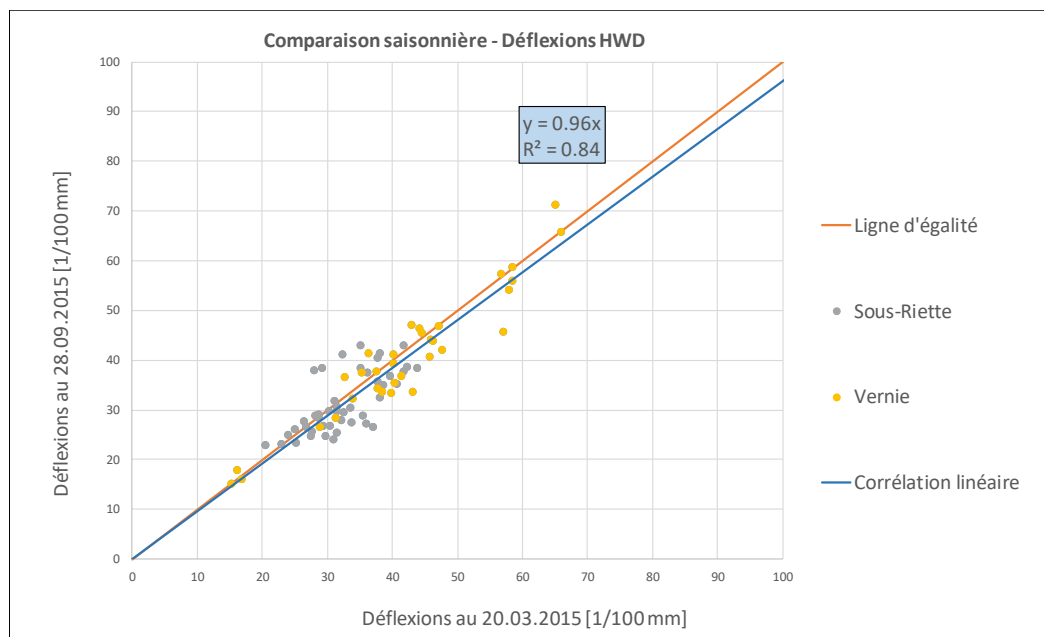


Fig 2.12 – Corrélations linéaires entre les mesures réalisées en mars et septembre

Les déflexions sont sensiblement inférieures en septembre qu'en mars (4% inférieure selon la corrélation linéaire qui présente un R^2 relativement satisfaisant). Afin d'obtenir les mêmes déflexions qu'en mars, il convient d'appliquer un coefficient de correction saisonnier de $1/0.96 = 1.04$. Cette tendance est cohérente avec l'application du facteur global de correction c selon les saisons à appliquer sur les déflexions Benkelman, à savoir que le facteur est faible au printemps et à son maximum en septembre. Cependant, les mesures effectuées dans le cadre de ce mandat de recherche sont insuffisantes pour établir une correction des déflexions applicables selon la période de l'année des mesures. Certaines études sur les variations saisonnières des résultats du FWD ont été effectuées dans plusieurs pays. L'étude du NJDOT, intitulée « Material Characterization and Seasonal Variation in Material Properties » [13], établit des coefficients de correction saisonnière notamment à partir de la déflexion D1 du FWD (SCF, Seasonal Correlation Factor). Cette étude a retenu l'attention car les corrections sont issues de campagnes de mesures sur 4 sites différents avec des mesures FWD tous les mois pendant 2 ans (février 2002 à mars 2004). Par ailleurs, ces essais ont été effectués dans le New Jersey, état des Etats-Unis dont les conditions climatiques sont relativement proches de celles rencontrées en Suisse. Les caractéristiques des tronçons testés dans le cadre de cette étude sont récapitulées dans le tableau 2.4 :

Tab. 2.4 – Type de tronçons testés pour l'étude de l'influence saisonnière sur les déflexions dans le New Jersey [13]

N° section	Situation géographique	Epaisseur totale de la structure (BB+Grave)
[-]	[-]	[mm]
1	Sud du New Jersey	< 600
2		> 600
3	Nord du New Jersey	< 600
4		> 600

Le graphique suivant présente les facteurs de correction saisonnier calculés pour chacun des tronçons testés dans le cadre du projet NJDOT. La courbe rouge représente la courbe moyenne de 4 tronçons :

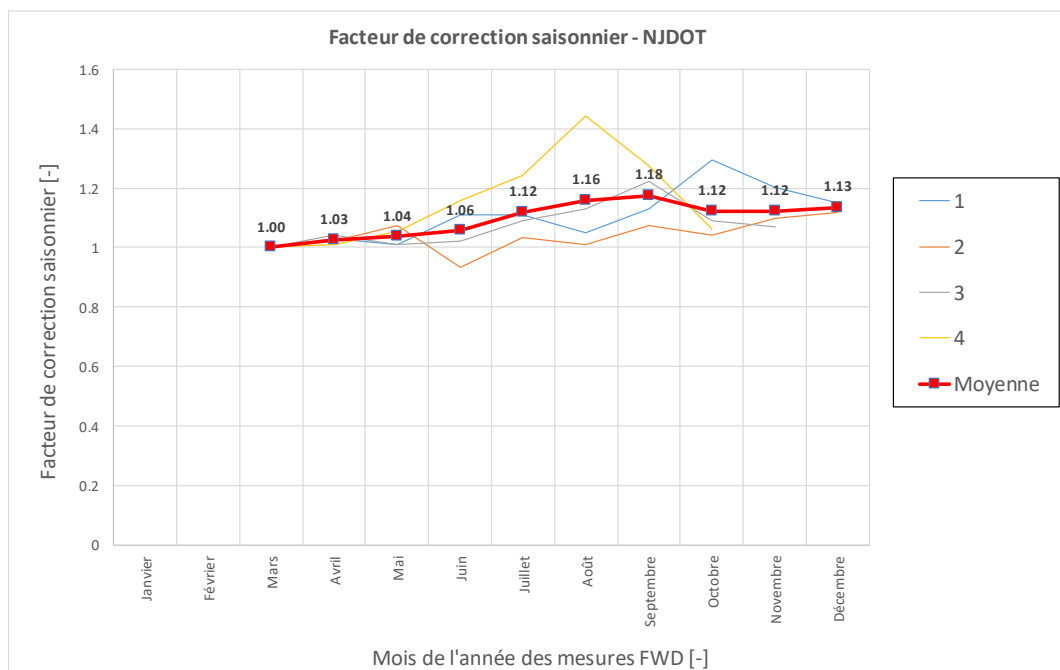


Fig 2.13 – Facteur de correction saisonnier [13]

Pour tenir compte de la variation des déflexions dans l'année, une correction saisonnière issue de la courbe moyenne de la [Fig 2.13] est appliquée sur les déflexions déterminantes FWD [chapitre 4.4].

Le facteur de correction saisonnière de 1 est attribué au mois de mars, soit le mois où les déflexions sont théoriquement les plus élevées en Suisse.

On constate que les facteurs de correction saisonniers sont inférieurs à ceux établis pour la poutre Benkelman [chapitre 2.1.3].

La durée d'application de charge peut expliquer cette différence. Celle-ci est nettement supérieure pour le Benkelman [chapitre 2.1.3] que pour le FWD [chapitre 2.2.4], ce qui induit une réaction des matériaux bitumineux moins rigide pour les mesures Benkelman avec des contraintes plus importantes transmises vers les couches inférieures (grave de fondation, sol) [9].

Les variations saisonnières des déflexions sont surtout influencées par l'état de ces couches inférieures (gélivité, conditions hydrologiques [8]). Ces variations sont donc susceptibles d'être plus importantes pour les déflexions Benkelman que pour les déflexions FWD.

2.3 Répétabilité / reproductibilité

2.3.1 Définitions

Les définitions de répétabilité et de reproductibilité ci-dessous sont inspirées de la norme ISO 3534-1

Les essais de répétabilité sont effectués en utilisant la même méthode sur des individus d'essai identiques dans le même laboratoire, par le même opérateur, utilisant le même équipement et pendant un court intervalle de temps.

Les essais de reproductibilité sont effectués en utilisant la même méthode sur des individus d'essais identiques dans différents laboratoires, avec différents opérateurs et utilisant des équipements différents.

2.3.2 Répétabilité

Poutre Benkelman

Aucun document relatif à des mesures de répétabilité avec la poutre Benkelman n'a été trouvé dans la littérature.

FWD

Des mesures comparatives sont organisées une fois tous les 2 ans par le CROW² aux Pays-Bas. Lors des dernières mesures comparatives, en septembre 2015 [16], 16 FWD de 7 pays européens y ont participé.

Lors de la journée, les mesures de répétabilité et de reproductibilité [chapitre 2.3.3] sont effectuées conforme au protocole 10 du « Falling Weight Deflectometer Calibration Guide », Report D11-07 publié par CROW [14] est utilisé.

Les mesures de répétabilité sont effectuées une fois à trois stations différentes. Les FWD doivent être munis d'au moins 7 géophones car la comparaison des déflexions s'effectue sur les 7 déflexions à 0, 300, 600, 900, 1200, 1500 et 1800 mm du centre de la plaque de mesure. La température de l'asphalte est relevée par les opérateurs sur chaque site (trous percés). Un thermomètre CROW avec lecture continue est installé aux mêmes endroits. A chaque station, le FWD exécute, dans une seule séquence et sans lever la plaque de mesure, 10 chutes provoquant une charge proche de 50 kN.

Toutes les déflexions sont normalisées à une charge de 50 kN en utilisant l'interpolation linéaire. Ensuite est calculée par station et pour les dix mesures :

- la déflexion moyenne (D_{moy}) et l'écartype des déflexions pour chaque géophone
- *l'écartype doit être inférieur à $2\mu m$ ou $1\mu m + 0.75\% * D_{moy}$*
- l'écartype de toutes les charges
- *l'écartype doit être inférieur à 2% de D_{moy}*

Les critères ci-dessus sont définies dans CROW Report D11-07 – Protocol 10 [14].

Pour respecter les spécifications de répétabilité, les critères pour la vérification de la répétabilité doivent être respectés pour au moins 2 des 3 stations de mesures de répétabilité.

Le FWD 8082-135, utilisé dans le cadre de ce mandat, a respecté les spécifications de répétabilité, à chaque participation à la journée de mesures comparatives FWD organisé par le CROW. Le CROW transmet un certificat aux participants respectant les critères. Le

² Le CROW est une fondation indépendante à but non-lucratif. Cette plateforme d'échange dans les domaines de l'infrastructure routière, espace public, transport, etc organise entre autres des mesures comparatives pour les appareils d'auscultation routière.

rapport [16] relatif à la journée de mesures est disponible depuis le site du CROW (www.crow.nl).

Fin octobre 2013, le FWD 8082-135 a également participé à une campagne internationale d'essais croisés au FWD organisé, pour une première fois, par le STAC (Service Technique de l'Aviation Civile) à Bonneuil-sur-Marne en France [17]. Sept FWD de 4 pays européens avaient participé aux essais comparatifs.

Cette campagne d'essais n'a pas pour vocation de fournir un certificat aux participants renseignant sur la qualité de la mesure. Selon le STAC, l'intérêt de ce type d'évènement est de donner l'opportunité à des utilisateurs courants de FWD de vérifier la qualité des mesures délivrées par leurs appareils, et de contrôler leurs résultats. Par conséquent, le STAC ne fixe pas de critères aux mesures de répétabilité effectuées dans le cadre de cette campagne.

Des mesures de répétabilité sont également effectuées :

- avant chaque départ sur un chantier en utilisant le protocole 3 « Short-term repeatability verification » du « Falling Weight Deflecometer Calibration Guide », Report D11-07 publié par CROW [14]
- une fois tous les 2 ans lors de la calibration de l'appareil FWD par le fournisseur de l'appareil (Dynatest). Le protocole de calibration est établi par Dynatest mais suit les instructions définies par le « COST 336 Group 336 » [15]

2.3.3 Reproductibilité

Poutre Benkelman

Le 3 novembre 2015 a été organisé, sous l'égide de VAB/ALA et pour la première fois en Suisse, des essais comparatifs entre différentes poutres Benkelman dont la poutre Benkelman utilisée pour ce mandat de recherche. Le laboratoire IMP Bautest AG à Oberbuchsiten était en charge de l'organisation de la journée. Les essais ont eu lieu sur l'Industriestrasse à Oberbuchsiten [18].

Le FWD utilisé dans le cadre de ce projet (8082-135) et un autre FWD (8002-103) ont également participé aux essais. Ainsi les deux appareils utilisés pour les essais comparatifs (FWD 8082-135 et poutre Benkelman) dans le cadre de ce mandat de recherche, ont été confrontés à 6 autres poutres Benkelman et au FWD 8002-103.

Chaque appareil effectuait les 15 points de mesure à la suite et aux heures suivantes :

L1 (11h00), L2 (11h30), L9 (12h00), L3 (12h15), L6 (12h45), L8 (13h15), L5 (13h30), L4 (14h00), L7 (14h45).

La température de l'enrobe, grâce à des conditions météorologiques favorables aux essais comparatifs (couvert, température de l'air relativement constante), était stable lors des essais comparatifs : 10°C.

Le tableau 2.5 représente les déflexions non-corrigées des différents appareils de mesure donc sans correction :

- de température de l'enrobé,
- relative à la ligne d'influence
- relative à l'influence saisonnière

Toutes les déflexions ont été ramenées à une charge de 50 kN.

Les appareils avec désignation L7 et L9 correspondent respectivement à la poutre Benkelman et au FWD 8082-135, utilisés dans la cadre de ce projet. Les appareils L1 à L6 correspondent aux poutres Benkelman tandis que l'appareil L8 correspond au deuxième FWD (8002-113).

Tab. 2.5 – Résultats des déflexions brutes lors des essais de reproductibilité

Pt. de mesure	Déflexion centrale par appareil de mesure									Moyenne L1 – L7	Rapport Max/min L1 – L7	CV L1 – L7
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9			
	[1/100mm]									[1/100mm]	[-]	[-]
1	24	33	30	25	44	23	24	34	29	29	1.9	0.26
2	18	29	23	25	34	15	26	26	23	24	2.3	0.26
3	26	29	17	19	22	11	24	19	16	20	2.6	0.29
4	32	27	26	25	36	21	36	28	24	28	1.7	0.20
5	28	35	30	23	42	23	12	30	28	28	3.5	0.35
6	22	29	38	23	38	24	18	27	24	27	2.1	0.29
7	20	47	19	21	34	22	32	24	21	27	2.5	0.37
8	46	39	30	35	42	34	54	31	29	39	1.8	0.20
9	30	33	17	23	32	24	26	22	19	25	1.9	0.21
10	30	29	21	27	28	22	8	23	20	23	3.8	0.33
11	42	47	36	35	50	38	48	36	33	41	1.5	0.14
12	46	47	28	33	42	38	40	35	31	38	1.7	0.17
13	44	43	32	25	30	36	44	34	31	36	1.8	0.21
14	42	49	38	40	54	36	50	37	33	43	1.6	0.15
15	28	37	23	29	44	30	32	26	24	31	1.9	0.21
Moyenne	32	37	27	27	38	26	32	29	26			
Ecartype	10	8	7	6	9	8	14	6	5			
CV	0.30	0.21	0.26	0.22	0.22	0.32	0.44	0.20	0.21			

Les résultats du tableau 2.5 révèlent une grande hétérogénéité des déflexions mesurées entre les appareils de mesure. On constate que :

- les déflexions ne diminuent pas avec l'ordre de passage des appareils. Cela permet d'écarter une éventuelle consolidation de la structure qui influence la comparaison des résultats entre appareils.
- les déflexions moyennes pour tous les points de mesure sont comprises entre 26 (L6) et 38 [1/100 mm] (L5), soit une différence de 46%. Les coefficients de variation des déflexions varient entre 0.20 et 0.44, soit un rapport de 2.2. Le coefficient de variation de 0.44 correspond à la poutre Benkelman L7, soit la poutre Benkelman utilisée dans le cadre de ce projet.
- les déflexions Benkelman par point de mesure diffèrent considérablement. Par exemple :
 - o pour les points de mesure 5 et 10, le rapport entre la déflexion maximale et minimale est respectivement de 3.5 et de 3.8.
 - o pour les points de mesure 5, 7, 10, le coefficient de variation est de 0.35, 0.37 et 0.33.

Au regard de la grande variabilité des déflexions moyennes en général et un coefficient de variation de la poutre Benkelman (L7) utilisée dans le cadre de mandat, le graphique 2.14 a été établi et représente :

- Les déflexions moyennes des appareils Benkelman L1 à L7
- Les déflexions moyennes +/- 2 fois l'écart-type (Moy-2ET et Moy+2ET) soit l'étendue dans laquelle se situent 95.4% des valeurs de déflexions.
- Les déflexions des appareils utilisés dans le cadres de ce projet (Benkelman L7 et FWD L9) ainsi que celle du FWD L8.

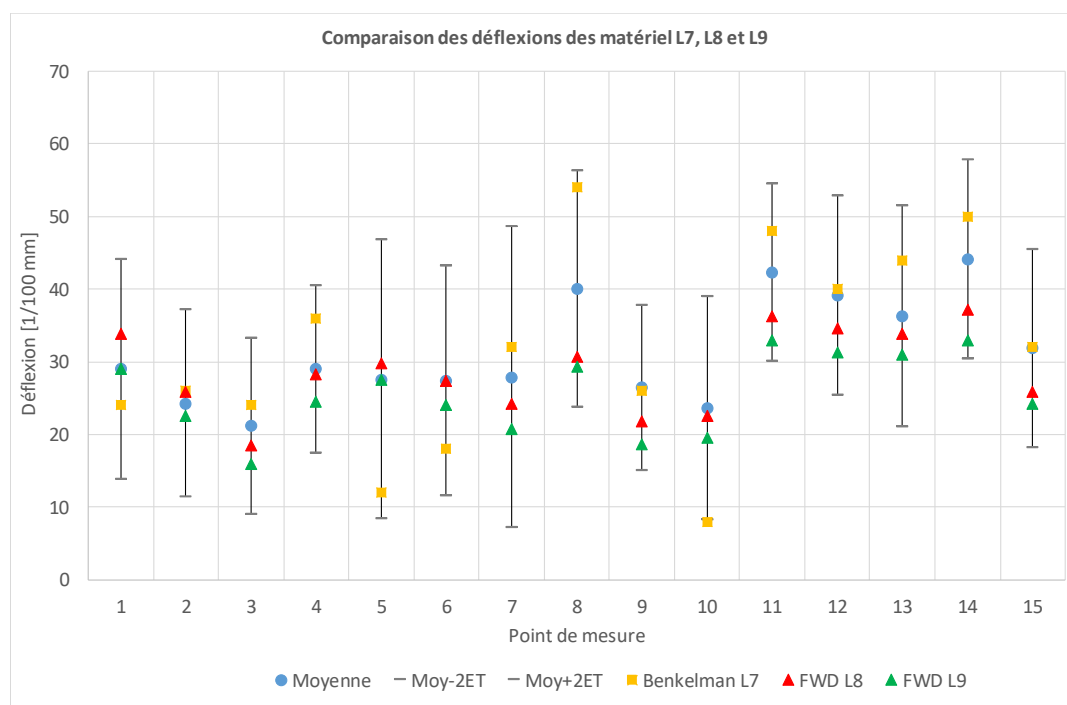


Fig 2.14 - Comparaison des déflexions brutes pour les appareils L7, L8 et L9 par rapport aux déflexions Benkelman (L1 – L7).

De la [Fig 2.14], il ressort que :

- L'étendue des déflexions Benkelman est très élevée : au minimum de 23 [1/100mm] pour les points de mesures 4 et 9 et au maximum de 41 [1/100mm] pour le point de mesure 7. Cela révèle une grande dispersion des déflexions relevées par les différentes poutres Benkelman.
- L'appareil Benkelman L7 présente une grande variabilité par rapport à la déflexion moyenne du groupe d'appareils Benkelman. Par exemple pour le point 8, la déflexion est proche de Moy+2ET tandis que pour le point 10, elle est au niveau de Moy-2ET.
- Les déflexions de l'appareil L8 sont toujours supérieures à celles de l'appareil L9, avec un écart compris entre 1 et 5 [1/100mm]. A l'exception du point 1, ces appareils FWD ont toujours des déflexions inférieures à la moyenne du groupe Benkelman.

Par analogie avec la méthode de vérification de la reproductibilité des matériels FWD décrites en page 35, le rapport entre la déflexion d'un appareil et la moyenne de déflexions de tous les appareils Benkelman (L1 – L7) est calculé pour chaque point de mesure. La [Fig 2.15] et le tableau 2.6 présentent ces résultats :

Tab. 2.6 – Résultats des rapports entre les déflexions de chaque appareil et la moyenne des déflexions de l'ensemble des appareils Benkelman L1 – L7.

Point de mesure	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0.83	1.14	1.03	0.86	1.52	0.79	0.83	1.17	1.00
2	0.74	1.19	0.95	1.03	1.40	0.62	1.07	1.06	0.93
3	1.23	1.37	0.80	0.90	1.04	0.52	1.14	0.88	0.75
4	1.10	0.93	0.90	0.86	1.24	0.72	1.24	0.97	0.84
5	1.02	1.27	1.09	0.83	1.52	0.83	0.44	1.08	1.00
6	0.80	1.06	1.39	0.84	1.39	0.88	0.66	1.00	0.88
7	0.72	1.69	0.68	0.75	1.22	0.79	1.15	0.87	0.75
8	1.15	0.98	0.75	0.88	1.05	0.85	1.35	0.77	0.73
9	1.14	1.25	0.64	0.87	1.21	0.91	0.98	0.82	0.71
10	1.27	1.23	0.89	1.15	1.19	0.93	0.34	0.96	0.83
11	0.99	1.11	0.85	0.83	1.18	0.90	1.14	0.86	0.78
12	1.18	1.20	0.72	0.84	1.07	0.97	1.02	0.89	0.80
13	1.21	1.19	0.88	0.69	0.83	0.99	1.21	0.93	0.85
14	0.95	1.11	0.86	0.91	1.22	0.82	1.13	0.84	0.75
15	0.88	1.16	0.72	0.91	1.38	0.94	1.00	0.81	0.76
Moyenne	1.01	1.19	0.88	0.88	1.23	0.83	0.98	0.93	0.82
Ecartype	0.19	0.18	0.19	0.11	0.19	0.13	0.29	0.11	0.09
Minimum	0.72	0.93	0.64	0.69	0.83	0.52	0.34	0.77	0.71
Maximum	1.27	1.69	1.39	1.15	1.52	0.99	1.35	1.17	1.00

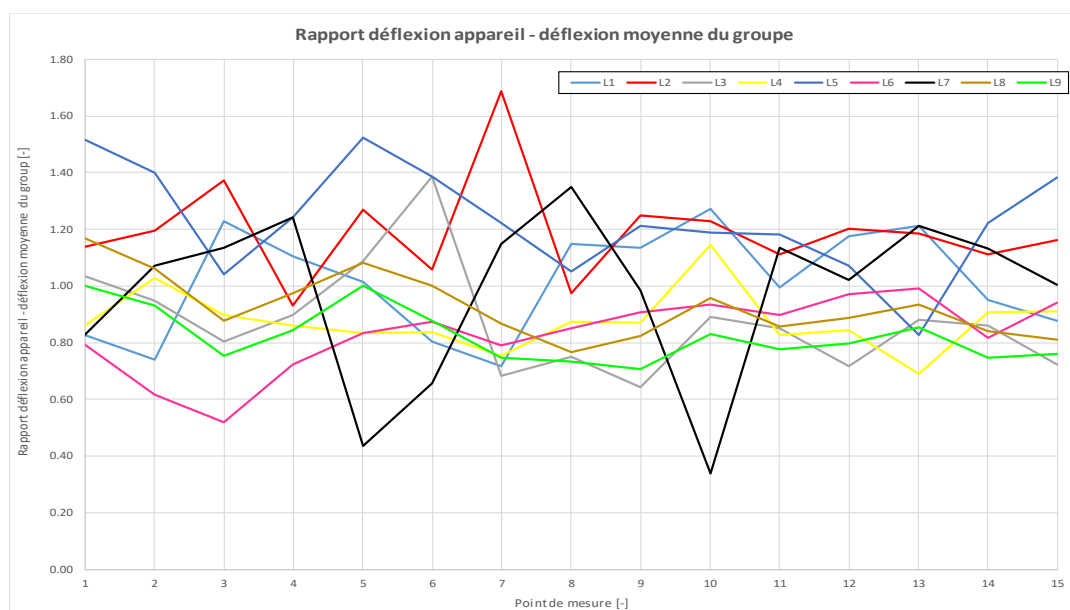


Fig 2.15 – Graphiques des rapports entre les déflexions de chaque appareil et la moyenne des déflexions de l'ensemble des appareils Benkelman L1 – L7.

On constate que :

- Certains appareils mesurent des déflexions majoritairement plus hautes (L2 et L5) ou plus basses (L3, L4, L6 et L9) que la moyenne des appareils.
- Le FWD L9 est l'appareil dont la reproductibilité est la plus élevée (écart-type des rapports : 0.09) et la poutre Benkelman L7 est l'appareil dont la reproductibilité est la plus faible (0.29).
- Le rapport moyen est de 0.82 pour le FWD ce qui est proche de la corrélation issue de la recherche bibliographique [chapitre 3].

Les mêmes constats peuvent être tirés du rapport [18] : la figure Fig 2.16 issu de ce rapport représente la valeur h , qui exprime la cohérence entre laboratoires selon ISO 5725 [25].

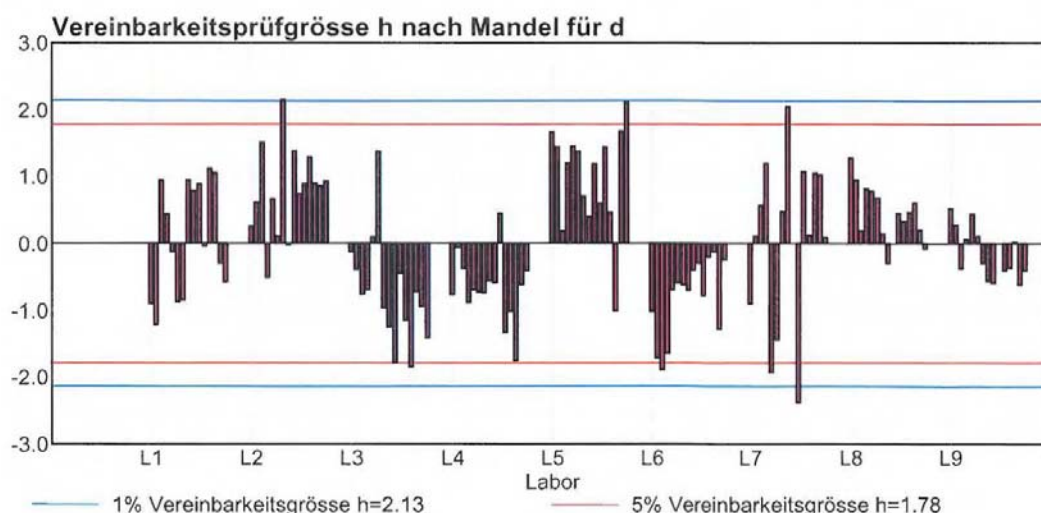


Fig 2.16 – Cohérence entre laboratoires exprimée en valeur h selon [25]

Plus cette valeur h s'éloigne du 0, plus la déflexion de cet appareil s'écarte du groupe.

- Les valeurs h sont majoritairement positives pour L2 et L5 et majoritairement négatives pour L3, L4, L6 et L9.
- Pour plusieurs poutres Benkelman, la valeur h est parfois supérieure à la valeur critique $h_{5\%}$ (± 1.78). Par contre, seule la poutre L7, dépasse la valeur critique $h_{1\%}$ (± 2.13 : $h = -2.36$ pour la station de mesure 10) et représente une grande variabilité avec des valeurs h entre -2.36 et 2.04.
- Les valeurs h pour les deux appareils FWD (L8 et L9) sont particulièrement faibles par rapport aux poutres Benkelman.

Au regard de ces résultats, la reproductibilité des appareils Benkelman soumis aux mesures comparatives peut être qualifiée d'insatisfaisante. De plus, le L7 est l'appareil dont les déflexions présentent les écarts les plus importants par rapport à la moyenne.

La reproductibilité des appareils FWD, et en particulier le FWD utilisé dans le cadre de ce mandat, peut être qualifiée de très bonne.

FWD

Introduction

Les mesures de reproductibilité selon le report D11-07, Protocol 10, ont été effectuées aux Pays-Bas sur 40 emplacements répartis sur 7 sites. Tous les emplacements ont été visités deux fois. Comme pour les mesures de répétabilité les emplacements ont été sélectionnés

pour leur variation dans l'épaisseur de la couche bitumineuse, la superstructure, la portance du sol, etc.

A chaque emplacement, le FWD a effectué 5 drops (en une séquence) sans monter la plaque. La plaque devait être entièrement disposée dans un cercle marqué au sol d'un diamètre de 40 cm. La charge appliquée était de 50 kN.

Le premier drop a été écarté de l'analyse. Les déflexions sont ramenées à une charge de 50 kN. La température de l'asphalte est relevée manuellement par les opérateurs à chaque site (trous percés). Un thermomètre CROW avec lecture continue est installé aux mêmes endroits. Les résultats de chaque FWD sont ensuite comparés aux déflexions du groupe de référence. Le groupe de référence est composé arbitrairement de tous les participants néerlandais ayant un certificat CROW valable. Les appareils faisant partis du groupe de référence sont construits soit par Dynatest (4 appareils), soit par Grontmij (3 appareils).

Exploitation

L'exploitation consiste à :

- calculer, par station et par géophone, la moyenne des 4 déflexions
- calculer, par station et par géophone, le rapport entre les moyennes d'un appareil et les moyennes du groupe de référence
- calculer, par géophone la moyenne (= deflection sensor correlation factor) et l'écart-type des rapports
- calculer la moyenne des « deflection sensor correlation facteur » = correlation factor

Les exigences pour les mesures de reproductibilité sont les suivantes :

- l'écart-type des rapports doit être inférieur à 0.090
- la moyenne des rapports par géophone (= deflection sensor correlation factor) doit être comprise entre 0.8 et 1.2

Si ces deux exigences sont respectées, l'appareil dispose d'une reproductibilité satisfaisante et un certificat est délivré.

Définitions

rapport:	par station et par géophone, le ratio entre nos déflexions moyennes et celle du groupe de référence
facteur de corrélation par géophone (R) :	la moyenne des rapports par géophone (deflection sensor correlation factor)
écart-type par géophone :	l'écart-type des rapports par géophone
facteur de corrélation (par station) :	la moyenne des rapports par station (station correlation factor)

Résultats

Le FWD 8082-135, utilisé dans le cadre de ce projet, a respecté les exigences en 2015 quant à l'écart-type des rapports (0.090) et la moyenne des rapports (0.8 à 1.2). Le facteur de corrélation 2015 est de 0.974 (certificat figurant en Annexe 0). Ce facteur est appliqué automatiquement aux déflexions brutes.

2.4 Synthèse

	Poutre Benkelman	Falling Weight Deflectometer (FWD)
Mesures		
<i>Domaine d'application</i>	Chaussées souples et couches de fondation	Chaussées souples et rigides et couches de fondation
<i>Charge appliquée</i>	En principe 50 kN sur une roue jumelée d'un camion	7 à 320 kN (selon le type de FWD), en faisant varier le poids et la hauteur de chute du poids
<i>Mesure</i>	Réflexion ou déflexion élastique de retour	Déflexion
<i>Durée d'application</i>	25 s (< 1 km/h)	28 ms (~75 km/h)
Exploitation	Déflexion centrale (principalement) Bassin de déflexions (occasionnellement)	Bassin de déflexions (principalement) Déflexion centrale (occasionnellement)
Correction des mesures		
<i>Charge</i>	Pour charge d'essieu entre 70 et 120 kN : $d_{100} = \frac{100}{L_x} \cdot d_x$ <i>Eq. 2.9</i>	Même formule que pour la poutre Benkelman
<i>Température de surface ou de l'enrobé</i>	Surface, selon formule suivante (SN 670 362a [2]) : $d_{20} = d_T + (20 - T)$ <i>Eq. 2.10</i>	Enrobé, selon formule (Méthode BELLS3 [11]) : $T_D = 0.95 + 0.892 * IR + \{\log(d) - 1.25\} \{-0.448 * IR + 0.621 * (1 - jour) + 1.83 * \sin(hr_{18} - 15.5)\} + 0.042 * IR * \sin(hr_{18} - 13.5)$ <i>Eq. 2.11</i>
<i>Ligne d'influence</i>	Correction selon vérification	Pas de correction requise
<i>Influence saisonnière</i>	Correction de la déflexion déterminante entre ~1.03 à ~1.62 selon épaisseur de la couche bitumineuse et période de la mesure des déflexions (SN 640 733 b [1])	Proposition au [chapitre 2.2.4] selon le même principe que pour les mesures à la poutre Benkelman mais la correction est moins importante (entre ~1.0 et 1.18).
Répétabilité / reproductibilité		
<i>Répétabilité</i>	Aucun document relatif à des mesures de répétabilité avec la poutre Benkelman n'a été trouvé dans la littérature.	Essais effectués selon 3 protocoles distincts [chapitre 2.3.2]
<i>Reproductibilité</i>	Essais comparatifs entre plusieurs poutres Benkelman ont été organisés pour la première fois en Suisse en novembre 2015 par VAB/ALA.	Depuis 1995 des essais comparatifs entre plusieurs FWD sont organisés aux Pays-Bas par CROW.

3 Corrélations existantes FWD – Benkelman

De nombreuses recherches ont été menées où un des objectifs était de trouver une corrélation entre les déflexions relevées avec une poutre Benkelman et celles relevées par un FWD.

La [Fig 3.1] et le tableau 3.1 répertorient quelques corrélations (liste non-exhaustive).

Légende tableau 3.1

D_{BB}	Déflexion Benkelman	[1/100 mm]
D_{FWD}	Déflexion FWD	[1/100 mm]
E_{MB}	Épaisseur des matériaux bitumineux (considérée 150 mm)	[mm]
N	Nombre de points de mesure pris en compte dans la corrélation	[-]
R^2	Coefficient de détermination	[-]

Tab. 3.1 – Synthèse des corrélations Benkelman – FWD existantes

Désignation	Pays	Année publication	Corrélation D_{BB} - D_{FWD}	R^2	N
Colombie [19]	Colombie	2004	$D_{BB} = \frac{D_{FWD} - 20.097}{0.6374}$	0.83	-
Austroads [20]	Australie	2005	$D_{BB} = 1.1 \cdot D_{FWD}$	-	-
Bast [21]	Allemagne	2011	$D_{BB} = 1.27 \cdot D_{FWD} - 5.7$	0.98	71
Shell	France	2000	$D_{BB} = 1.18 \cdot D_{FWD}$	-	-
Washington DOT [22]	Etats-Unis	1982	$D_{BB} = 0.93748 \cdot D_{FWD} + 3.385$	-	-
Oulu University [24]	Finland	1990	$D_{BB} = 1.123 \cdot D_{FWD} - 0.257$	0.95	147
Steve Finnie [24]	Poland	-	$D_{BB} = 0.65 \cdot D_{FWD}^{1.15}$	-	-
Quebec Transportation [24]	Quebec	2000	$D_{BB} = 1.613 \cdot D_{FWD}$	-	-
Minnesota [24]	Etats-Unis	-	$D_{BB} = 1.05 \cdot D_{FWD} + 5.15$	-	-

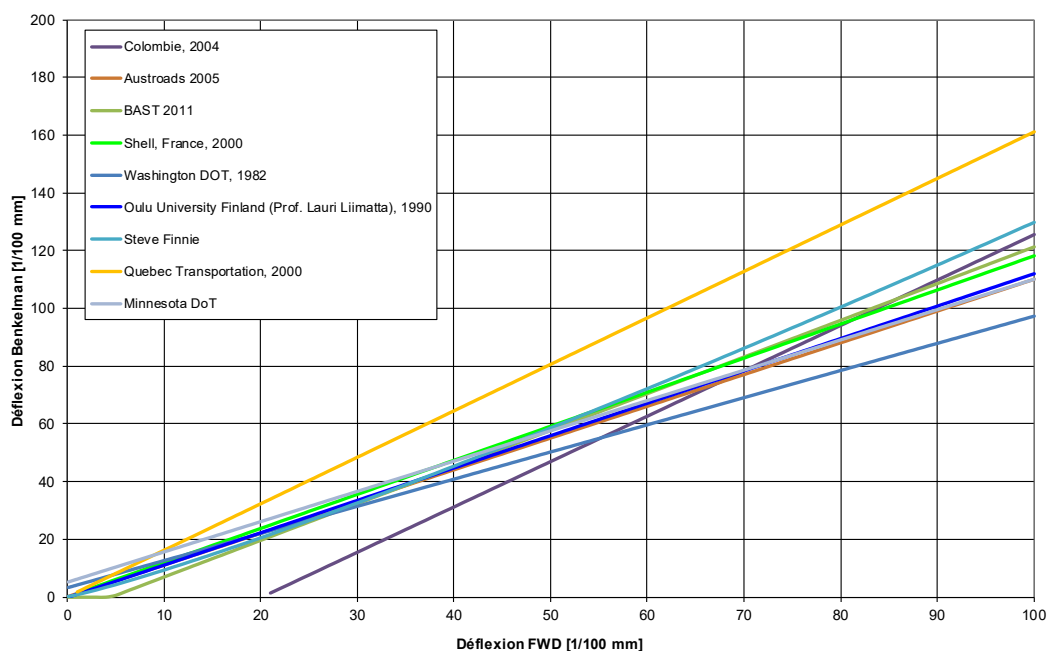


Fig 3.1 – Graphiques des corrélations Benkelman – FWD existantes

A noter que la plupart des corrélations ont un coefficient directeur compris entre 1 et 1.3.

Les corrélations répertoriées plus haut sont issues :

- de rapports de recherche ou souvent l'objectif principal était autre que de trouver une corrélation entre les déflexions relevées par un FWD et une poutre Benkelman
- d'informations obtenues à travers la « FWD Users Mailing List ». Cette User Mailing List a existé jusqu'en 2005 / 2006 et permettait de rapidement faire circuler des informations telles que les corrélations entre les déflexions FWD et poutre Benkelman.

Par conséquent, pour la majorité des corrélations, il existe très peu d'informations sur la méthodologie effectuée (charges, températures, nombre de points, ...) et sur le coefficient de détermination (R^2).

Pour les deux corrélations dont le nombre de points ainsi que le coefficient de détermination est connu (BAST et Oulu University), le coefficient directeur est autour de 1.2 :

$$D_{BB} = 1.2 \cdot D_{FWD} + b$$

Eq. 3.1

Les coefficients de détermination R^2 sont particulièrement élevés (0.95 et 0.98). Cependant, le nombre de points de mesures menant à ces corrélations est relativement faible (71 et 147).

La corrélation fournie par Shell Global Solutions France est la seule qui introduit l'épaisseur et la température de l'enrobé comme variables dans la corrélation Benkelman - FWD.

L'influence de ces variables sur le rapport entre les déflexions Benkelman et FWD est représentée sur le graphique suivant :

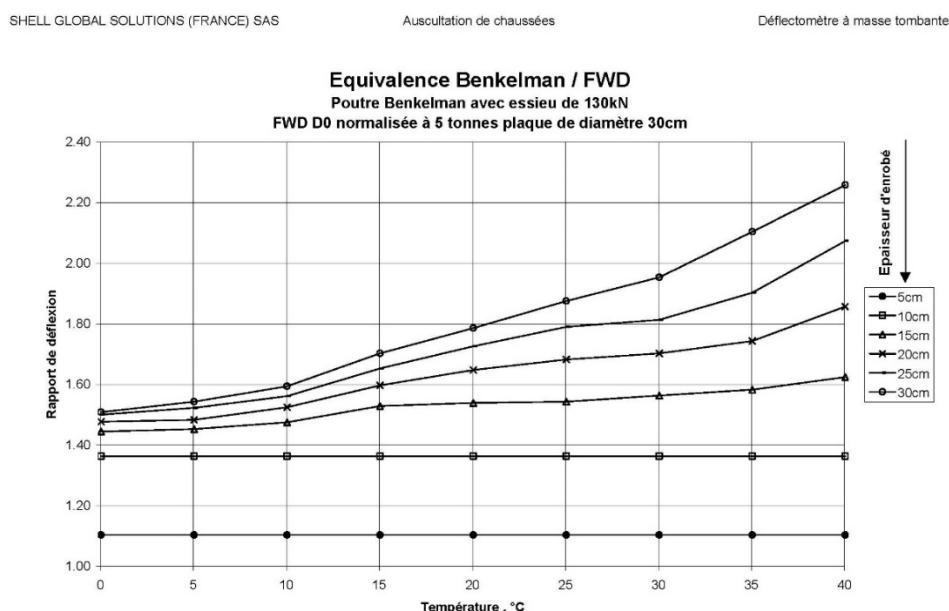


Fig 3.2 – Graphique des rapports de déflexions Benkelman – FWD en fonction de l'épaisseur et de la température de l'enrobé – Shell Global Solutions.

Sur la [Fig 3.2], on constate que le rapport des déflexions Benkelman – FWD :

- augmente quand l'épaisseur de l'enrobé augmente,
- augmente quand la température de l'enrobé augmente.

Note : Sur la [Fig 3.2], les mesures Benkelman sont considérées pour une charge d'essieu de 130 kN. La corrélation figurant dans le tableau 3.1 et la figure 3.1 considère les essais Benkelman à une charge d'essieu ramenée à 100kN pour une épaisseur d'enrobé de 15cm et une température de l'enrobé de 20°C.

4 Mesures comparatives FWD - Benkelman

4.1 Programme de mesures

Le programme de recherche comprend des mesures comparatives sur 11 tronçons routiers pour environ 436 points de mesure.

Les tronçons mesurés ainsi que les conditions de mesure sont répertoriés dans le tableau 4.1.

Légende du tableau 4.1 :

E_{MB}	Epaisseur des matériaux bitumineux	[mm]
I_1	Indice d'état des dégradations de surface selon [4]	[-]
I_{A4}	Indice individuel des dégradations structurels [5]	[-]
T_s	Température à la surface du revêtement bitumineux	[°C]

Tab. 4.1 – Liste des tronçons testés pour les mesures comparatives Benkelman - FWD

N° Projet	Projet	Date de mesure	Type de route	Nb. de points	E_{MB}	I_1	I_{A4}	T_s
[-]	[-]	[jj.mm.aaaa]	[-]	[-]	[cm]	[-]	[-]	[°C]
1	RC1400 Romont - Vaulruz	19.08.2013	RP	51	17	0.0	0.0	24
2	Chemin de la Redoute, Nyon	07.10.2013	RL	24	18	3.8	2.0	21
3	Avenue du Moulin, Morges	11.10.2013	RL	51	9	1.5	0.6	11
4	N12 Riaz Ecuwillens	18.10.2013	RGD	60	26	2.3	1.2	14
5	Route de Châtel, Corsier-sur-Vevey	03.09.2014	RP	47	35	3.8	1.0	21
6	Chemin Sous-Riette, Crissier	20.03.2015	RL	23	14	2.8	1.7	21.5
7	Rue de la Vernie, Crissier	20.03.2015	RL	31	16	2.8	1.7	23
8	Industriestrasse, Oberbuchsiten (Ringversuch)	03.11.2015	RL	15	15	0.8	0.0	10
9	Chemin de Ballègue, Epalinges	12.11.2015	RL	55	8	2.4	0.6	9
10	Chemin du Bois- Murat, Epalinges	12.11.2015	RL	25	8	3.0	1.7	10
11	Chemin des Orchez, Epalinges	12.11.2015	RL	54	10	2.5	0.9	12

Les tronçons ont été choisis de telle sorte d'obtenir un échantillonnage représentatif en fonction du type de route (RGD / RP / RL), ce qui permet de faire des mesures sur des épaisseurs de structures variés (épaisseur de matériaux bitumineux comprises entre 7 et 35 cm).

Les mesures ont été effectuées aussi bien sur des tronçons neufs que sur des tronçons dégradés. Le relevé sommaire des dégradations selon la norme SN 640 925b [4] a été effectué sur chacun de ces tronçons, avec le calcul de l'indice d'état I_1 . La valeur I_{A4} [5] est également renseignée dans le tableau 4.1 : cet indice individuel caractérise les dégradations structurelles, soit des dégradations pouvant affecter la corrélation entre les déflexions Benkelman et FWD.

Toutes les mesures ont été effectuées pour des températures de surface de l'enrobé comprise entre 5 et 30°C, soit selon la préconisation de la norme SN 670 362a pour les mesures Benkelman.

4.2 Méthodologie de mesures

Les mesures comparatives sont effectuées de la manière suivante :

- 1) Marquage des n points de mesure selon un espacement régulier (espacement de 10 à 50 m selon les tronçons mesurés) ;
- 2) Réalisation de la mesure Benkelman pour le point de mesure P0 (Positionnement du camion – positionnement de la poutre entre les roues jumelées du camion – départ du camion – mesure de la déflexion) ;
- 3) Déplacement du camion + poutre Benkelman au point de mesure P0+1 ;
- 4) Dans un délai de 2 à 5 mn après les mesures Benkelman, réalisation des mesures FWD sur point de mesure P0. L'intervalle de temps restreint entre les mesures Benkelman et FWD permet de conserver les mêmes conditions de température (air, enrobé) et donc de réduire l'incertitude liée à ce facteur ;
- 5) A chaque point P_n , mesures Benkelman puis mesures FWD selon étapes 2) à 4).

Les charges de mesure appliquées sont les suivantes :

- Selon la norme SN 670 362a, la charge de mesure appliquée pour les mesures Benkelman est de 50kN sur une roue jumelée d'un camion immobile. La pression de gonflement des pneus est de 7 bar. Un bulletin de pesage est fourni par la société de transport pour chaque journée de mesure.
- Les mesures FWD sont effectuées à plusieurs charges lors d'une même séquence : 40, 50 et 60kN, afin d'évaluer l'influence de la charge appliquée sur la corrélation entre les mesures Benkelman et FWD et pour vérifier la linéarité entre la charge et les déflexions relevées par le FWD.

Les températures de l'air, de surface de l'enrobé et dans l'enrobé sont relevées pendant les mesures.

La température dans l'enrobé, à 5 cm et à 10 cm de profondeur, est relevée dans un trou de perçage dans l'enrobé de la structure testée.

4.3 Comparaison des déflexions brutes

Les tableaux des valeurs de déflexions brutes Benkelman et FWD figurent en Annexe 0 tandis que les graphiques itinéraires de ces mesures figurent en Annexe 0.

Pour 20 points de mesures Benkelman répartis sur 3 chantiers, la déflexion Benkelman mesurée est nulle (12 points sur l'avenue des Moulins, 6 points sur la N12, 2 points sur le chemin de la Redoute). Il a été décidé de ne pas tenir compte de ces valeurs aberrantes et donc d'exclure ces points de mesure des analyses.

Au vu des graphiques itinéraires, l'allure générale des courbes des déflexions FWD et des déflexions Benkelman sont proches, à l'exception de 2 zones singulières :

- Les relevés effectués sur le chemin de la Redoute à Nyon.
- Les relevés effectués sur la RC1400 Romont - Vaulruz, dans le sens positif du km 61.500 au km 61.900.

On observe d'une manière générale que les déflexions Benkelman sont supérieures aux déflexions FWD. A première vue, ce résultat est plutôt cohérent dans le sens où la fréquence de charge est plus faible pour le Benkelman (charge statique) que pour le FWD (simulation d'une charge roulante à 75 km/h).

Les graphiques ci-dessous représentent les valeurs de déflexion Benkelman en fonction des déflexions FWD, pour une charge de 50kN.

Pour l'ensemble des graphiques, la courbe de tendance en bleu est une corrélation linéaire ne passant pas par 0 tandis que celle en vert passe par 0.

Ensemble des 11 projets

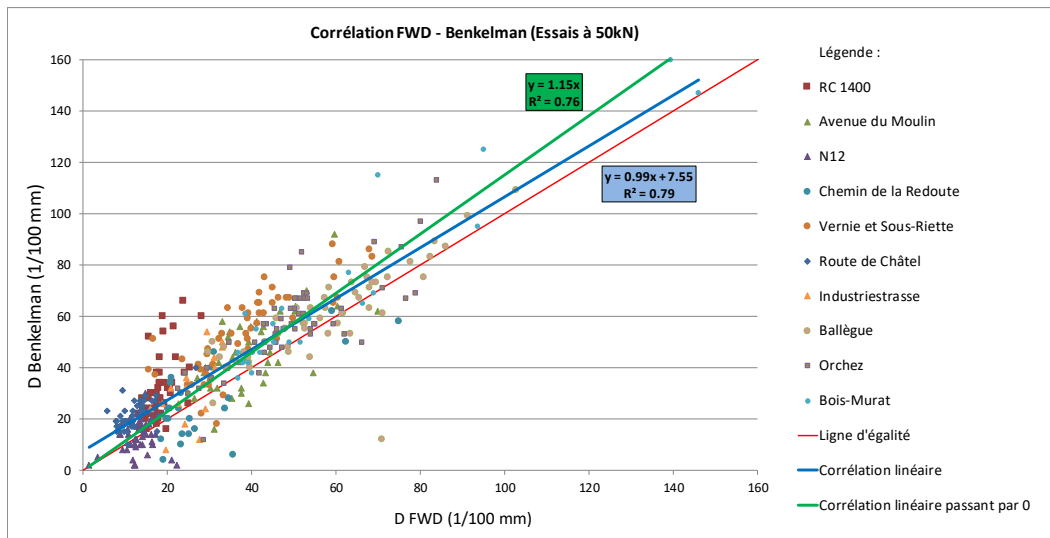


Fig 4.1 - Corrélation FWD – Benkelman – Ensemble des 11 projets (418 points de mesure)

Influence de l'épaisseur de la structure bitumineuse

L'épaisseur des matériaux bitumineux est connue pour chacun des tronçons testés. 2 classes d'épaisseur de matériaux bitumineux sont étudiées : épaisseur inférieure et supérieure à 15 cm.

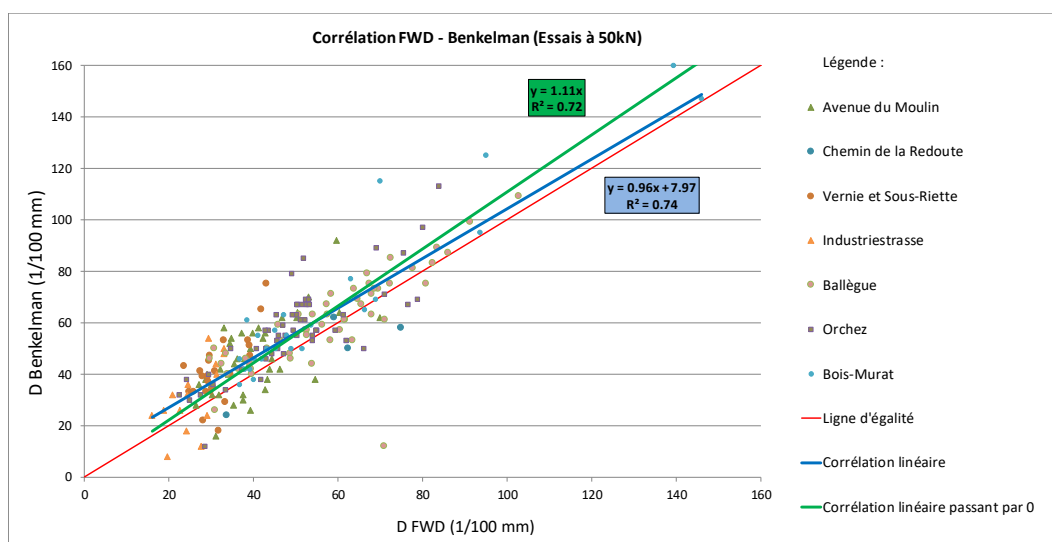


Fig 4.2 - Corrélation FWD – Benkelman – Ep BB ≤ 15 cm (214 points de mesure)

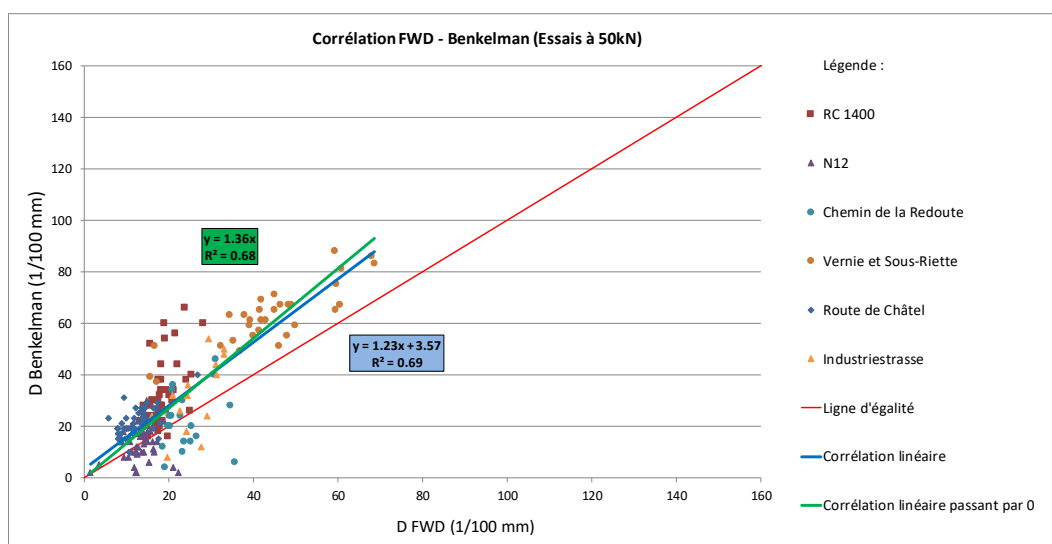


Fig 4.3 - Corrélation FWD – Benkelman – Ep BB > 15 cm (204 points de mesure)

Influence de la température de l'enrobé

La température des matériaux bitumineux est connue pour chacun des tronçons testés. 2 classes de températures de matériaux bitumineux sont étudiées : température inférieure et supérieure à 15°C.

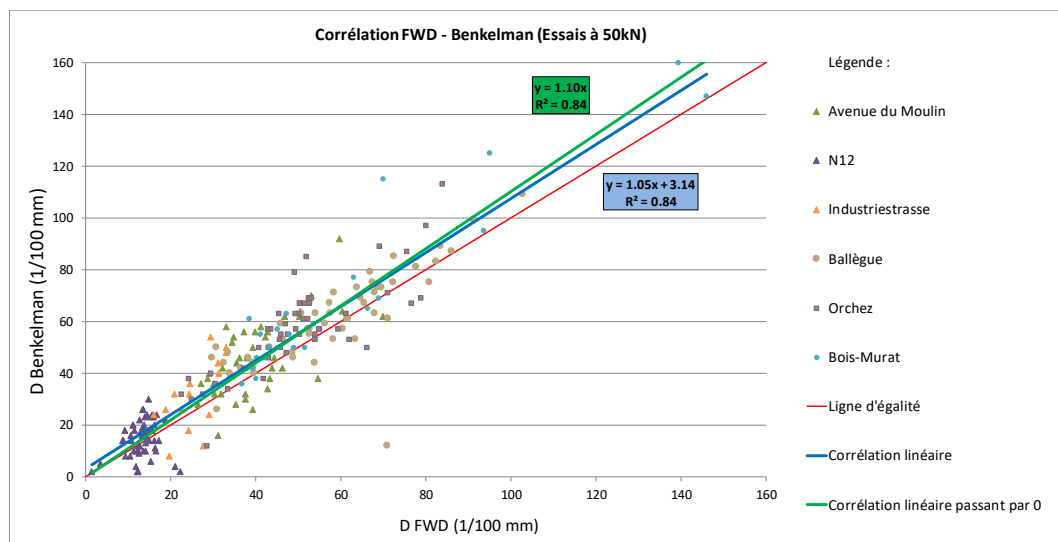


Fig 4.4 - Corrélation FWD – Benkelman – Température BB ≤ 15°C (238 points de mesure)

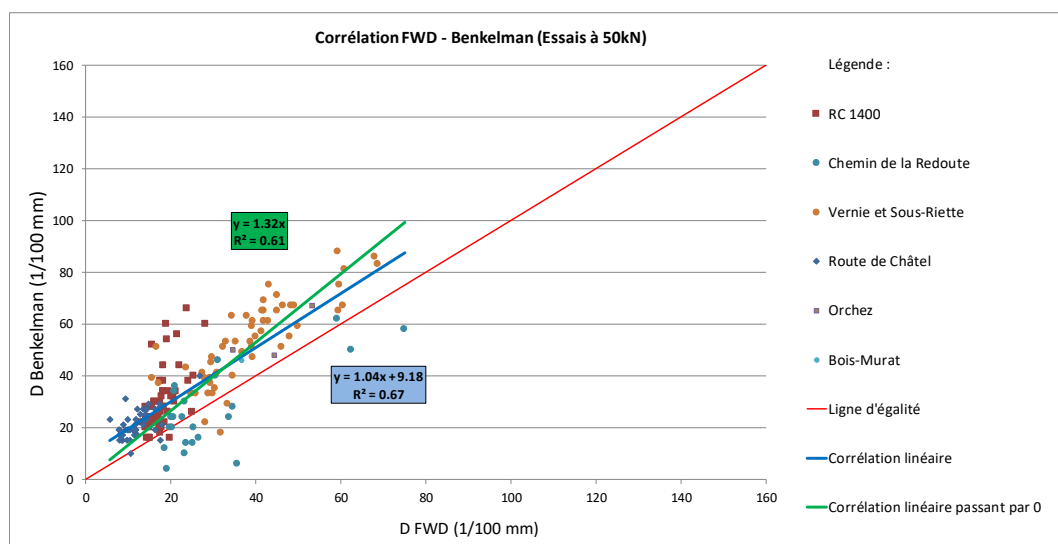


Fig 4.5 - Corrélation FWD – Benkelman – Température BB > 15°C (180 points de mesure)

Influence de l'état de la chaussée

L'indice d'état I_1 est évalué au pas de 50m sur chacun des tronçons testés, selon la norme SN 640 925b [4].

L'indice d'état I_1 est obtenu au moyen d'un relevé des dégradations de surface, y compris le relevé des ornières. Il est compris entre 0 et 5, la valeur 0 représentant un état bon et la valeur 5 un état mauvais.

L'indice d'état I_1 est décomposé en indices individuels [5], dont notamment l'indice I_{A4} , qui caractérise les dégradations structurales. C'est cet indice qui est pris en considération pour observer l'influence de l'état de la chaussée sur les déflexions : 2 classes d'indice I_{A4} sont étudiées : $I_{A4} \leq 1$ et $I_{A4} \geq 1$.

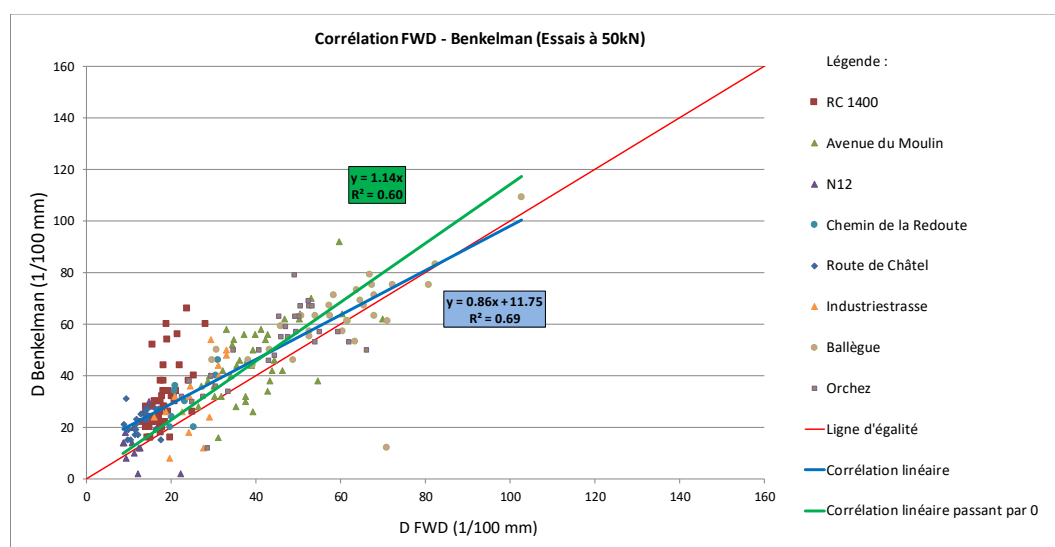


Fig 4.6 - Corrélation FWD – Benkelman – $IA4 \leq 1.0$ (212 points de mesure)

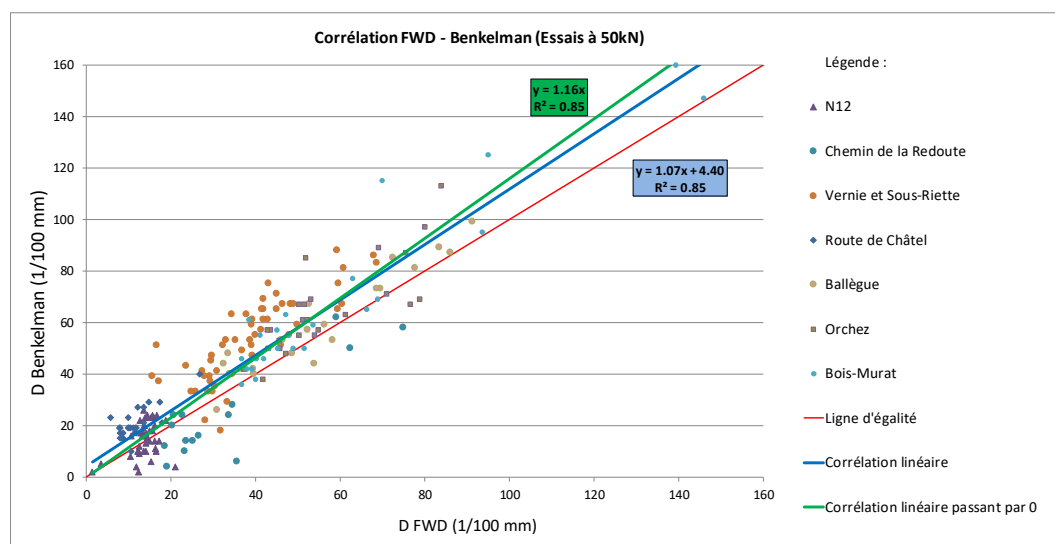


Fig 4.7 - Corrélation FWD – Benkelman – $IA4 > 1.0$ (206 points de mesure)

Synthèse des corrélations FWD / Benkelman**Tab. 4.2 – Synthèse des corrélations linéaires Benkelman - FWD**

Echantillon de point de mesure considéré		Nombre de points de mesure	Corrélation linéaire de type $D_{BB} = a \cdot D_{FWD} + b$			Corrélation linéaire Passant par 0 de type $D_{BB} = a \cdot D_{FWD}$	
			a	b	R ²	a	R ²
Ensemble des 11 projets		421	0.99	7.5	0.79	1.15	0.76
Influence de l'épaisseur de la structure bitumineuse	Ep. BB ≤ 15 cm	214	0.96	8.0	0.74	1.11	0.72
	Ep. BB > 15 cm	204	1.23	3.6	0.69	1.36	0.68
Influence de la température de l'enrobé	T _{BB} ≤ 15°C	421	1.05	3.1	0.84	1.10	0.84
	T _{BB} > 15°C	421	1.04	9.2	0.67	1.32	0.61
Influence de l'état de la chaussée	I _{A4} ≤ 1	212	0.86	11.7	0.69	1.14	0.60
	I _{A4} > 1	206	1.07	4.4	0.85	1.16	0.85

Pour l'ensemble des 11 projets, les R² obtenus pour ces corrélations (0.79 et 0.76) sont faibles pour aboutir à une corrélation consistante entre les déflexions Benkelman et FWD. Les différences observées visuellement sur les graphiques itinéraires pour certains tronçons testés (chemin de la redoute, N12, RC1400 : voir annexe 0) illustrent les limites de ces corrélations.

Épaisseur des matériaux bitumineux

L'épaisseur de matériaux bitumineux semble avoir une influence sur la corrélation Benkelman – FWD. La corrélation linéaire passant par 0 est de $D_{BB} = 1.11 \cdot D_{FWD}$ pour les épaisseurs de matériaux bitumineux inférieures ou égales à 15 cm et de $D_{BB} = 1.36 \cdot D_{FWD}$ pour celles supérieures à 15 cm. Selon les mesures comparatives effectuées, l'écart entre les déflexions Benkelman s'accroît quand l'épaisseur de matériaux bitumineux augmente. Cette constatation, qui est cependant à prendre avec précaution étant donné les R² faibles (0.72 et 0.68), s'explique probablement par la viscoélasticité des matériaux bitumineux : pour un matériau viscoélastique, la déformation est d'autant plus grande que la fréquence de charge est faible. Par conséquent, l'augmentation de l'épaisseur de l'enrobé accroît le comportement viscoélastique de la structure testée et accentue la différence entre les déflexions Benkelman et FWD.

Température des matériaux bitumineux

De même, l'étude de l'influence de la température dans les matériaux bitumineux permet de constater que l'écart entre les déflexions Benkelman et FWD s'accroît quand la température dans l'enrobé augmente (corrélation linéaire de $D_{BB} = 1.10 \cdot D_{FWD}$ quand T_{BB} ≤ 15°C et de $D_{BB} = 1.32 \cdot D_{FWD}$ quand T_{BB} > 15°C). Si la corrélation pour T_{BB} ≤ 15°C est satisfaisante (R² = 0.84), celle pour T_{BB} > 15°C semble toutefois peu fiable (R² = 0.61).

Pour des fréquences d'application faibles (Benkelman) par rapport à des fréquences d'application élevées (FWD), la déformation des matériaux bitumineux en fonction de la température est proportionnellement plus importante. Cela peut expliquer que l'écart entre les déflexions Benkelman et FWD augmente avec la température.

Ces 2 dernières constatations sur l'influence de l'épaisseur et la température de l'enrobé vont dans le même sens que les corrélations Benkelman – FWD déterminées par Shell Global Solutions [chapitre 3].

Etat de la chaussée

L'état de dégradation de la chaussée, évaluée en sous-indice d'état I_{A4} , ne semble pas avoir d'influence sur les corrélations linéaires (corrélation linéaire de $D_{BB} = 1.14 \cdot D_{FWD}$ quand $I_{A4} \leq 1$ et de $D_{BB} = 1.16 \cdot D_{FWD}$ quand $I_{A4} > 1$).

4.4 Comparaison des déflexions déterminantes

La déflexion déterminante d_v est calculée de la manière suivante [1] :

$$d_v = c \cdot (\bar{d} + 2 \sigma)$$

Eq. 4.1

Où :

$\bar{d}$: déflexion moyenne à la température de 20°C

σ : écart type des valeurs de déflexions

c : facteur global de correction

Afin de calculer ces déflexions déterminantes, les phases suivantes ont été respectées :

- Correction des valeurs de déflexion à la température de 20°C. La correction de la norme [2] est appliquée pour les déflexions Benkelman tandis qu'une correction spécifique est appliquée pour les déflexions FWD, à savoir celle décrite au [chapitre 2.2.4];
- Détermination des zones homogènes. Certains tronçons ont été découpés en plusieurs parties afin d'obtenir des coefficients de variation au-dessous de 0.35 (exigence selon [1]). Cependant, certains tronçons présentant des coefficients de variation CV supérieurs à 0.35 ont été conservés dans l'analyse pour des raisons évoquées dans la norme SN 640 733 b (déflexions faibles, superstructure très fissurée) ;
- Détermination du facteur global de correction c selon SN 640 733b pour les déflexions Benkelman (appelé ci-après c_{BB}). Ce facteur tient compte des variations saisonnières. Un facteur de correction saisonnier spécifique est appliqué pour les mesures FWD (appelé ci-après c_{FWD}), selon la courbe tracée au [chapitre 2.2.4].

Les résultats des déflexions déterminantes par zones homogènes figurent dans le tableau 4.3.

Pour des raisons statistiques, la norme SN 640 733b préconise un minimum de 10 points de mesure par zone homogène. Toutefois, les déflexions déterminantes des zones homogènes comprenant moins de 10 points de mesure ont été calculées : les résultats figurent en gris dans le tableau 4.3 afin d'indiquer leur faible degré de fiabilité.

Légende du tableau 4.3 :

dv_{BB}	Déflexion déterminante Benkelman	[1/100 mm]
dv_{FWD}	Déflexion déterminante FWD	[1/100 mm]
$\bar{d}$	Déflexion moyenne à la température de 20°C	[1/100 mm]
σ	Ecart type des valeurs de déflexions	[1/100 mm]
c_{BB}	Facteur global de correction pour les déflexions Benkelman	[-]
c_{FWD}	Facteur global de correction pour les déflexions FWD	[-]
CV	Coefficient de variation	[-]

Tab. 4.3 – Résultats des déflexions déterminantes FWD et Benkelman sur l'ensemble des tronçons

Projet	Sens	Début	Fin	Nb. Points	c_{BB}	c_{FWD}	Mesures Benkelman				Mesures FWD			
							$\bar{d}$	σ	dv_{BB}	CV	$\bar{d}$	σ	dv_{FWD}	CV
[-]	[-]	[km]	[km]	[-]	[-]	[-]	[1/100 mm]				[1/100 mm]			
1 - RC1400	-	62.200	62.100	26	1.40	1.16	18	8.9	51	0.49	17	2.9	26	0.17
	+	61.220	61.460	7	1.40	1.16	22	4.9	44	0.22	19	3.2	29	0.17
	+	61.500	61.780	8	1.40	1.16	50	9.0	95	0.18	21	3.3	31	0.16
	+	61.820	62.220	11	1.40	1.16	27	6.2	55	0.23	17	2.9	27	0.17
2 - Chemin de la Redoute	+	0.000	0.060	7	1.20	1.12	29	10.2	59	0.36	24	5.3	38	0.22
	+	0.070	0.130	7	1.20	1.12	11	5.0	25	0.45	26	4.8	40	0.19
	+	0.140	0.190	6	1.20	1.12	21	7.3	43	0.35	24	6.2	41	0.26
	-	0.195	0.155	5	1.20	1.12	49	16.1	98	0.33	56	15.4	97	0.27
3 - Avenue du Moulins	+	0.000	0.360	26	1.20	1.12	57	13.9	102	0.24	42	8.1	65	0.19
	-	0.360	0.000	26	1.20	1.12	58	15.5	106	0.27	46	13.9	82	0.30
4 - N12	VN+	33.275	33.375	5	1.20	1.12	24	1.4	32	0.06	14	1.5	19	0.11
	VR+	33.275	33.375	5	1.20	1.12	33	3.0	46	0.09	12	1.2	16	0.10
	VN-	33.375	33.275	5	1.20	1.12	28	11.9	62	0.43	17	5.6	31	0.33
	VR-	33.365	33.275	5	1.20	1.12	28	6.5	49	0.24	13	1.7	18	0.13
	VR+	35.450	36.450	21	1.20	1.12	27	6.6	48	0.25	16	3.5	25	0.22
	VR-	36.450	35.450	20	1.20	1.12	23	6.9	45	0.29	16	4.2	28	0.26
5 - Rte de Châtel	+	0.000	0.140	11	1.30	1.18	19	5.6	39	0.30	11	3.4	21	0.32
	+	0.328	0.478	11	1.30	1.18	16	8.4	43	0.53	13	5.2	28	0.40
	+	0.015	0.380	26	1.30	1.18	18	6.2	40	0.34	12	3.0	22	0.24
6 - Chemin Sous-Riette	+	0.000	0.060	7	1.00	1.00	23	8.2	39	0.36	29	3.0	35	0.10
	+	0.070	0.223	16	1.00	1.00	38	11.9	61	0.32	32	5.9	43	0.19
7 - Rue de la Vernie	+	0.015	0.315	31	1.00	1.00	54	11.9	78	0.22	42	12.7	68	0.30
8 - Industriestrasse, Oberbuchsiten	+	1.000	15.000	15	1.15	1.12	43	13.6	81	0.32	29	6.1	46	0.21
9 - Chemin de Ballègue	+	0.000	1.080	55	1.40	1.12	72	17.0	148	0.24	63	17.8	110	0.28
10 - Chemin du Bois-Murat	+	0.000	0.050	6	1.40	1.12	130	31.3	270	0.24	109	37.6	206	0.35
	+	0.050	0.240	19	1.40	1.12	61	8.9	111	0.15	49	9.9	77	0.20
11 - Chemin des Orchez	+	0.000	0.530	53	1.30	1.12	66	18.1	133	0.27	54	15.2	95	0.28

Les graphiques suivants présentent les valeurs dv_{BB} en fonction des déflexions dv_{FWD} , pour une charge de 50kN, avec et sans considération des zones homogènes comprenant moins de 10 points de mesure.

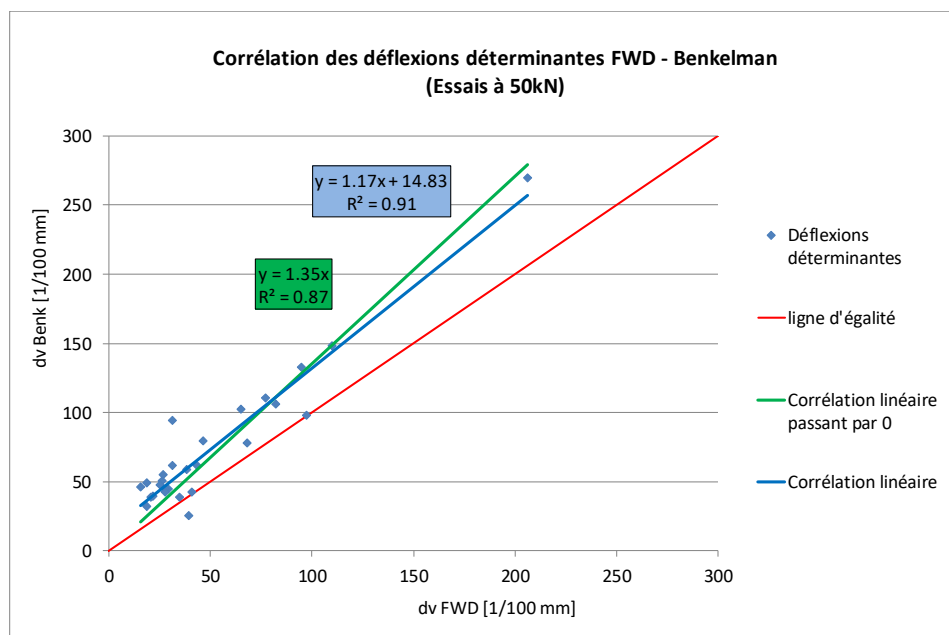


Fig 4.8 - Corrélation des déflexions déterminantes FWD – Benkelman, avec les zones homogènes comprenant moins de 10 points de mesure.

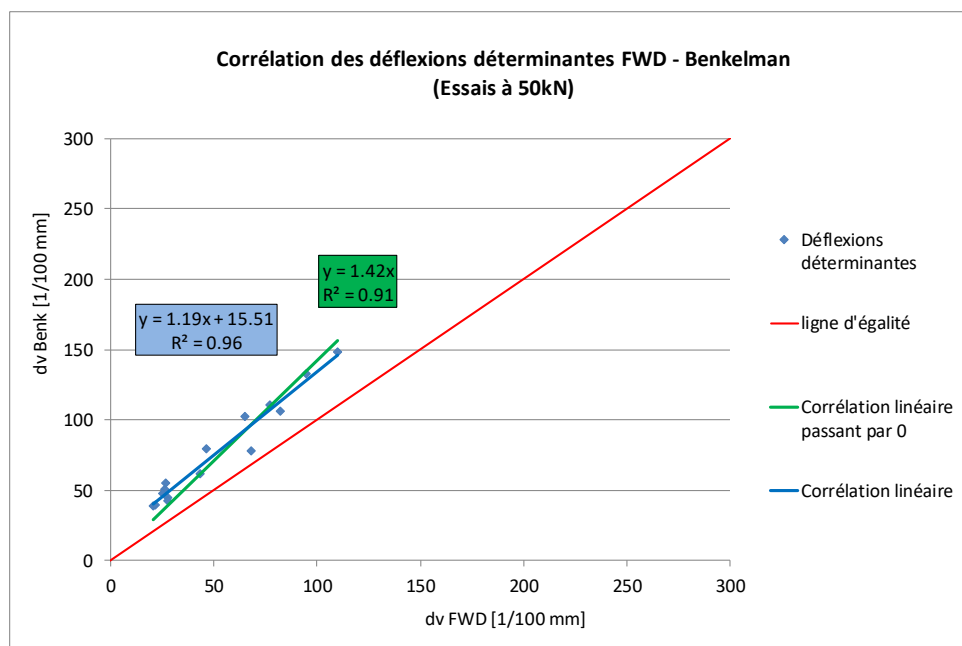


Fig 4.9 - Corrélation des déflexions déterminantes FWD – Benkelman, sans les zones homogènes comprenant moins de 10 points de mesure.

Tab. 4.4 – Synthèse des corrélations linéaires des déflexions déterminantes FWD – Benkelman

Echantillon de zones homogènes	Nombre de zones homogènes	Corrélation linéaire	Corrélation linéaire Passant par 0
Avec zones homogènes < 10 points de mesure	26	$dv_{BB} = 1.17 \cdot dv_{FWD} + 14.8$ ($R^2 = 0.91$)	$dv_{BB} = 1.35 \cdot dv_{FWD}$ ($R^2 = 0.87$)
Sans zones homogènes < 10 points de mesure	15	$dv_{BB} = 1.19 \cdot dv_{FWD} + 15.5$ ($R^2 = 0.96$)	$dv_{BB} = 1.42 \cdot dv_{FWD}$ ($R^2 = 0.91$)

Les corrélations linéaires en excluant les zones homogènes avec moins de 10 points de mesure présentent une fiabilité plus élevée. De ce fait et pour se conformer aux recommandations de la norme SN 640 733b, on retient ces corrélations pour les analyses qui suivent.

Les coefficients de détermination obtenus sont nettement supérieurs à ceux calculés pour la comparaison des valeurs de déflexions isolées.

- pour la corrélation linéaire, le R^2 passe de 0.79 à 0.96.
- pour la corrélation linéaire passant par 0, le R^2 passe de 0.76 à 0.91.

Le rapport entre les déflexions Benkelman et FWD est plus élevé pour les déflexions déterminantes que pour les déflexions individuelles brutes. Cela s'explique par plusieurs facteurs :

- Les facteurs de correction saisonniers sont souvent plus élevés pour les déflexions Benkelman que pour les déflexions FWD,
- La correction en température est différente pour les déflexions Benkelman et FWD. Celle-ci a eu pour effet d'accroître le rapport D_{BB} / D_{FWD} ,
- La dispersion des valeurs de déflexions Benkelman est souvent plus élevée que celle des valeurs FWD (moyenne des écart-types de 11 [1/100 mm] pour les déflexions Benkelman et de 7 [1/100 mm] pour les valeurs FWD).

Les corrélations des déflexions déterminantes FWD et Benkelman sont plus convaincantes. Le fait de lisser les déflexions, en additionnant la moyenne et 2 écart-types par zone homogène, permet de réduire l'influence défavorable de déflexions divergentes.

Au regard des résultats du tableau 4.4, la corrélation Benkelman – FWD présentant la plus grande fiabilité est la corrélation linéaire, après exclusion des zones homogènes avec moins de 10 points de mesure, à savoir la formule [Eq. 4.2] :

$$dv_{BB} = 1.19 \cdot dv_{FWD} + 15.5$$

Eq. 4.2

5 Diagramme de renforcement FWD

5.1 Etablissement du diagramme de renforcement FWD

Pour ce mandat de recherche, il est prévu d'établir un diagramme de renforcement pour les déflexions FWD du même type que celui figurant pour les mesures Benkelman dans la norme SN 640 733b.

Le diagramme de renforcement pour les mesures Benkelman de la norme SN 640 733b est le suivant :

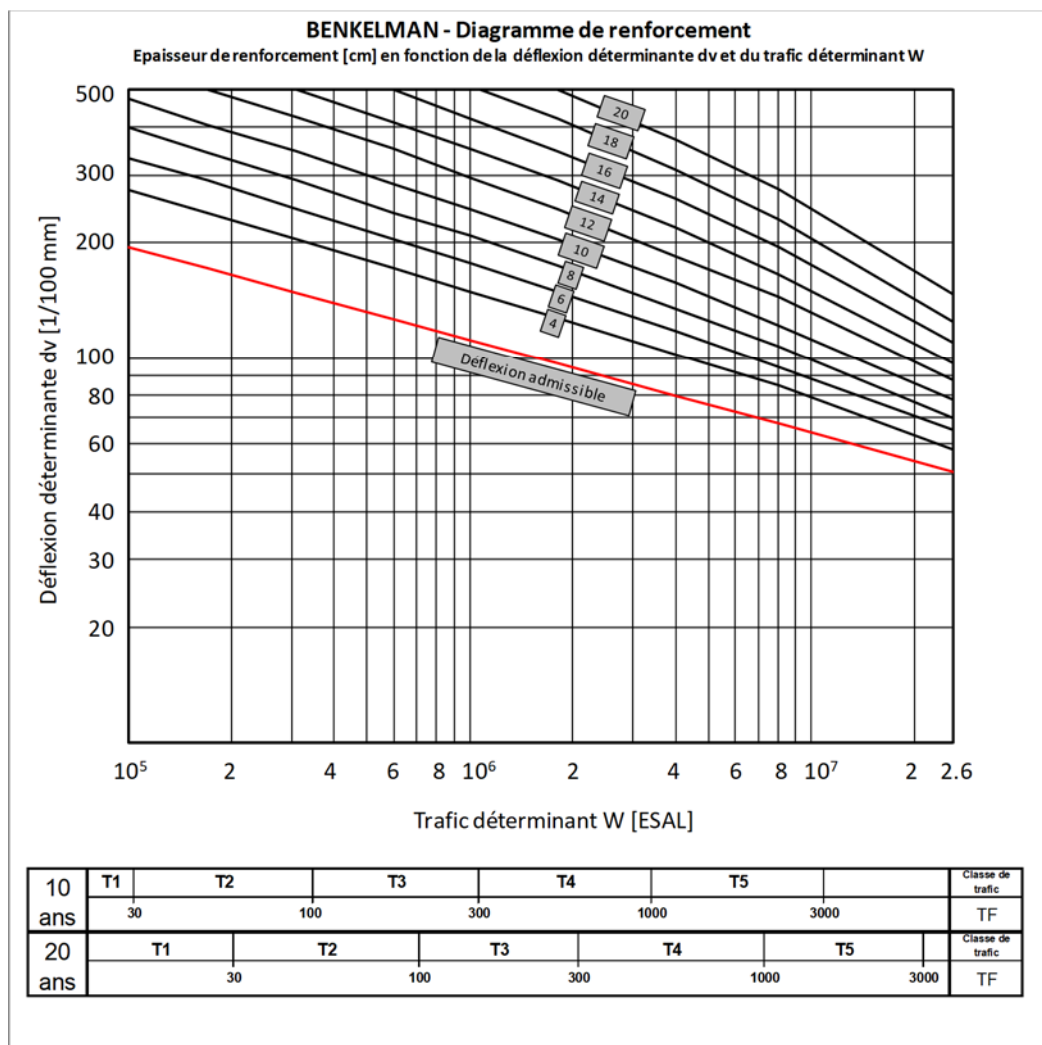


Fig 5.1 - Diagramme de renforcement pour les déflexions Benkelman - Epaisseur de renforcement [cm] en fonction de la déflexion déterminante d_{vBB} et du trafic déterminant W

En connaissant la déflexion déterminante issue des mesures Benkelman et le trafic pondéral déterminant évalué selon la norme SN 640 320 [3], l'épaisseur de renforcement théorique est déduite du diagramme de renforcement de la [Fig 5.1].

La classe de trafic T6 n'apparaît pas dans ce diagramme de renforcement, car elle n'existait pas à la publication de la norme SN 640 733b [1].

Au regard des résultats du [chapitre 4], la corrélation Benkelman – FWD présentant la plus grande fiabilité est la formule [Eq. 4.2]

Le diagramme de renforcement pour les déflexions FWD proposée en [Fig 5.2] est établi à partir du diagramme de renforcement Benkelman et en convertissant les déflexions déterminantes Benkelman en déflexions déterminantes FWD.

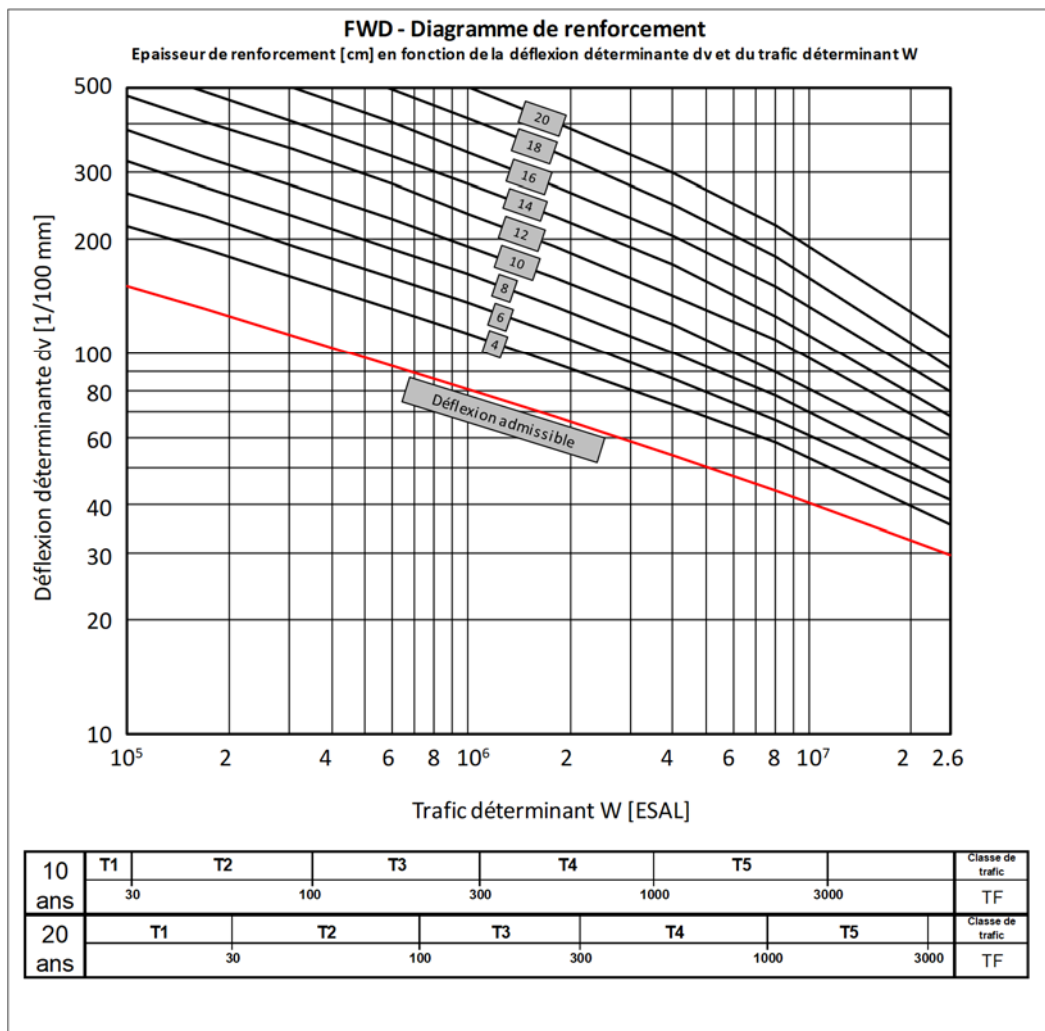


Fig 5.2 - Diagramme de renforcement pour les déflexions FWD - Epaisseur de renforcement [cm] en fonction de la déflexion déterminante d_{vFWD} et du trafic déterminant W

5.2 Comparaison des renforcements entre Benkelman et FWD

Au moyen des diagrammes de renforcement présentés au [chapitre 5.1], les épaisseurs de renforcement sont calculées pour les déflexions déterminantes Benkelman et FWD pour les zones homogènes des mesures comparatives [chapitre 4]. Les épaisseurs sont calculées pour des trafics T1 à T5 sur une période de 20 ans. Pour chaque classe de trafic, le trafic déterminant W médian est retenu.

Légende du tableau 5.1 :

d_{FWD}	Déflexion déterminante FWD	[1/100 mm]
$\bar{d}$	Déflexion moyenne à la température de 20°C	[1/100 mm]
σ	Ecart type des valeurs de déflexions	[1/100 mm]
C_{FWD}	Facteur global de correction pour les déflexions FWD	[-]
CV	Coefficient de variation	[-]

Tab. 5.1 – Appréciation de la différence de renforcement entre Benkelman et FWD

Différence de renforcement entre Benkelman et FWD, en valeur absolue	Appréciation
[cm]	[-]
Inférieur à 1 cm	Très faible
Entre 1 et 2 cm	Faible
Entre 2 et 3 cm	Moyenne
Entre 3 et 4 cm	Elevée
Supérieur à 4 cm	Très élevée

Tab. 5.2 – Comparaison des renforcements [cm] pour les déflexions Benkelman et FWD pour des tronçons homogènes avec au moins 10 points de mesure

Chantier	Nb Points	dv _{BB}	Renforcement Benkelman					dv _{FWD}	Renforcement FWD					Différence de renforcement entre Benkelman et FWD					Classe de trafic estimée
			T1	T2	T3	T4	T5		T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	
[-]	[-]	[1/100 mm]	[cm]					[1/100 mm]	[cm]					[cm]					[-]
1 - RC1400	26	51	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	T3
	11	55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	T3
3 - Avenue du Moulins	26	102	0.0	0.0	0.2	4.5	10.5	65	0.0	0.0	0.0	3.1	9.0	0.0	0.0	0.2	1.5	1.5	T3
	26	106	0.0	0.0	0.7	5.1	11.1	82	0.0	0.0	1.6	6.2	12.1	0.0	0.0	0.8	-1.0	-1.0	T3
4 - N12	21	48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	T5
	20	45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	T5
5 - Rte de Châte	11	39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	T3
	11	43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	T3
	26	40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	T3
6 - Chemin Sous-Riette	16	61	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	43	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.8	T2
7 - Rue de la Vernie	31	78	0.0	0.0	0.0	0.3	5.9	67	0.0	0.0	0.0	3.4	9.3	0.0	0.0	0.0	-3.3	-3.7	T4
8 - Industriestrasse, Oberbuchsiten	15	79	0.0	0.0	0.0	0.6	6.2	46	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.6	2.2	T1
9 - Chemin de Ballègue	55	148	0.0	1.2	5.1	9.9	15.8	110	0.0	1.2	5.0	9.8	15.8	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	T1
10 - Chemin du Bois-Murat	19	111	0.0	0.0	1.2	5.7	11.7	77	0.0	0.0	0.9	5.3	11.3	0.0	0.0	0.4	0.5	0.5	T1
11 - Chemin des Orchez	53	133	0.0	0.0	3.6	8.4	14.3	95	0.0	0.0	3.2	8.0	13.9	0.0	0.0	0.5	0.5	0.5	T1

Les résultats du tableau 5.2 font ressortir les constatations suivantes :

- Pour la majeure partie des tronçons, la différence d'épaisseur de renforcement préconisée, selon que l'on mesure avec le Benkelman et le FWD, est inférieure à 2 cm, soit une faible différence.
- Pour deux zones homogènes (Industriestrasse et Rue de la Vernie), cette différence est supérieure à 2 cm. Pour ces zones, la différence de renforcement entre Benkelman et FWD atteint une valeur maximale de 3.7 cm en valeur absolue (hypothèse classe de trafic T5 pour le tronçon « Rue de la Vernie »).

Le cas de l'Industriestrasse présente un intérêt particulier puisque ce tronçon a été relevé par le FWD 8082-135 et 7 poutres Benkelman [chapitre 2.3.3] dont celle utilisée pour ce mandat de recherche. A partir des déflexions mesurées, les déflexions déterminantes et les épaisseurs de renforcement sont calculées pour chacun des appareils Benkelman et comparées aux épaisseurs de renforcements calculées pour le FWD 8082-135 :

Tab. 5.3 – Comparaison des renforcements pour les déflexions des appareils Benkelman et FWD pour l'Industriestrasse

Appareil	dv _{BB}	Epaisseur de renforcement					Différence d'épaisseurs de renforcement entre Benkelman (L1 – L7) et FWD 8082-135 (L9)				
		T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
[-]	[1/100 mm]	[cm]					[cm]				
L1	70	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
L2	72	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
L3	59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.5
L4	57	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.9
L5	75	0.0	0.0	0.0	0.0	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1
L6	61	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.9
L7	79	0.0	0.0	0.0	0.6	6.2	0.0	0.0	0.0	0.6	2.2
L9	46	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9					

La variabilité des déflexions selon les appareils Benkelman, déjà mentionnée dans le [chapitre 2.3.3], se répercute sur les épaisseurs de renforcement : selon l'appareil Benkelman utilisé, l'épaisseur de renforcement préconisée est comprise entre 0 et 6.2 cm !

La différence entre le renforcement FWD et le renforcement Benkelman varie donc fortement selon l'appareil Benkelman utilisé : cette différence est comprise entre -3.9 et 2.2 cm.

La poutre Benkelman utilisée dans le cadre de ce projet (L7) préconise le renforcement le plus élevé (6.2 cm) soit une différence de 2.2 cm par rapport au renforcement FWD (3.9 cm).

La mauvaise reproductibilité des appareils Benkelman, en général, pourrait remettre en cause l'utilisation de la corrélation entre un appareil Benkelman et un FWD pour l'établissement d'un diagramme de renforcement FWD.

5.3 Mesures FWD avant et après renforcement

5.3.1 Programme de mesures

Afin de valider le diagramme de renforcement pour les mesures FWD [Fig 5.2], des mesures FWD avant et après renforcement sont effectuées dans le cadre de ce mandat :

Tab. 5.4 – Liste des tronçons testés avant et après renforcement

Projet	Nb. de points	Ep. de renforcement	Type de revêtement mis en œuvre	Dates des mesures avant renforcement	Dates des mesures après renforcement
[-]	[-]	[cm]	[-]	[jj.mm.aaaa]	[jj.mm.aaaa]
RC 151 - Villars - Bozon – L'Isle	69	4	AC11N	25.08.2015	09.09.2015
	33	4	AC11N	19.08.2015	09.09.2015
RC 610 - Granges-sous-Trey - Trey	51	10	ACT16N (50 à 70mm) + AC11N (40mm)	09.09.2015	29.09.2015

5.3.2 Comparaison des déflexions avant et après renforcement

Les graphiques ci-dessous comparent les résultats des déflexions avant et après renforcement. Les déflexions ont été corrigées à 20°C afin d'obtenir des résultats comparables.

Légende des figures 5.3 à 5.6 :

- d₋₄ Déflexion à -4 cm du niveau avant renforcement, corrigée à 20°C [1/100 mm]
- d₋₁₀ Déflexion à -10cm du niveau après renforcement, corrigée à 20°C [1/100 mm]
- d₀ Déflexion après renforcement, à la température de 20°C [1/100 mm]

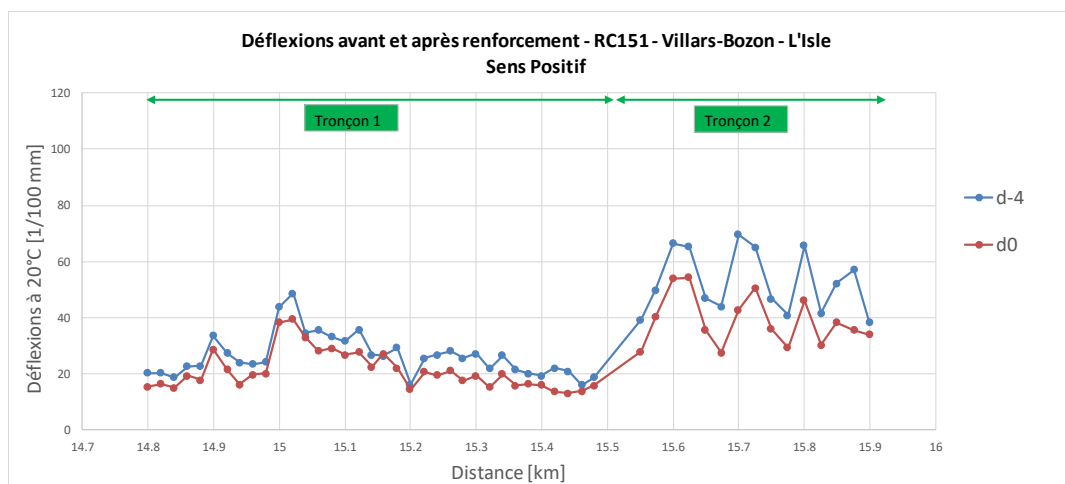


Fig 5.3 – Déflexions FWD avant et après renforcement de 4 cm, sur la RC151 – Sens Positif

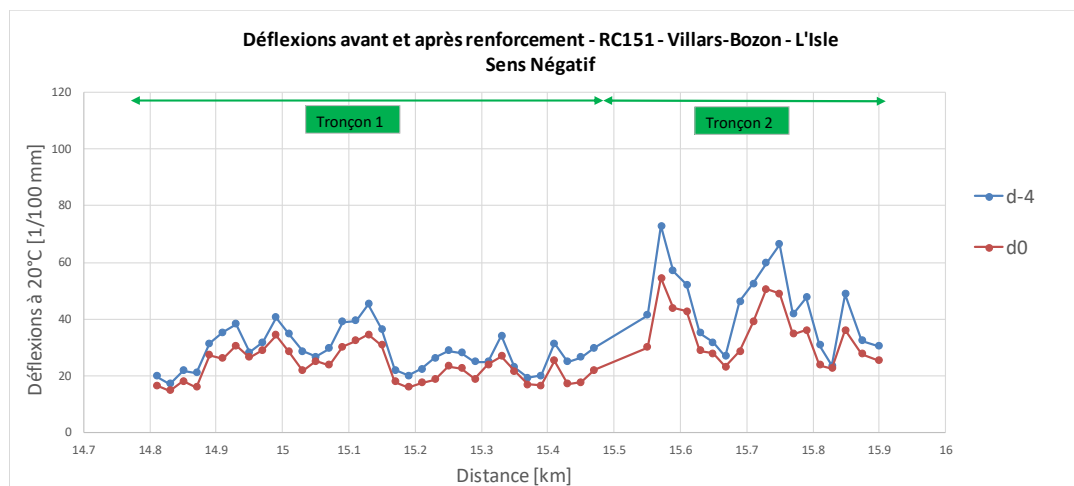


Fig 5.4 – Déflexions FWD avant et après renforcement de 4 cm, sur la RC151 – Sens Négatif

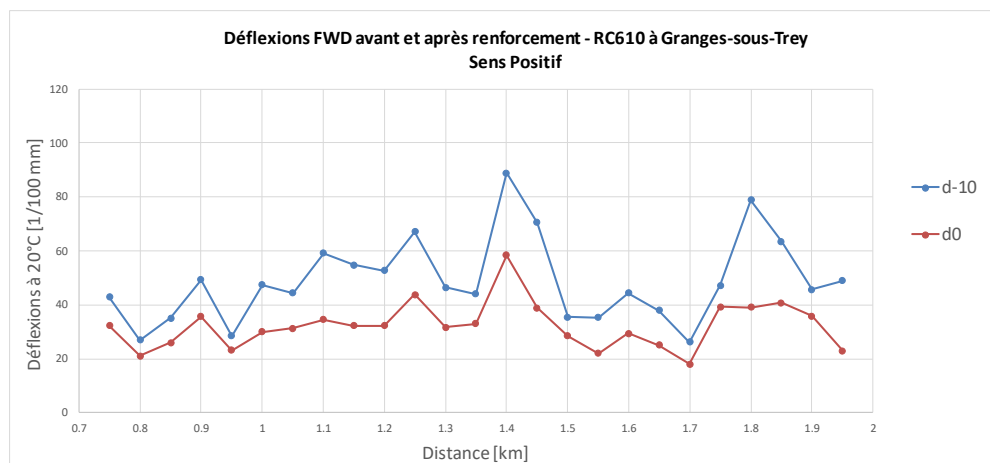


Fig 5.5 – Déflexions FWD avant et après renforcement de 10 cm, sur la RC610 – Sens Positif

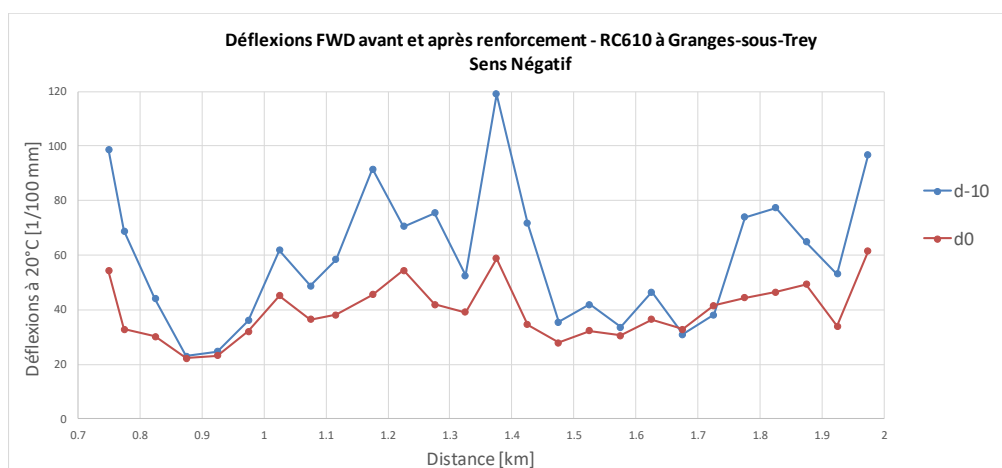


Fig 5.6 – Déflexions FWD avant et après renforcement de 10 cm, sur la RC610 – Sens Négatif

Les graphiques présentent des résultats de déflexions cohérents, à savoir que les déflexions après renforcement sont bien plus faibles qu'avant renforcement. Cependant,

pour 3 points de mesures, la déflexion avant travaux est inférieure à la déflexion après travaux : cette hausse de la déflexion va de 1 à 4 [1/100mm].

Plutôt qu'une perte de portance réelle qui serait étrange après un renforcement de structure, ce phénomène s'explique probablement par les incertitudes liées à la mesure :

- Incertitude liée au positionnement de la plaque de mesure, estimée à +/-1m
- Incertitude liée à la correction à la température à 20°C

Le gain en portance est visualisé également en reportant Δd en fonction de la déflexion avant renforcement, voir [Fig 5.7] et [Fig 5.8] :

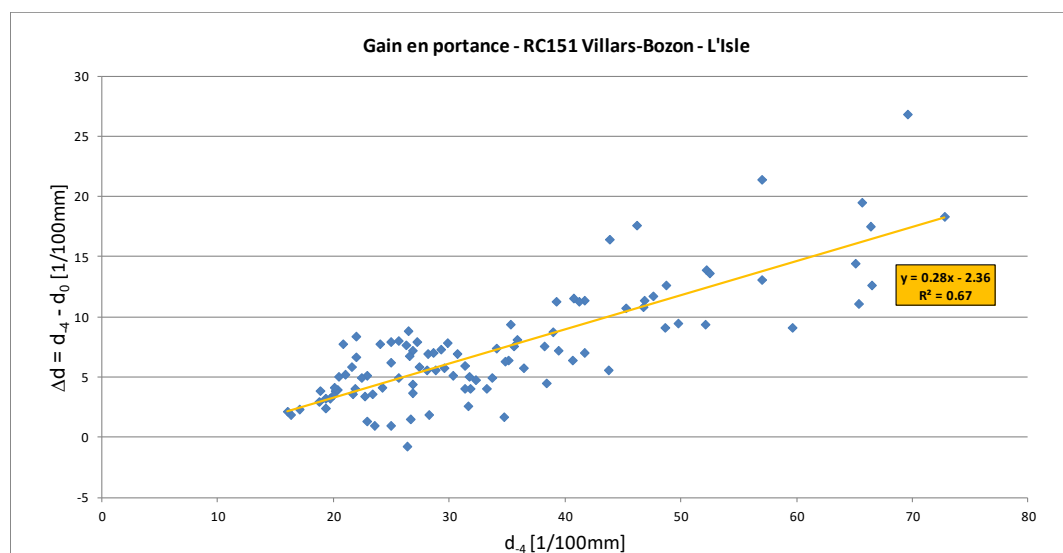


Fig 5.7 – RC151 Villars-Bozon – L'Isle – Δd pour un renforcement de 4 cm

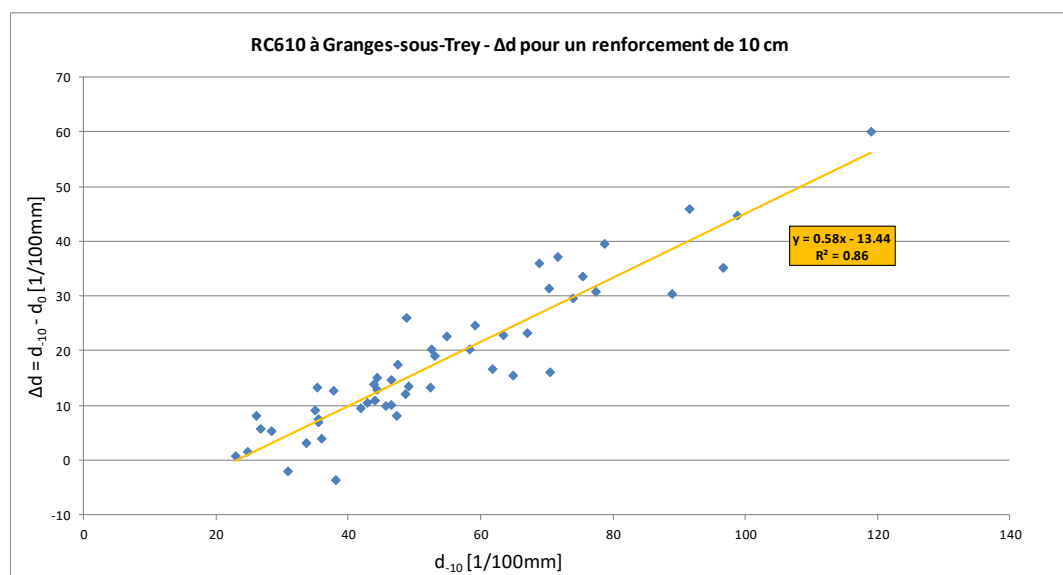


Fig 5.8 – RC610 à Granges-sous-Trey – Δd pour un renforcement de 10 cm

Le gain en portance est d'autant plus élevé que la déflexion avant renforcement est élevée (et que le renforcement est important). La même observation peut être déduite des diagrammes de renforcement en observant les écarts entre les différentes courbes de renforcement.

5.3.3 Comparaison avec le diagramme de renforcement FWD

Dans le tableau 5.5 figurent les déflexions déterminantes dv_{FWD} avant et après renforcement, calculés selon chapitre 4.4 :

Légende du tableau 5.5 :

dv_{FWD}	Déflexion déterminante FWD	[1/100 mm]
$\bar{d}$	Déflexion moyenne à la température de 20°C	[1/100 mm]
σ	Ecart type des valeurs de déflexions	[1/100 mm]
C_{FWD}	Facteur global de correction pour les déflexions FWD	[-]
CV	Coefficient de variation	[-]

Tab. 5.5 – Déflexions déterminantes avant et après renforcement

Projet	Nb. Points	Epaisseur de renforcement	Avant renforcement					Après renforcement				
			CV	C_{FWD}	$\bar{d}$	σ	dv_{FWD}	CV	C_{FWD}	$\bar{d}$	σ	dv_{FWD}
[-]	[-]	[cm]	[-]		[1/100 mm]			[-]		[1/100 mm]		
RC 151 – Villars -Bozon – L'Isle	69	4	0.26	1.16	27	7	49	0.29	1.18	22	6	41
	33	4	0.28	1.16	48	13	87	0.16	1.18	37	6	57
RC 610 – Granges-sous-Trey - Trey	51	10	0.39	1.18	54	21	114	0.28	1.18	36	10	66

Pour les 3 zones homogènes, les déflexions déterminantes avant et après renforcement, ainsi que la déflexion théorique dv_{th} après travaux sont reportés sur le diagramme de renforcement FWD (exemple d'utilisation du diagramme de renforcement pour la RC610 en [Fig 5.9]).

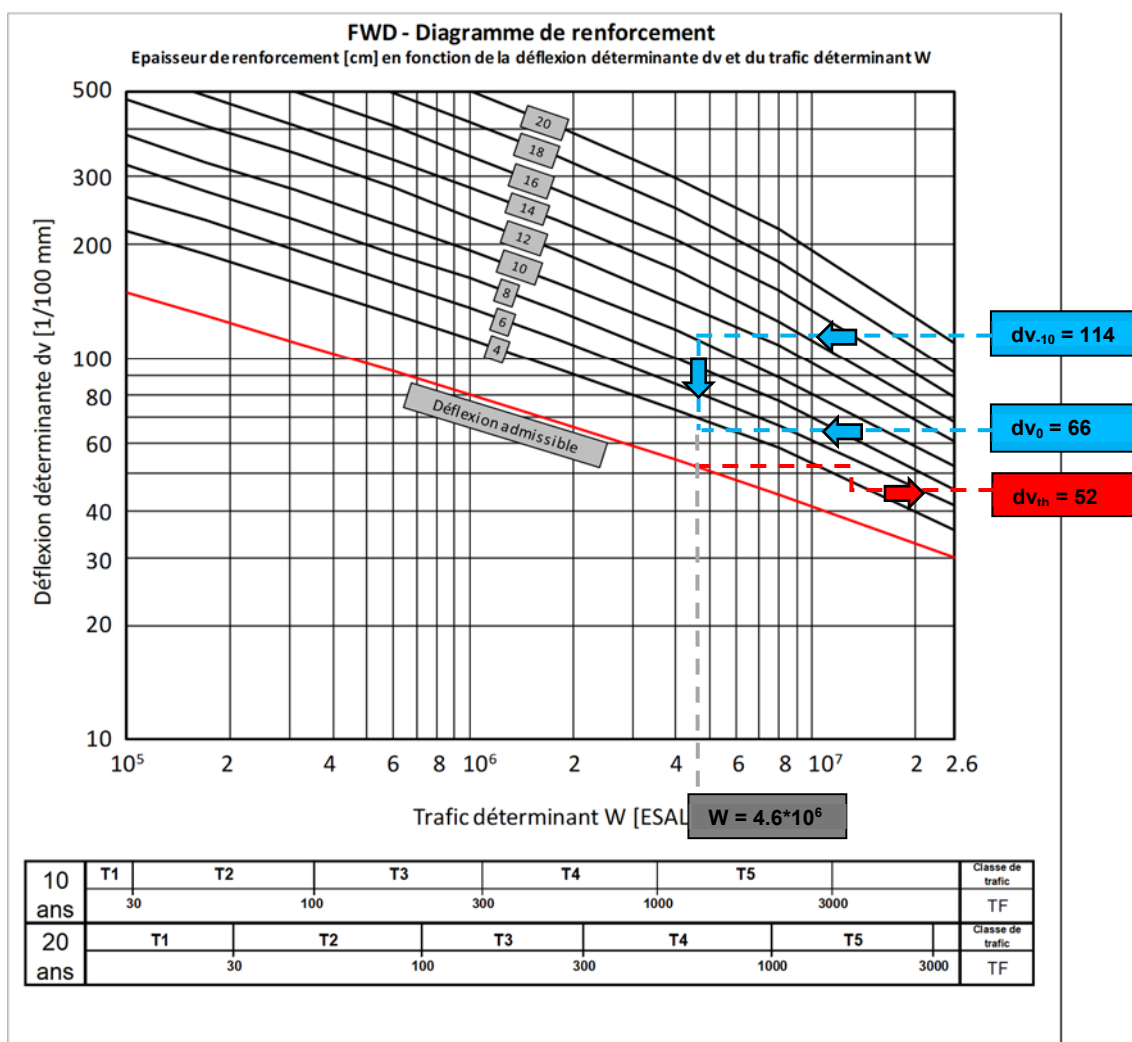


Fig 5.9 – Exemple d'utilisation du diagramme de renforcement pour la RC610

Tab. 5.6 – Différence entre dv_{th} et dv_{FWD} après renforcement

Projet	Nb. Points	Ep. de renforcement théorique	dv_{FWD} avant renforcement	dv_{FWD} après renforcement	dv_{th} après renforcement	Différence entre dv_{th} et dv_{FWD} après renforcement	
[-]	[-]	[cm]	[1/100 mm]	[1/100 mm]	[1/100 mm]	[1/100 mm]	[%]
RC 151 – Villars -Bozon – L'Isle Tronçon 1	69	4	49	41	38	+3	+8%
RC 151 – Villars -Bozon – L'Isle Tronçon 2	33	4	87	57	63	-6	-10%
RC 610 – Granges-sous-Trey - Trey	51	10	114	66	52	+14	+27%

L'écart entre les déflexions déterminantes relevées et théoriques après renforcement varie en valeur absolue entre 8 et 27%.

Plus concrètement et en accord avec le diagramme de renforcement, le gain en déflexion mesuré correspond à :

- 3 cm sur la RC151 – Tronçon 1
- 5 cm du RC151 – Tronçon 2
- 7 cm sur la RC610

Pour la RC151 le gain en portance mesuré est proche de l'épaisseur réellement posée qui est de 4cm.

En revanche pour la RC610, on constate une différence de 3 cm entre le gain en portance de 7 cm mesuré et le renforcement réel de 10 cm.

Ces résultats restent cohérents et les différences constatées peuvent s'expliquer par plusieurs incertitudes liées :

- A la comparaison des déflexions : inévitablement des corrections en température doivent être appliquées pour comparer les déflexions avant et après renforcement
- A la structure testée :
 - o incertitude sur l'épaisseur mise en place et son homogénéité sur le profil en long.
 - o les modules varient selon les types de matériaux bitumineux employés. Un renforcement de même épaisseur devrait avoir un impact différent sur les déflexions selon que l'on met en œuvre différents types de matériaux bitumineux.
- Il est admis qu'après renforcement la déflexion théorique correspond à la déflexion admissible. En d'autres termes, le renforcement permet de combler parfaitement le manque de portance de la chaussée (pas de sur-, ni de sous-dimensionnement). En considérant d'autres hypothèses, les résultats varieraient légèrement. Cela peut être illustré par un exemple (RC610) : si le renforcement nécessaire est de 14 cm et le renforcement effectif est de 10 cm, la déflexion théorique dv_{th} après renforcement serait de 54 [1/100 mm] au lieu de 52 [1/100 mm].

6 Conclusions

6.1 Mesures comparatives Benkelman - FWD

Le 1^{er} objectif de ce rapport de recherche consiste à établir une corrélation fiable entre les déflexions Benkelman et FWD. Plusieurs difficultés ont été rencontrées pour y parvenir :

- Tout d'abord, les méthodes de mesure Benkelman et FWD sont différentes [chapitre 2]. Le type de charge, la température et l'épaisseur de l'enrobé ainsi que les conditions saisonnières sont des paramètres qui interviennent dans la différence des résultats entre les déflexions Benkelman et FWD.
- Ensuite, une faible reproductibilité des déflexions Benkelman a été constatée lors des essais croisés de novembre 2015, décrit dans le [chapitre 2.3.3]. Ces essais comparatifs ont montré une forte variabilité des déflexions selon l'appareil Benkelman utilisé. Comme évoquée au [chapitre 2.3.3], la reproductibilité de l'appareil FWD est très bonne.
- Enfin, les doutes existent sur la fiabilité de l'appareil de mesure Benkelman utilisé dans le cadre de ce projet. Les déflexions de cet appareil Benkelman présentent une grande variabilité pour plusieurs chantiers provoquant des écarts importants entre les déflexions FWD 8082-135 et Benkelman. De plus, les essais comparatifs Benkelman entre 7 laboratoires [chapitre 2.3.3] a également démontré que la reproductibilité de cette poutre Benkelman est particulièrement faible. Malheureusement, le rapport de ces essais comparatifs a été communiqué en mars 2016, soit après la fin des mesures comparatives effectuées dans le cadre de ce mandat de recherche.

Ces éléments, et en particulier la faible reproductibilité de la poutre Benkelman, peuvent expliquer une corrélation insuffisante entre les déflexions brutes du Benkelman et du FWD [chapitre 4.3]. Le coefficient de détermination de cette corrélation est de 0.76 ce qui est inférieur aux attentes initiales.

En revanche, la corrélation des déflexions déterminantes FWD et Benkelman est plus convaincante. Le fait de lisser les déflexions, en additionnant la moyenne et 2 écart-types par zone homogène, permet de réduire l'influence défavorable de déflexions divergentes.

Après exclusion des petites zones (zones avec moins de 10 points de mesure), la corrélation suivante est obtenue :

$$dv_{BB} = 1.19 \cdot dv_{FWD} + 15.5$$

Eq. 6.1

Le coefficient de détermination pour cette corrélation est très bon (0.96). Cependant, il convient de considérer cette corrélation avec précaution, compte tenu des difficultés susmentionnées.

6.2 Diagramme de renforcement FWD

La comparaison des déflexions déterminantes [chapitre 4.4] a donc permis d'aboutir à une corrélation exploitable ([Eq. 4.2] ou [Eq. 6.1]).

Cette corrélation a été utilisée pour accomplir le 2ème objectif du mandat de recherche, à savoir l'établissement d'un diagramme de renforcement pour le FWD [chapitre 5.1].

L'utilisation de ce diagramme a montré des résultats encourageants :

- Pour la majeure partie des zones homogènes testées, les épaisseurs de renforcement calculées à partir du diagramme de renforcement nouvellement établie pour le FWD sont proches de celles calculées avec le Benkelman utilisé pour ce projet [chapitre 5.2, tableau 5.2].
- Les mesures FWD avant et après renforcement ont révélé des résultats cohérents, avec des gains de déflexions mesurés comparables aux gains théoriques issus du nouveau diagramme de renforcement FWD [chapitre 5.3.3, tableau 5.6].

En revanche, l'établissement d'un diagramme FWD à partir de la corrélation des déflexions déterminantes Benkelman – FWD est remis en cause par la faible reproductibilité de la poutre Benkelman : le cas de l'Industriestrasse met en évidence des préconisations de renforcement variant entre 0 et 6.2 cm selon l'appareil Benkelman utilisé [chapitre 5.2, tableau 5.3].

6.3 Propositions pour la suite de recherche

Compte tenu des incertitudes liées à la comparaison entre les déflexions Benkelman et FWD, un doute existe sur la robustesse du diagramme de renforcement établi. Finalement, avec l'expérience des investigations réalisées dans le cadre de ce mandat, la validation du diagramme de renforcement FWD au moyen de 3 tronçons seulement (soit environ 150 points de mesure) avant et après renforcement apparaît alors présomptueuse.

Avant d'être introduit dans la norme SN 640 733b, des campagnes de mesures complémentaires avant et après renforcement au FWD devraient être effectuées pour :

- soit tester et valider le diagramme de renforcement établi dans ce rapport.
En complément, les résultats des déflexions déterminantes avant et après renforcement pourraient être comparés aux résultats issus d'une approche rationnelle, largement répandue pour l'analyse des déflexions FWD. Cette approche consiste à effectuer le rétro-calcul des modules élastiques des matériaux à partir du bassin de déflexion mesuré par le FWD puis à définir le trafic admissible en fonction des critères de fatigue de l'enrobé et de déformation des couches non traitées. Cette approche permet également de calculer des épaisseurs de renforcement théorique pour un trafic donné.
- soit établir un nouveau diagramme de renforcement FWD sans passer par une corrélation Benkelman – FWD. Dans ce cas, il faudra définir une déflexion déterminante admissible propre au FWD. Celle-ci pourrait être issue de la littérature ou pourrait être établie à partir de résultats issus d'une approche rationnelle.

Annexes

I	Résultats des campagnes de mesure.....	69
I.1	Mesures saisonnières.....	69
I.2	Mesures comparatives entre Benkelman et FWD.....	74
I.3	Mesures avant et après renforcement	86
II	Graphiques inténaires des mesures comparatives.....	95
III	Certificat CROW	105

I

I Résultats des campagnes de mesure

Légende des résultats

D _{BB}	Déflexion Benkelman brute	[1/100 mm]
D _{FWD}	Déflexion FWD brute	[1/100 mm]
D _{BB 20°C}	Déflexion Benkelman à la température de surface de 20°C	[1/100 mm]
D _{FWD 20°C}	Déflexion FWD brute à la température de l'enrobé de 20°C	[1/100 mm]
E _{p MB}	Epaisseur de matériaux bitumineux	[cm]
T _s	Température à la surface du revêtement bitumineux	[°C]
T _{MB}	Température au milieu des matériaux bitumineux	[°C]
I ₁	Indice I ₁ des dégradations de surface selon SN 640 925b	[-]
I _{A4}	Indice I _{A4} des dégradations structurelles selon SN 640 926	[-]

I.1 Mesures saisonnières

Chemin de Sous-Riette, le 20.03.2015

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
+	0.000	21.8	29	28
+	0.014	22.3	24	23
+	0.020	21.2	28	28
+	0.030	21.6	30	29
+	0.040	22.3	32	31
+	0.050	22.1	30	30
+	0.064	22.5	33	32
+	0.070	22.3	42	41
+	0.080	22.1	39	38
+	0.092	22.1	29	29
+	0.100	22.4	33	32
+	0.110	22.4	39	38
+	0.120	22.6	39	38
+	0.130	22.8	25	24
+	0.140	21.7	29	29
+	0.150	23.0	27	26
+	0.160	22.8	26	25
+	0.170	21.5	31	30
+	0.180	21.5	43	42
+	0.190	24.7	30	28
+	0.201	25.1	29	27
+	0.210	23.6	28	27
+	0.220	22.6	35	33
-	0.225	21.9	40	40
-	0.215	22.6	43	42
-	0.205	22.7	37	36

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
-	0.195	23.3	32	30
-	0.185	20.8	39	39
-	0.165	22.0	43	42
-	0.155	21.0	36	35
-	0.145	20.9	35	35
-	0.135	21.1	32	31
-	0.125	20.9	37	37
-	0.114	21.3	33	33
-	0.104	20.4	44	44
-	0.095	20.1	29	29
-	0.085	19.3	31	31
-	0.075	20.6	38	38
-	0.065	20.2	21	21
-	0.055	21.0	34	34
-	0.045	20.3	32	31
-	0.035	20.8	36	36
-	0.025	19.9	36	36
-	0.015	21.0	32	31
-	0.005	20.4	25	25

Chemin de Sous-Riette, le 28.09.2015

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
+	0.000	17.2	28	29
+	0.014	17.7	22	23
+	0.020	16.0	25	26
+	0.030	16.8	26	27
+	0.040	14.6	23	24
+	0.050	18.3	24	25
+	0.064	17.0	40	41
+	0.070	16.6	34	35
+	0.080	13.5	33	36
+	0.092	13.4	26	28
+	0.100	16.2	27	28
+	0.110	16.0	39	41
+	0.120	13.1	37	40
+	0.130	17.4	24	25
+	0.140	17.8	28	29
+	0.150	17.7	27	28
+	0.160	15.9	25	26
+	0.170	12.0	27	30

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
+	0.180	12.1	35	39
+	0.190	17.5	37	38
+	0.201	17.0	24	25
+	0.210	16.4	25	26
+	0.220	15.0	29	30
-	0.225	11.8	34	37
-	0.215	15.4	41	43
-	0.205	16.5	36	37
-	0.195	17.3	26	27
-	0.185	17.7	34	35
-	0.165	14.9	36	38
-	0.155	16.3	41	43
-	0.145	17.3	37	38
-	0.135	17.1	30	31
-	0.125	17.2	26	26
-	0.114	15.5	28	29
-	0.104	14.9	36	38
-	0.095	15.7	37	38
-	0.085	15.1	30	32
-	0.075	13.5	30	33
-	0.065	16.4	22	23
-	0.055	16.4	26	27
-	0.045	16.3	24	25
-	0.035	15.5	26	27
-	0.025	16.3	27	29
-	0.015	16.6	29	30
-	0.005	16.9	22	23

Rue de la Vernie, le 20.03.2015

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
+	0.005	22.2	47	46
+	0.015	22.1	41	40
+	0.025	21.5	17	17
+	0.035	21.6	16	15
+	0.045	23.0	17	16
+	0.055	23.4	48	46
+	0.065	23.5	50	48
+	0.075	23.3	42	40
+	0.085	23.3	46	44
+	0.095	23.4	48	46
+	0.105	23.4	59	57
+	0.115	23.0	46	45
+	0.125	23.6	45	43
+	0.135	23.1	38	36
+	0.145	23.0	37	35
+	0.155	23.2	42	40
+	0.165	23.2	39	37
+	0.175	23.1	49	47
+	0.185	23.1	69	66
+	0.195	23.5	68	65
+	0.205	23.1	61	58
+	0.215	23.4	60	58
+	0.225	21.5	60	58
+	0.235	23.9	34	33
+	0.245	23.1	59	57
+	0.255	23.3	39	38
+	0.265	23.1	35	34
+	0.275	23.1	40	38
+	0.285	23.0	43	41
+	0.295	23.1	42	40
+	0.305	23.2	45	43
+	0.315	22.5	32	31
+	0.323	22.4	30	29

Rue de la Vernie, le 28.09.2015

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
+	0.005	22.4	45	44
+	0.015	23.0	37	35
+	0.025	22.6	16	16
+	0.035	23.2	16	15
+	0.045	23.6	19	18
+	0.055	24.1	43	41
+	0.065	24.0	44	42
+	0.075	24.5	42	39
+	0.085	24.7	49	46
+	0.095	24.6	46	44
+	0.105	24.0	60	57
+	0.115	24.0	48	46
+	0.125	24.3	50	47
+	0.135	24.1	44	41
+	0.145	23.4	39	37
+	0.155	23.5	35	33
+	0.165	23.7	39	38
+	0.175	24.0	49	47
+	0.185	24.2	69	66
+	0.195	24.5	76	71
+	0.205	24.7	59	56
+	0.215	24.6	57	54
+	0.225	23.6	61	59
+	0.235	24.7	39	37
+	0.245	24.7	49	46
+	0.255	24.9	36	34
+	0.265	24.8	34	32
+	0.275	24.6	36	34
+	0.285	24.4	39	37
+	0.295	24.0	43	41
+	0.305	23.8	35	34
+	0.315	23.6	30	28
+	0.323	23.8	28	26

I.2 Mesures comparatives entre Benkelman et FWD

1 – RC1400, le 19.08.2013

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
-	62.200	23.2	20.2	34	31	18	18
-	62.160	23.8	20.5	34	30	19	19
-	62.120	23.7	20.5	30	26	16	16
-	62.080	23.9	20.6	24	20	14	14
-	62.040	24.3	20.8	16	12	14	14
-	62.000	25.7	21.6	18	12	18	17
-	61.960	25.1	21.3	20	15	15	15
-	61.920	25.3	21.4	16	11	15	15
-	61.880	26.3	22.0	20	14	18	17
-	61.840	26.7	22.2	16	9	20	19
-	61.800	26.6	22.2	30	23	21	20
-	61.760	27.6	22.8	26	18	19	19
-	61.720	28.2	23.1	28	20	18	17
-	61.680	29.3	23.8	34	25	21	20
-	61.640	29.9	24.1	28	18	18	17
-	61.600	29.5	23.9	26	17	17	17
-	61.560	30.0	24.2	22	12	16	15
-	61.520	30.1	24.3	60	50	28	26
-	61.480	30.5	24.5	20	10	14	13
-	61.440	30.4	24.5	32	22	21	19
-	61.400	30.4	24.5	28	18	15	14
-	61.360	30.8	24.7	30	19	16	15
-	61.320	30.7	24.7	22	11	13	12
-	61.280	30.8	24.7	24	13	17	16
-	61.240	31.0	24.8	24	13	17	16
-	61.200	30.8	24.7	20	9	17	16
+	61.220	21.1	18.9	22	21	18	18
+	61.260	21.9	19.3	26	24	19	19
+	61.300	21.9	19.3	26	24	25	25
+	61.340	21.8	19.3	22	20	17	17
+	61.380	22.0	19.4	16	14	15	15
+	61.420	22.0	19.4	32	30	18	18
+	61.460	21.9	19.3	22	20	19	19
+	61.500	22.1	19.4	40	38	25	26
+	61.540	22.2	19.5	44	42	22	22
+	61.580	22.3	19.6	60	58	19	19
+	61.620	22.2	19.5	52	50	16	16
+	61.661	22.2	19.5	56	54	22	22
+	61.700	22.1	19.5	66	64	24	24
+	61.741	23.1	20.1	54	51	19	19

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	61.780	23.4	20.2	44	41	18	18
+	61.820	23.4	20.2	38	35	17	17
+	61.860	23.6	20.3	38	34	18	18
+	61.901	23.5	20.3	38	35	24	24
+	61.941	23.4	20.2	30	27	18	17
+	61.980	23.7	20.4	22	18	14	14
+	62.021	23.0	20.0	24	21	15	15
+	62.061	23.0	20.0	22	19	15	15
+	62.101	23.0	20.0	28	25	16	16
+	62.141	22.8	19.9	34	31	18	18
+	62.181	23.1	20.1	28	25	14	14
+	62.220	22.1	19.6	32	30	20	20

2 - Chemin de la Redoute, Nyon, le 07.10.2013

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.000	19.5	18.0	40	41	31	31
+	0.010	23.5	20.3	46	43	31	31
+	0.020	25.4	21.4	24	19	20	20
+	0.030	25.2	21.3	34	29	21	20
+	0.040	26	21.8	30	24	23	23
+	0.050	25.1	21.4	36	31	21	21
+	0.060	24.4	21.0	20	16	20	19
+	0.070	24.5	21.1	20	16	25	25
+	0.080	23.3	20.4	6	3	36	35
+	0.090	23.8	20.7	16	12	26	26
+	0.100	19.1	18.1	14	15	24	24
+	0.110	18.4	17.7	14	16	25	26
+	0.120	19.1	18.2	10	11	23	24
+	0.130	17.9	17.5	4	6	19	20
+	0.140	22.4	20.1	24	22	21	21
+	0.150	22.5	20.2	24	22	23	23
+	0.160	22.4	20.1	12	10	19	19
+	0.170	18.5	17.9	20	22	20	21
+	0.180	17.8	17.6	28	30	35	36
+	0.190	17.8	17.6	-	-	25	25
-	0.195	19.1	18.4	62	63	59	60
-	0.185	17.8	17.4	-	-	47	48
-	0.175	17.9	17.5	24	26	34	34
-	0.165	17.8	17.4	50	52	62	64
-	0.155	21.7	20.9	58	56	75	74

3 - Avenue du Moulin, Morges, le 11.10.2013

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.000	8.0	6.8	-	-	39	43
+	0.015	8.0	6.8	38	50	29	32
+	0.030	8.0	6.8	70	82	53	59
+	0.045	8.0	6.8	-	-	40	44
+	0.060	8.0	6.8	28	40	26	29
+	0.075	8.0	6.8	-	-	37	41
+	0.090	8.0	6.8	-	-	33	37
+	0.105	8.0	6.8	38	50	43	48
+	0.120	8.0	6.8	28	40	35	39
+	0.135	8.0	6.8	46	58	38	42
+	0.150	8.0	6.8	54	66	42	47
+	0.165	8.0	6.8	54	66	35	39
+	0.180	8.0	6.8	-	-	41	45
+	0.195	8.0	6.8	38	50	55	61
+	0.210	8.0	6.8	36	48	30	33
+	0.225	8.0	6.8	44	56	39	43
+	0.240	8.0	6.8	56	68	43	47
+	0.255	8.0	6.8	-	-	42	46
+	0.270	8.0	6.8	-	-	42	46
+	0.285	8.0	6.8	40	52	34	38
+	0.300	8.0	6.8	58	70	33	37
+	0.315	8.0	6.8	62	74	47	52
+	0.330	8.0	6.8	56	68	37	41
+	0.345	8.0	6.9	56	68	40	44
+	0.360	8.0	6.9	16	28	31	34
+	0.367	8.0	6.9	-	-	22	25
-	0.367	9.0	7.5	-	-	27	30
-	0.360	9.0	7.5	-	-	21	23
-	0.345	9.0	7.5	42	53	32	36
-	0.330	9.0	7.5	46	57	44	49
-	0.315	9.0	7.5	30	41	38	41
-	0.300	9.0	7.5	62	73	70	77
-	0.285	9.0	7.6	58	69	41	45
-	0.270	9.0	7.6	52	63	34	38
-	0.255	9.0	7.6	36	47	27	30
-	0.240	9.0	7.6	32	43	32	35
-	0.225	9.0	7.6	50	61	39	43
-	0.210	9.0	7.6	44	55	35	39
-	0.195	9.0	7.6	64	75	60	67
-	0.180	9.0	7.6	42	53	46	51
-	0.165	9.0	7.6	42	53	44	48

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
-	0.150	9.0	7.6	-	-	70	77
-	0.135	9.0	7.6	46	57	36	40
-	0.120	9.0	7.6	64	75	50	55
-	0.105	9.0	7.6	26	37	39	43
-	0.090	9.0	7.6	40	51	29	32
-	0.075	9.0	7.6	-	-	40	44
-	0.060	9.0	7.6	34	45	43	47
-	0.045	9.0	7.6	32	43	38	41
-	0.030	9.0	7.6	92	103	60	66
-	0.015	9.0	7.6	62	73	50	55
-	0.000	9.0	7.6	32	43	30	33

4 - N12 – Riaz Ecuillens, le 18.10.2013

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
VN+	33.275	5.0	6.0	-	-	12	14
VN+	33.300	5.0	6.0	-	-	10	12
VN+	33.325	5.0	6.0	8	23	10	12
VN+	33.350	5.0	6.0	-	-	13	16
VN+	33.375	5.0	6.0	10	25	12	14
VR+	33.275	4.0	5.5	14	30	9	10
VR+	33.300	4.0	5.5	-	-	9	11
VR+	33.325	4.0	5.5	20	36	11	13
VR+	33.350	4.0	5.5	14	30	11	13
VR+	33.375	4.0	5.5	18	34	9	11
VN-	33.375	8.0	7.4	26	38	13	15
VN-	33.350	8.0	7.4	8	20	9	11
VN-	33.325	8.0	7.4	12	24	13	15
VN-	33.300	8.0	7.4	30	42	15	17
VN-	33.275	8.0	7.4	2	14	22	26
VR-	33.365	4.0	5.5	2	18	12	14
VR-	33.350	4.0	5.5	20	36	11	13
VR-	33.325	4.0	5.5	12	28	12	14
VR-	33.300	4.0	5.5	14	30	9	10
VR-	33.275	4.0	5.5	10	26	11	13
VR+	35.450	9.0	7.9	5	16	3	4
VR+	35.500	9.0	7.9	23	34	16	18
VR+	35.550	9.0	7.9	26	37	13	16
VR+	35.600	9.0	7.9	17	28	13	15
VR+	35.650	9.0	7.9	2	13	12	14
VR+	35.700	9.0	7.9	14	25	16	19

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
VR+	35.750	9.0	7.9	11	22	16	19
VR+	35.800	9.0	7.9	22	33	19	22
VR+	35.850	9.0	7.9	15	26	14	17
VR+	35.900	9.0	7.9	23	34	14	16
VR+	35.950	9.0	7.9	20	31	16	19
VR+	36.000	9.0	7.9	16	27	11	12
VR+	36.050	9.0	7.9	23	34	15	18
VR+	36.100	9.0	7.9	19	30	13	15
VR+	36.150	9.0	7.9	14	25	15	17
VR+	36.200	9.0	7.9	13	24	14	16
VR+	36.250	9.0	7.9	4	15	12	14
VR+	36.300	9.0	7.9	9	20	13	14
VR+	36.350	9.0	7.9	18	29	11	13
VR+	36.400	9.0	7.9	17	28	14	16
VR+	36.450	9.0	8.0	17	28	13	15
VR-	36.450	11.0	8.9	12	21	12	14
VR-	36.400	11.0	9.0	16	25	14	16
VR-	36.350	11.0	9.0	16	25	13	15
VR-	36.300	11.0	9.0	20	29	14	16
VR-	36.250	11.0	9.0	22	31	13	14
VR-	36.200	11.0	9.0	-	-	15	17
VR-	36.150	11.0	9.0	10	19	16	19
VR-	36.100	11.0	9.0	10	19	14	16
VR-	36.050	11.0	9.0	24	33	16	18
VR-	36.000	11.0	9.0	24	33	17	19
VR-	35.950	11.0	9.0	18	27	16	18
VR-	35.900	11.0	9.0	24	33	14	17
VR-	35.850	11.0	9.0	-	-	16	19
VR-	35.800	11.0	9.0	14	23	17	20
VR-	35.750	11.0	9.0	6	15	15	17
VR-	35.700	11.0	9.1	10	19	12	14
VR-	35.650	11.0	9.1	18	27	15	17
VR-	35.600	11.0	9.1	10	19	14	15
VR-	35.550	11.0	9.1	4	13	21	24
VR-	35.450	11.0	9.1	2	11	1	2

5 - Route de Châtel, Corsier-sur-Vevey - tronçon 1, le 03.09.2014

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.000	16.1	15.8	23	27	6	6
+	0.015	16.1	15.8	17	21	8	8

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.033	16.3	15.9	17	21	9	9
+	0.045	16.3	15.9	19	23	10	10
+	0.060	16.1	15.8	10	14	11	11
+	0.075	17.8	16.4	19	21	10	11
+	0.090	16.5	16.0	15	19	9	9
+	0.105	17.6	16.4	21	23	18	19
+	0.120	27.5	20.2	21	14	13	13
+	0.130	27.7	20.2	15	7	8	8
+	0.140	24.4	19.0	19	15	12	12

5 - Route de Châtel, Corsier-sur-Vevey - tronçon 2, le 03.09.2014

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.328	24.9	19.2	25	20	14	14
+	0.343	27.0	20.0	17	10	11	11
+	0.358	28.3	20.5	15	7	10	10
+	0.373	28.3	20.5	19	11	10	10
+	0.388	27.9	20.4	17	9	12	12
+	0.403	27.9	20.4	19	11	10	10
+	0.418	19.7	17.2	29	29	17	18
+	0.433	28.8	20.7	19	10	8	8
+	0.448	28.1	20.5	27	19	13	13
+	0.463	28.3	20.6	27	19	12	12
+	0.478	28.3	20.6	40	32	27	27

5 - Route de Châtel, Corsier-sur-Vevey - tronçon 3, le 03.09.2014

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.000	27.9	20.9			10	10
+	0.015	27.9	20.9	15	7	8	8
+	0.031	28.1	21.0	19	11	8	8
+	0.050	24.2	19.3	19	15	11	11
+	0.065	16.1	15.8	15	19	10	11
+	0.080	16.1	15.8	19	23	12	12
+	0.095	16.3	15.9	15	19	17	18
+	0.110	16.3	15.9	17	21	12	13
+	0.125	16.1	15.8	19	23	16	17
+	0.140	17.8	16.5	27	29	14	15
+	0.155	16.5	16.0	23	27	14	15
+	0.170	17.6	16.5	27	29	17	18

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.185	27.5	20.8	27	20	14	14
+	0.200	27.7	20.9	23	15	14	14
+	0.215	24.4	19.5	25	21	13	13
+	0.230	24.9	19.7	19	14	11	11
+	0.245	27.0	20.6	21	14	12	12
+	0.260	28.3	21.2	23	15	12	11
+	0.275	28.3	21.2	27	19	16	16
+	0.290	27.9	21.0	23	15	14	13
+	0.306	27.9	21.0	19	11	12	11
+	0.320	19.7	17.4	29	29	15	15
+	0.335	28.8	21.4	23	14	10	10
+	0.350	28.1	21.1	19	11	9	9
+	0.365	28.3	21.2	21	13	9	9
+	0.380	28.3	21.2	31	23	9	9

6 - Chemin Sous-Riette, Crissier, le 20.03.2015

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.000	27.6	21.8	33	25	29	28
+	0.014	28.4	22.3	43	35	24	23
+	0.020	26.6	21.2	22	15	28	28
+	0.030	27.3	21.6	33	26	30	29
+	0.040	28.3	22.3	18	10	32	31
+	0.050	28	22.1	35	27	30	30
+	0.060	28.5	22.5	29	21	33	32
+	0.070	28.2	22.3	65	57	42	41
+	0.080	27.9	22.1	53	45	39	38
+	0.090	27.8	22.1	45	37	29	29
+	0.100	28.3	22.4	53	45	33	32
+	0.110	28.2	22.4	47	39	39	38
+	0.120	28.6	22.6	51	42	39	38
+	0.132	28.8	22.8	33	24	25	24
+	0.140	27	21.7	37	30	29	29
+	0.151	29	23.0	41	32	27	26
+	0.161	28.6	22.8	33	24	26	25
+	0.171	26.6	21.5	41	34	31	30
+	0.182	26.5	21.5	75	69	43	42
+	0.195	31.5	24.7	47	36	30	28
+	0.202	32.2	25.1	39	27	29	27
+	0.212	29.7	23.6	39	29	28	27
+	0.223	28.2	22.6	40	32	35	33

7 - Rue de la Vernie, Crissier, le 20.03.2015

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.015	27.4	22.1	57	50	41	40
+	0.025	26.5	21.5	37	31	17	17
+	0.035	26.6	21.6	39	32	16	15
+	0.044	28.9	23.0	51	42	17	16
+	0.055	29.5	23.4	55	46	48	46
+	0.065	29.5	23.5	59	50	50	48
+	0.075	29.1	23.3	61	52	42	40
+	0.084	29	23.3	51	42	46	44
+	0.095	29.1	23.4	67	58	48	46
+	0.105	29.2	23.4	88	79	59	57
+	0.115	28.4	23.0	67	59	46	45
+	0.125	29.4	23.6	65	56	45	43
+	0.136	28.5	23.1	63	55	38	36
+	0.145	28.3	23.0	49	41	37	35
+	0.155	28.6	23.2	65	56	42	40
+	0.165	28.6	23.2	59	50	39	37
+	0.175	28.4	23.1	67	59	49	47
+	0.185	28.3	23.1	83	75	69	66
+	0.195	29	23.5	86	77	68	65
+	0.205	28.3	23.1	81	73	61	58
+	0.216	28.8	23.4	67	58	60	58
+	0.225	25.6	21.5	75	69	60	58
+	0.235	29.4	23.9	63	54	34	33
+	0.245	28	23.1	65	57	59	57
+	0.255	28.3	23.3	61	53	39	38
+	0.265	28	23.1	53	45	35	34
+	0.275	27.9	23.1	55	47	40	38
+	0.285	27.8	23.0	61	53	43	41
+	0.294	27.8	23.1	69	61	42	40
+	0.305	27.9	23.2	71	63	45	43
+	0.315	26.8	21.8	51	44	32	31

8 - Industriestrasse, Oberbuchsitzen, le 03.11.2015

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	1	9.1	7.6	24	35	29	33
+	2	9.3	7.7	26	37	23	26
+	3	8.9	7.5	24	35	16	18
+	4	9.3	7.7	36	47	24	28

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	5	9.5	7.9	12	23	28	31
+	6	9.8	8.0	18	28	24	27
+	7	9.5	7.9	32	43	21	24
+	8	9.9	8.1	54	64	29	33
+	9	9.6	8.0	26	36	19	21
+	10	9.3	7.8	8	19	20	22
+	11	10	8.2	48	58	33	37
+	12	10	8.2	40	50	31	35
+	13	10	8.2	44	54	31	35
+	14	9.9	8.2	50	60	33	37
+	15	9.8	8.1	32	42	24	27

9 - Chemin de Ballègue, Epalinges, le 12.11.2015

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.000	5.2	5.8	48	63	49	54
+	0.020	6.3	6.6	42	56	39	43
+	0.040	8.3	8.0	53	65	46	51
+	0.060	9	8.5			50	54
+	0.080	8	7.8	50	62	31	34
+	0.100	4.9	5.6	63	78	51	56
+	0.120	5.7	6.2	57	71	52	58
+	0.140	9.5	8.8	67	78	53	57
+	0.160	9	8.5	48	59	33	36
+	0.180	8.1	7.9	40	52	34	37
+	0.200	5.2	5.8	42	57	36	40
+	0.220	5.8	6.3	40	54	40	44
+	0.240	8.6	8.2	44	55	32	35
+	0.260	4.4	5.3	59	75	46	51
+	0.280	4.4	5.3	12	28	71	79
+	0.300	9.5	8.8	73	84	64	69
+	0.320	9.7	9.0	87	97	86	93
+	0.340	8.8	8.4	81	92	78	84
+	0.360	9.6	8.9	75	85	67	73
+	0.380	9.7	9.0	57	67	53	57
+	0.400	10.4	9.5	61	71	62	67
+	0.420	11.3	10.1	59	68	56	60
+	0.440	11.3	10.1	53	62	46	49
+	0.460	11.3	10.1	61	70	61	66
+	0.480	5.5	6.1	63	78	54	60
+	0.500	6.4	6.7	50	64	43	48

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.520	6.7	6.9	46	59	38	42
+	0.540	7.8	7.7	44	56	39	43
+	0.560	10.4	9.5	46	56	30	32
+	0.580	13.7	11.8	55	61	53	56
+	0.600	13	11.3	67	74	66	70
+	0.620	7.7	7.6	89	101	83	91
+	0.640	11.5	10.3	73	82	70	75
+	0.660	11.9	10.6	63	71	68	73
+	0.680	12	10.6	57	65	60	65
+	0.700	11.2	10.1	67	76	57	62
+	0.720	9.6	9.0	44	54	54	58
+	0.740	5.9	6.4	26	40	31	34
+	0.760	5.8	6.3	69	83	65	71
+	0.780	4.6	5.5	46	61	49	54
+	0.800	7.4	7.4	63	76	57	63
+	0.820	11.7	10.4	79	87	67	72
+	0.840	11.1	10.0	75	84	72	78
+	0.860	11.2	10.1	71	80	68	73
+	0.880	11.4	10.3	75	84	81	87
+	0.900	11.3	10.2	83	92	82	89
+	0.920	12.6	11.1	61	68	71	76
+	0.940	14.2	12.2	53	59	63	67
+	0.960	12	10.7	73	81	69	74
+	0.980	12.3	10.9	53	61	58	62
+	1.000	13.2	11.6	-	-	63	67
+	1.020	6.6	6.9	109	122	103	113
+	1.040	12.5	11.1	71	79	58	62
+	1.060	9.8	9.2	85	95	72	78
+	1.080	6.1	6.6	99	113	91	100

10 - Chemin du Bois-Murat, Epalinges, le 12.11.2015

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.000	10.8	10.7	77	86	63	67
+	0.010	13.1	12.4	125	132	95	100
+	0.020	10.1	10.2	160	170	139	150
+	0.030	8.2	8.7	95	107	94	102
+	0.040	8.1	8.7	147	159	146	158
+	0.050	8.9	9.3	115	126	70	75
+	0.060	9.8	10.0	42	52	39	42
+	0.070	9	9.4	59	70	54	58

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.080	12.5	12.0	55	63	48	51
+	0.090	11	10.9	46	55	42	45
+	0.100	11.4	11.2	57	66	45	48
+	0.110	16.7	15.2	46	49	37	38
+	0.120	12.4	12.0	55	63	41	44
+	0.130	10.6	10.6	42	51	38	41
+	0.140	8.3	8.9	63	75	47	51
+	0.150	7.7	8.5	50	62	43	47
+	0.160	7.7	8.5	38	50	40	43
+	0.170	7.8	8.5	50	62	51	56
+	0.180	10.9	10.9	50	59	45	48
+	0.190	8.2	8.9	36	48	37	40
+	0.200	8.4	9.0	65	77	66	72
+	0.210	8.7	9.2	46	57	40	43
+	0.220	8.7	9.2	50	61	49	53
+	0.230	12.8	12.3	69	76	69	73
+	0.240	15.4	14.3	61	66	38	40

11 - Chemin des Orchez, Epalinges, le 12.11.2015

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.000	14.9	12.8	113	118	84	89
+	0.010	16.8	14.1	87	90	75	80
+	0.020	17.2	14.4	71	74	71	75
+	0.030	17.1	14.4	69	72	79	83
+	0.040	17.1	14.4	67	70	77	81
+	0.050	16.7	14.1	50	53	66	70
+	0.060	14.9	12.9	63	68	50	53
+	0.070	13.2	11.8	57	64	55	59
+	0.080	13.9	12.3	57	63	59	64
+	0.090	9.1	9.0	53	64	62	68
+	0.100	13.5	12.0	89	96	69	74
+	0.110	8.9	8.9	97	108	80	88
+	0.120	9.5	9.3	63	74	61	67
+	0.130	9.6	9.3	55	65	50	55
+	0.140	8.9	8.9	67	78	51	57
+	0.150	10.4	9.9	46	56	43	47
+	0.160	8	8.3	67	79	52	58
+	0.170	6.7	7.4	55	68	47	53
+	0.180	8.7	8.8	69	80	52	58
+	0.190	7.5	8.0	67	80	50	56

Sens	Distance	T _s	T _{MB}	D _{BB}	D _{BB 20°C}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[°C]	[1/100 mm]			
+	0.200	8.6	8.7	57	68	49	54
+	0.210	7.4	7.9	63	76	45	50
+	0.220	8	8.3	63	75	49	54
+	0.230	9.6	9.4	79	89	49	54
+	0.240	9.1	9.1	59	70	47	52
+	0.250	8.3	8.5	61	73	51	56
+	0.260	9.2	9.2	57	68	43	48
+	0.270	8.1	8.4	53	65	46	50
+	0.280	12.7	11.6	55	62	54	58
+	0.290	8.2	8.5	69	81	53	59
+	0.300	7.5	8.0	61	74	52	58
+	0.310	10.3	9.9	57	67	43	47
+	0.320	13.6	12.2	85	91	52	55
+	0.330	7.1	7.7	57	70	55	61
+	0.340	6.4	7.3	48	62	47	52
+	0.350	7.4	8.0	42	55	37	41
+	0.360	8.1	8.4	50	62	43	47
+	0.370	7.7	8.2	38	50	42	46
+	0.380	7.6	8.1	50	62	46	51
+	0.390	17	14.6	67	70	50	53
+	0.400	17.8	15.2	67	69	53	56
+	0.410	18.2	15.5	48	50	44	46
+	0.420	16.3	14.2	53	57	54	57
+	0.430	17.3	14.8	55	58	46	48
+	0.440	13.7	12.4	36	42	30	33
+	0.450	12.6	11.6	50	57	41	44
+	0.460	13.5	12.2	40	47	29	31
+	0.470	13.6	12.3	30	36	25	27
+	0.480	14.5	13.0	32	38	27	29
+	0.490	15.1	13.4	38	43	24	26
+	0.500	14.1	12.7	34	40	33	36
+	0.510	15.1	13.4	12	17	28	30
+	0.520	16.6	14.5	32	35	22	24
+	0.530	18.5	15.8	50	52	35	36

I.3 Mesures avant et après renforcement

RC151 Villars -Bozon – L'Isle, avant renforcement

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
+	14.800	16.6	19	20
+	14.820	14.5	19	20
+	14.840	14.6	17	19
+	14.860	15.7	21	23
+	14.880	14.5	21	23
+	14.900	14.7	31	34
+	14.921	14.8	25	27
+	14.940	15.1	22	24
+	14.960	14.8	22	23
+	14.980	20.5	24	24
+	15.000	18.8	43	44
+	15.021	16.5	46	49
+	15.040	20.9	35	35
+	15.060	21.3	36	36
+	15.080	18.8	33	33
+	15.100	19.0	31	32
+	15.122	20.5	36	36
+	15.141	20.9	27	27
+	15.159	21.1	27	26
+	15.180	19.0	29	29
+	15.200	18.4	16	16
+	15.222	18.8	25	26
+	15.241	14.8	25	27
+	15.262	19.7	28	28
+	15.280	21.1	26	26
+	15.300	15.2	25	27
+	15.321	20.7	22	22
+	15.340	15.8	25	27
+	15.360	15.7	20	22
+	15.380	14.7	19	20
+	15.400	14.6	18	19
+	15.420	14.8	20	22
+	15.441	14.6	19	21
+	15.462	14.6	15	16
+	15.480	21.1	19	19
+	15.551	14.2	36	39
+	15.574	13.7	45	50
+	15.600	13.7	60	66
+	15.625	13.8	59	65
+	15.650	14.0	43	47

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
+	15.674	14.0	40	44
+	15.700	14.0	64	70
+	15.726	14.1	60	65
+	15.750	14.0	43	47
+	15.775	13.9	37	41
+	15.800	14.2	60	66
+	15.826	13.9	38	42
+	15.850	14.0	48	52
+	15.876	14.0	52	57
+	15.900	14.1	35	38
-	15.900	14.2	28	30
-	15.874	14.2	30	32
-	15.849	14.2	45	49
-	15.829	14.2	22	24
-	15.810	14.4	28	31
-	15.790	14.6	44	48
-	15.770	14.5	38	42
-	15.749	14.6	61	66
-	15.729	14.6	55	60
-	15.710	14.8	49	53
-	15.690	14.8	43	46
-	15.668	14.8	25	27
-	15.649	15.0	29	32
-	15.630	14.8	32	35
-	15.610	15.0	48	52
-	15.589	15.0	53	57
-	15.571	15.1	68	73
-	15.550	15.2	38	41
-	15.470	13.9	27	30
-	15.450	13.7	24	26
-	15.430	14.1	23	25
-	15.410	14.0	29	31
-	15.390	14.1	18	20
-	15.370	13.9	18	19
-	15.350	14.0	21	23
-	15.330	14.4	31	34
-	15.310	13.9	23	25
-	15.290	14.0	23	25
-	15.270	14.0	26	28
-	15.250	14.4	27	29
-	15.230	14.4	24	26
-	15.210	14.0	21	22
-	15.190	14.5	18	20

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
-	15.170	18.7	21	22
-	15.150	19.1	36	36
-	15.130	17.7	44	45
-	15.110	17.9	38	39
-	15.090	17.7	38	39
-	15.070	18.4	29	30
-	15.050	18.7	26	27
-	15.030	19.3	28	29
-	15.009	18.6	34	35
-	14.990	19.8	41	41
-	14.970	16.1	30	32
-	14.950	15.7	26	28
-	14.930	15.4	36	38
-	14.910	14.9	33	35
-	14.890	14.8	29	31
-	14.870	16.1	20	21
-	14.850	15.1	20	22
-	14.830	15.0	16	17
-	14.810	14.6	18	20

RC151 Villars -Bozon – L'Isle, après renforcement

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
+	14.800	25.1	17	15
+	14.820	24.8	18	16
+	14.840	24.9	16	15
+	14.860	25.0	21	19
+	14.880	22.0	18	18
+	14.900	25.5	32	29
+	14.921	22.1	22	22
+	14.940	25.2	18	16
+	14.960	27.1	22	20
+	14.980	26.7	23	20
+	15.000	24.3	41	38
+	15.021	20.8	40	40
+	15.040	24.0	35	33
+	15.060	26.4	31	28
+	15.080	20.5	29	29
+	15.100	18.9	26	27
+	15.122	27.3	31	28
+	15.141	21.7	23	23

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
+	15.159	21.5	28	27
+	15.180	19.0	22	22
+	15.200	18.7	14	15
+	15.222	18.9	20	21
+	15.241	21.4	20	20
+	15.262	27.3	24	21
+	15.280	27.9	20	18
+	15.300	21.1	20	19
+	15.321	28.0	18	15
+	15.340	27.4	23	20
+	15.360	27.7	18	16
+	15.380	27.2	19	16
+	15.400	27.1	18	16
+	15.420	24.2	15	14
+	15.441	24.5	14	13
+	15.462	24.8	15	14
+	15.480	27.0	18	16
+	15.551	27.5	32	28
+	15.574	27.5	46	40
+	15.600	27.6	61	54
+	15.625	28.6	63	54
+	15.650	29.2	42	36
+	15.674	29.3	32	28
+	15.700	29.2	50	43
+	15.726	29.1	59	51
+	15.750	29.2	42	36
+	15.775	29.5	35	29
+	15.800	29.5	55	46
+	15.826	28.9	35	30
+	15.850	28.9	45	38
+	15.876	28.7	41	36
+	15.900	28.4	39	34
-	15.900	27.7	29	25
-	15.874	28.1	32	28
-	15.849	28.4	42	36
-	15.829	28.2	26	23
-	15.810	28.6	28	24
-	15.790	29.1	42	36
-	15.770	29.1	41	35
-	15.749	28.8	57	49
-	15.729	28.7	59	51
-	15.710	28.7	45	39
-	15.690	28.7	33	29

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
-	15.668	28.7	27	23
-	15.649	28.7	32	28
-	15.630	28.6	33	29
-	15.610	28.2	49	43
-	15.589	28.2	51	44
-	15.571	28.3	63	54
-	15.550	28.3	35	30
-	15.470	21.5	23	22
-	15.450	19.6	18	18
-	15.430	20.1	17	17
-	15.410	24.6	27	25
-	15.390	27.6	19	17
-	15.370	27.5	19	17
-	15.350	27.9	25	22
-	15.330	28.5	31	27
-	15.310	27.1	27	24
-	15.290	25.1	21	19
-	15.270	21.1	23	23
-	15.250	20.6	24	23
-	15.230	19.0	18	19
-	15.210	18.1	17	18
-	15.190	18.2	16	16
-	15.170	18.5	17	18
-	15.150	19.6	31	31
-	15.130	19.7	34	35
-	15.110	19.2	32	32
-	15.090	18.0	29	30
-	15.070	19.6	24	24
-	15.050	20.6	25	25
-	15.030	19.7	22	22
-	15.009	19.2	28	29
-	14.990	21.6	35	34
-	14.970	24.9	32	29
-	14.950	28.7	31	26
-	14.930	20.6	31	31
-	14.910	20.3	26	26
-	14.890	23.7	29	27
-	14.870	19.6	16	16
-	14.850	21.1	18	18
-	14.830	22.5	15	15
-	14.810	20.6	17	17

RC 610 - Granges-sous-Trey - Trey, avant renforcement

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
+	0.750	33.7	55	43
+	0.800	34.2	34	27
+	0.850	34.1	45	35
+	0.900	34.3	63	49
+	0.950	35.3	37	28
+	1.000	34.2	61	47
+	1.050	33.3	56	44
+	1.100	28.5	68	59
+	1.150	30.0	65	55
+	1.200	29.1	62	53
+	1.250	33.1	84	67
+	1.300	33.9	59	47
+	1.350	32.6	55	44
+	1.400	33.3	112	89
+	1.450	33.4	89	70
+	1.500	30.3	42	35
+	1.550	27.3	40	35
+	1.600	30.0	53	44
+	1.650	29.9	45	38
+	1.700	22.0	27	26
+	1.750	31.0	57	47
+	1.800	20.5	80	79
+	1.850	30.6	76	64
+	1.900	31.1	55	46
+	1.950	31.1	59	49
-	1.974	31.6	118	97
-	1.925	23.7	56	53
-	1.875	24.4	70	65
-	1.825	29.9	92	77
-	1.775	30.0	88	74
-	1.725	30.4	46	38
-	1.675	30.0	37	31
-	1.625	28.9	54	46
-	1.575	25.9	37	34
-	1.525	31.1	51	42
-	1.475	29.8	42	36
-	1.425	32.2	89	72
-	1.375	30.2	142	119
-	1.325	31.5	64	52
-	1.275	28.9	88	76
-	1.225	30.1	84	71

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
-	1.175	32.2	113	92
-	1.116	27.8	67	58
-	1.075	30.7	59	49
-	1.025	31.3	75	62
-	0.975	32.7	45	36
-	0.925	33.8	31	25
-	0.875	28.4	26	23
-	0.825	27.9	50	44
-	0.775	31.0	83	69
-	0.75	30.4	118	99

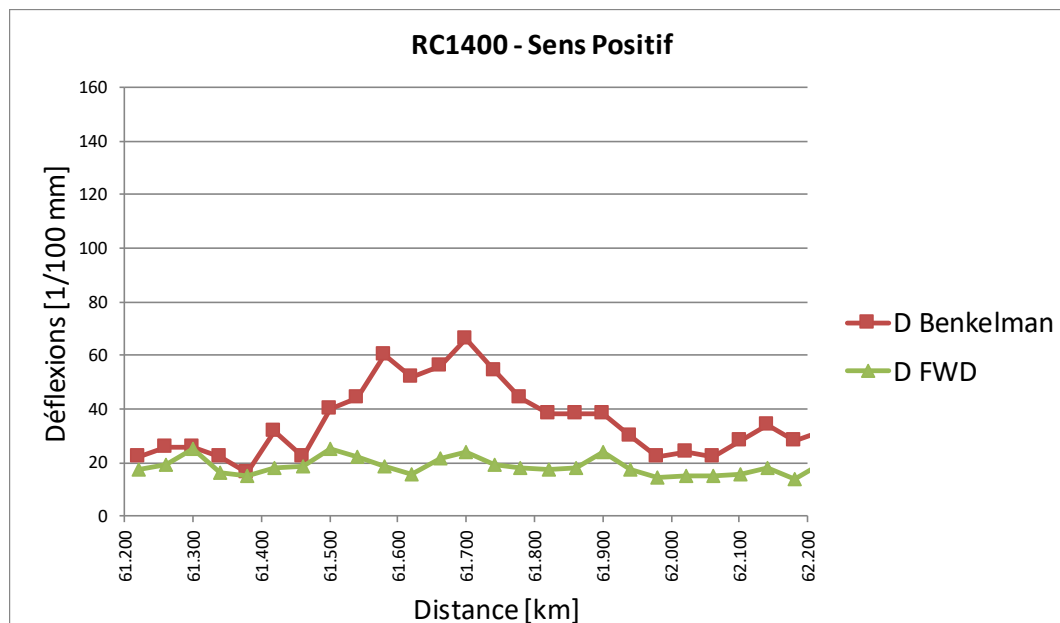
RC 610 - Granges-sous-Trey - Trey, après renforcement

Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
+	0.750	18.1	31	32
+	0.800	20.0	21	21
+	0.850	19.5	26	26
+	0.900	19.7	35	36
+	0.950	19.2	23	23
+	1.000	18.8	30	30
+	1.050	19.4	31	31
+	1.100	12.5	31	34
+	1.150	16.3	30	32
+	1.200	12.7	29	32
+	1.250	19.0	43	44
+	1.300	19.7	32	32
+	1.350	19.2	33	33
+	1.400	20.3	59	58
+	1.450	18.9	38	39
+	1.500	19.0	28	28
+	1.550	19.6	22	22
+	1.600	17.6	28	29
+	1.650	18.5	24	25
+	1.700	18.3	18	18
+	1.750	19.7	39	39
+	1.800	13.6	36	39
+	1.850	19.9	41	41
+	1.900	20.2	36	36
+	1.950	19.0	23	23
-	1.974	21.0	62	61
-	1.925	20.6	34	34

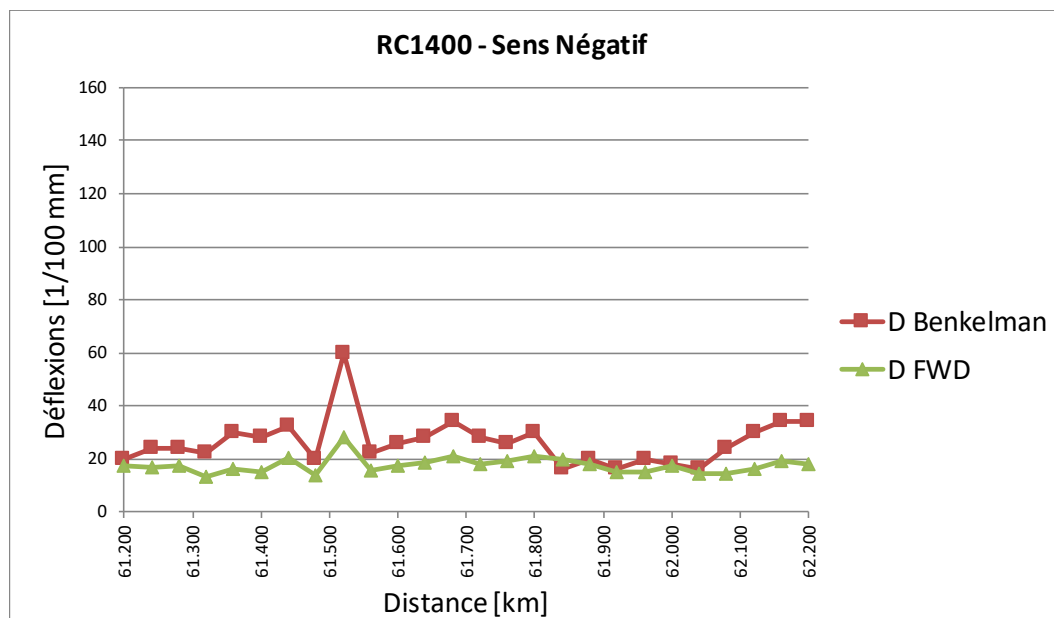
Sens	Distance	T _{MB}	D _{FWD}	D _{FWD 20°C}
[-]	[km]	[°C]	[1/100 mm]	[1/100 mm]
-	1.875	20.5	50	49
-	1.825	20.5	47	46
-	1.775	21.1	45	44
-	1.725	20.6	42	42
-	1.675	20.0	33	33
-	1.625	16.5	35	36
-	1.575	13.7	28	31
-	1.525	20.1	32	32
-	1.475	13.8	25	28
-	1.425	20.1	35	34
-	1.375	18.4	57	59
-	1.325	19.0	38	39
-	1.275	15.6	39	42
-	1.225	18.4	53	54
-	1.175	16.4	43	46
-	1.116	12.4	34	38
-	1.075	19.3	36	36
-	1.025	19.7	45	45
-	0.975	20.0	32	32
-	0.925	20.7	23	23
-	0.875	19.4	22	22
-	0.825	19.8	30	30
-	0.775	19.2	32	33
-	0.750	19.3	54	54

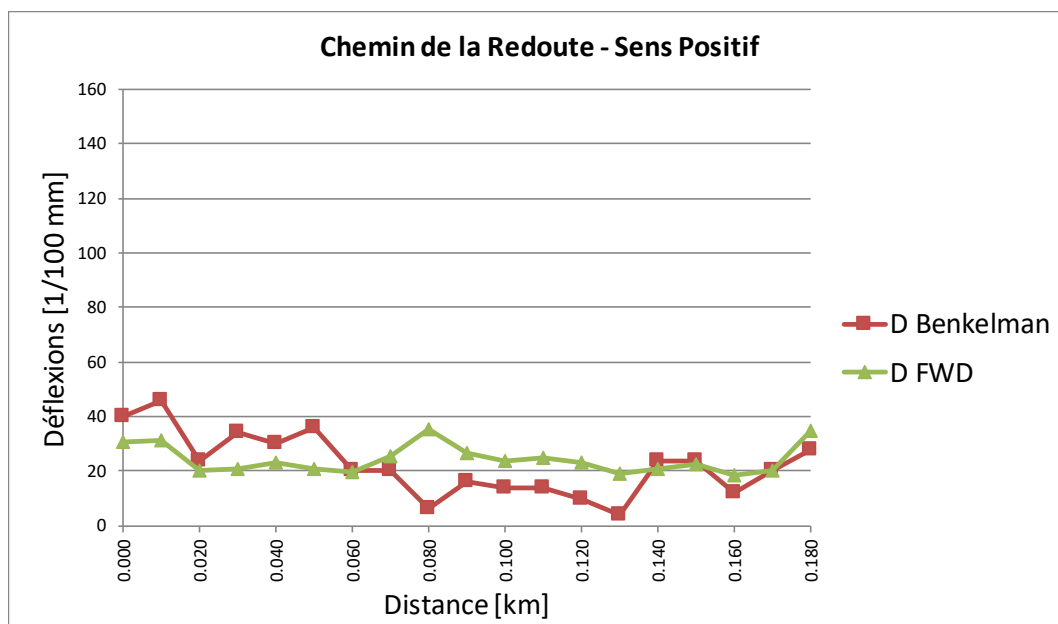
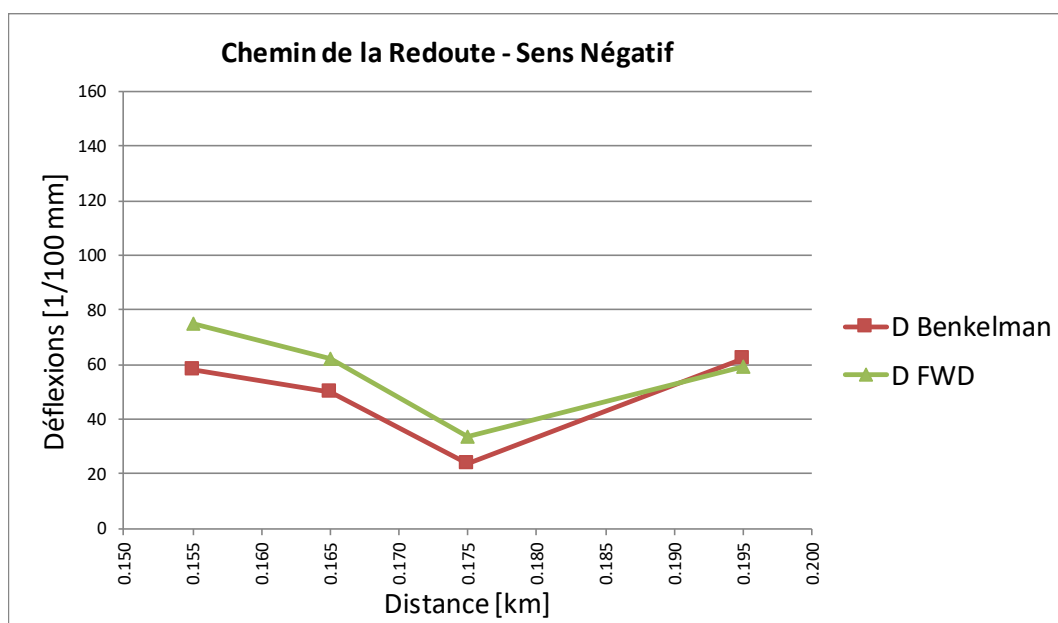
II Graphiques itinéraires des mesures comparatives

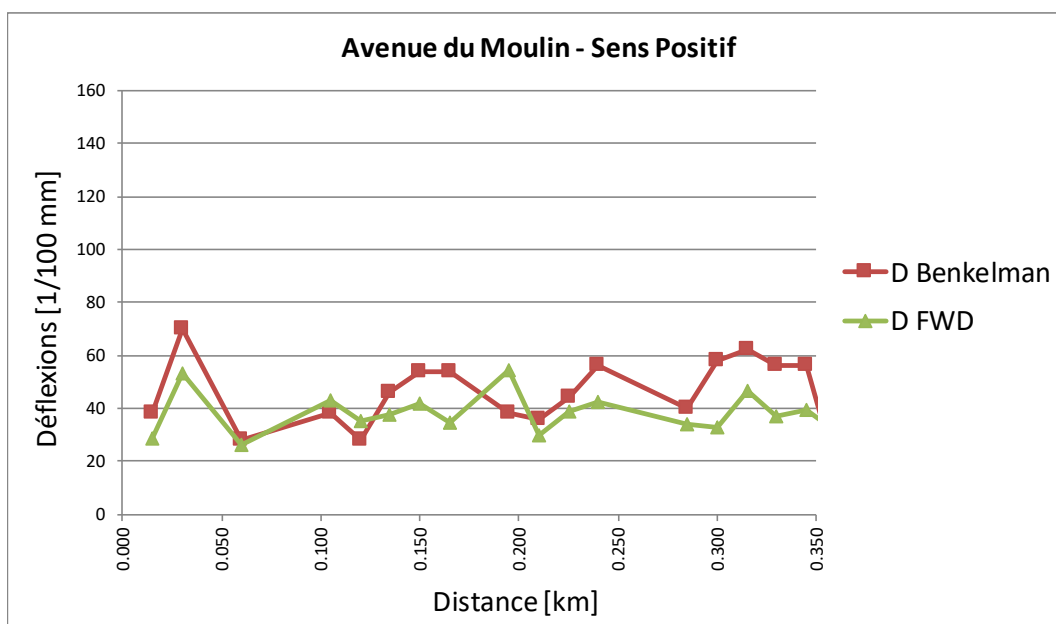
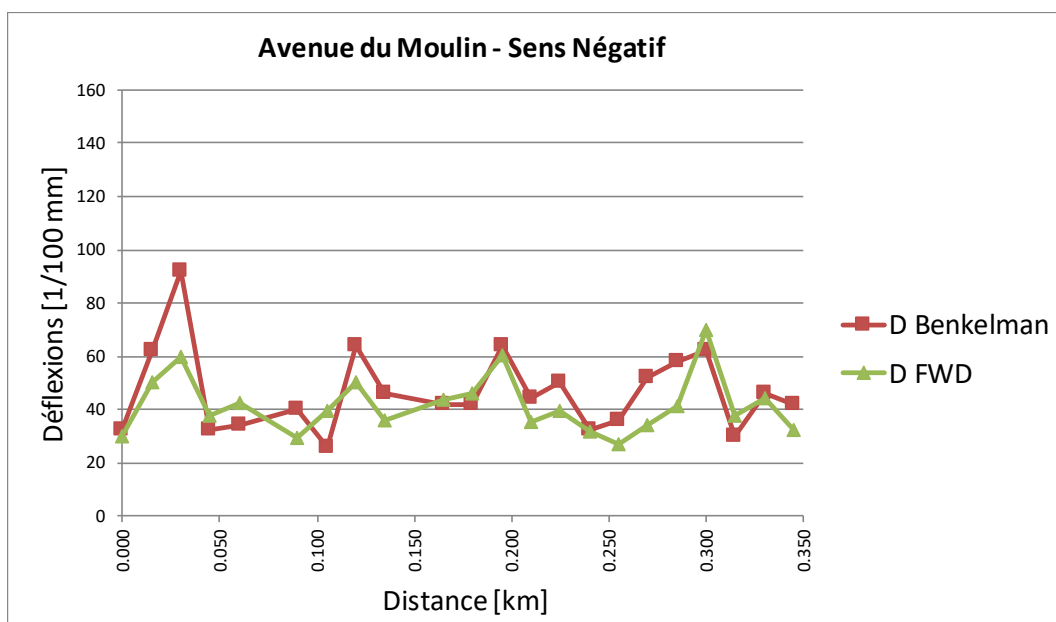
RC1400 Romont –Vaulruz – Sens Positif

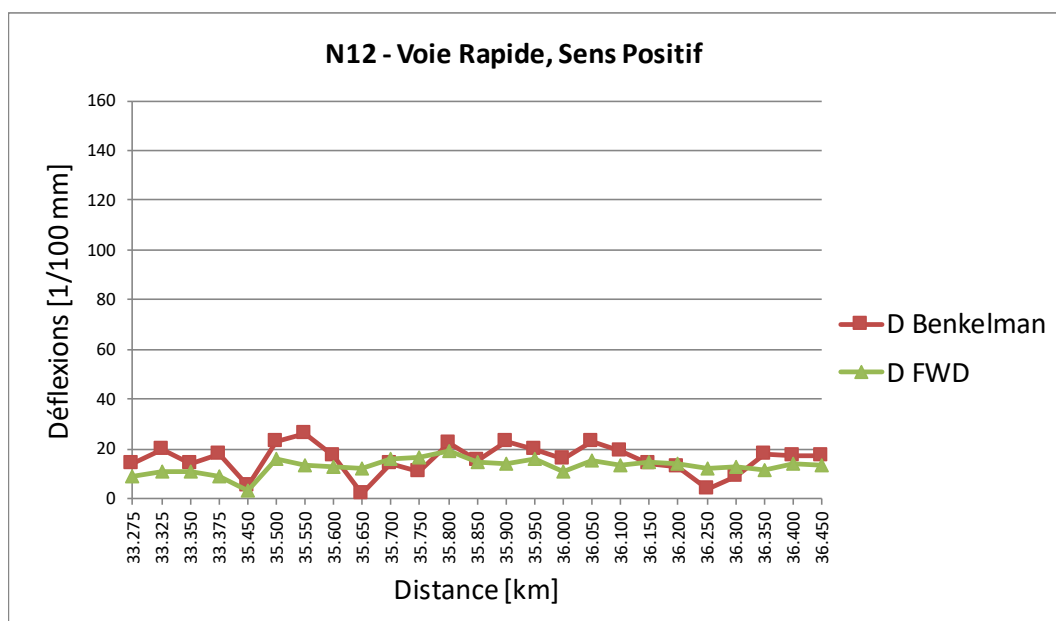
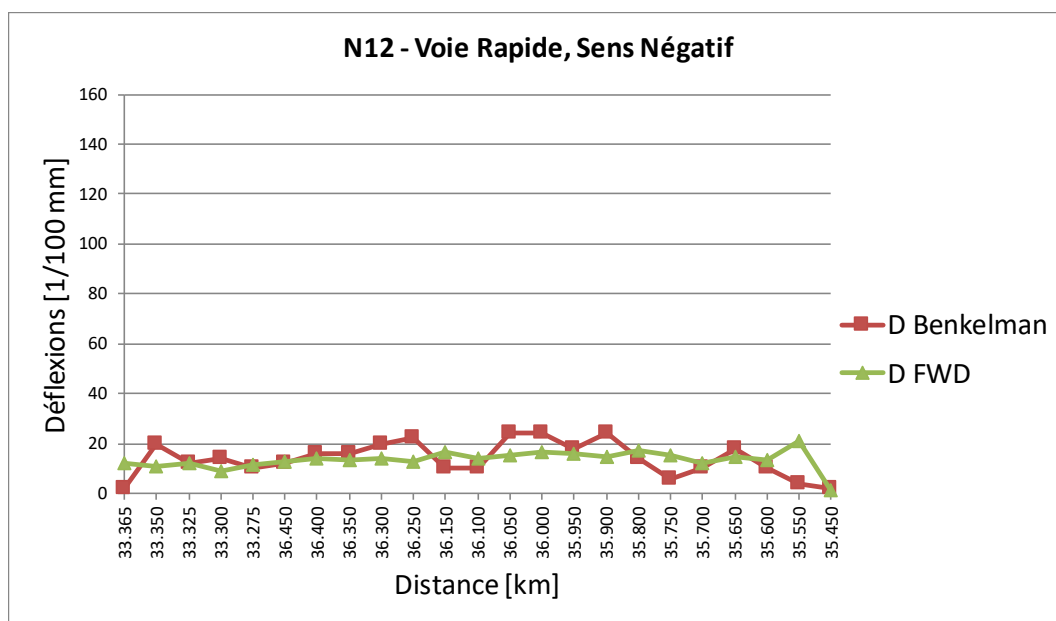


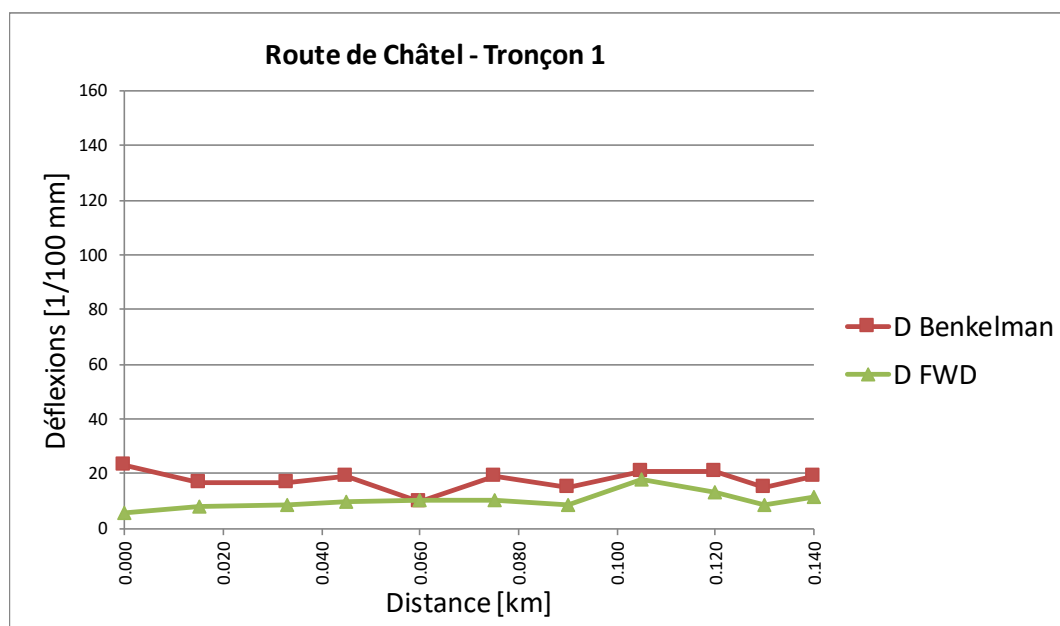
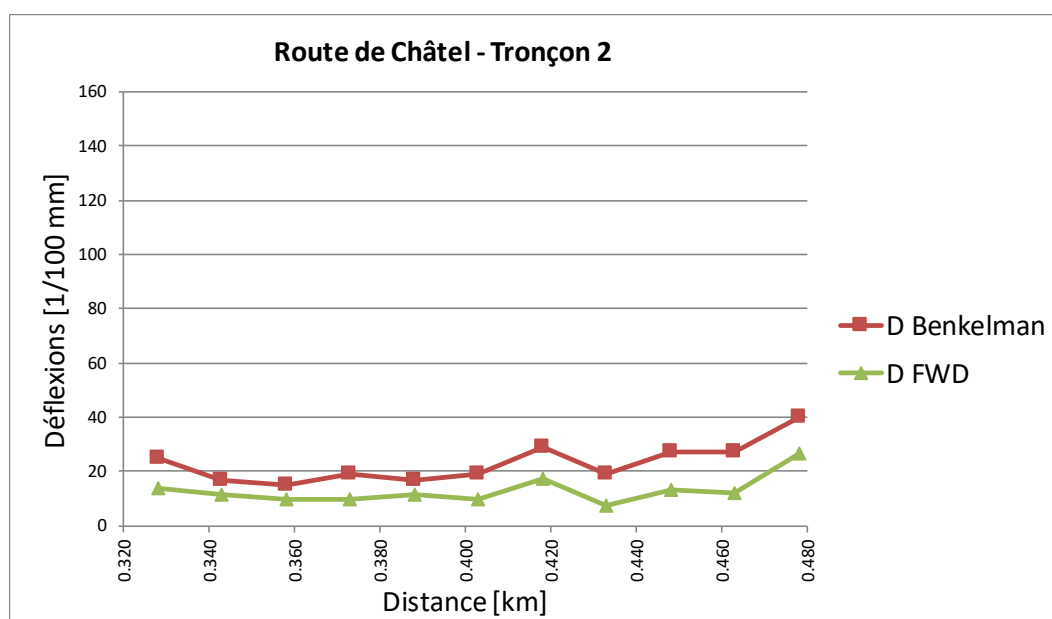
RC1400 Romont –Vaulruz – Sens Négatif

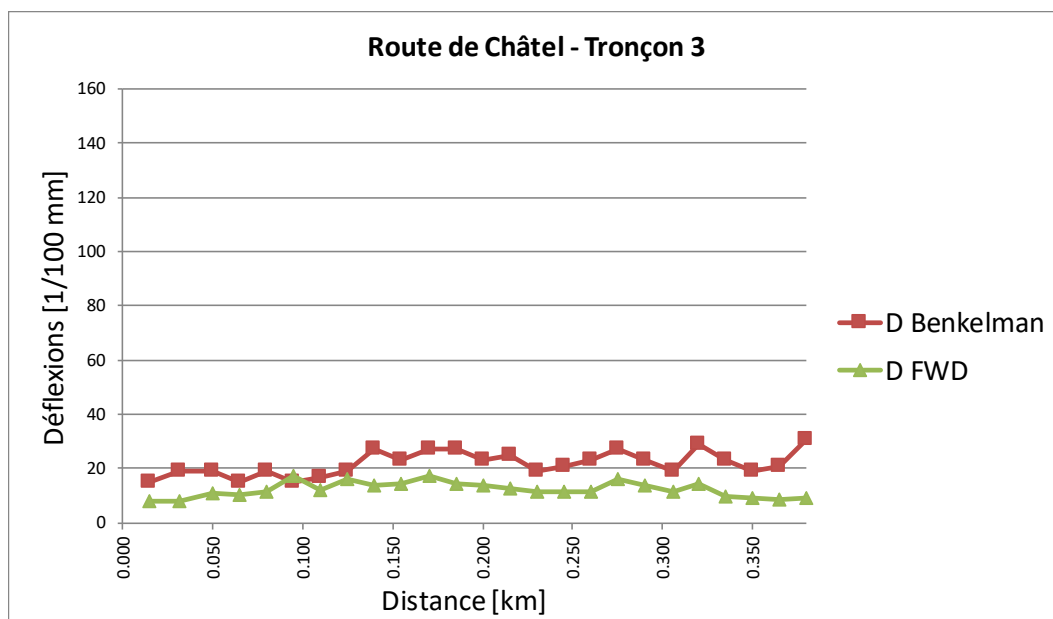
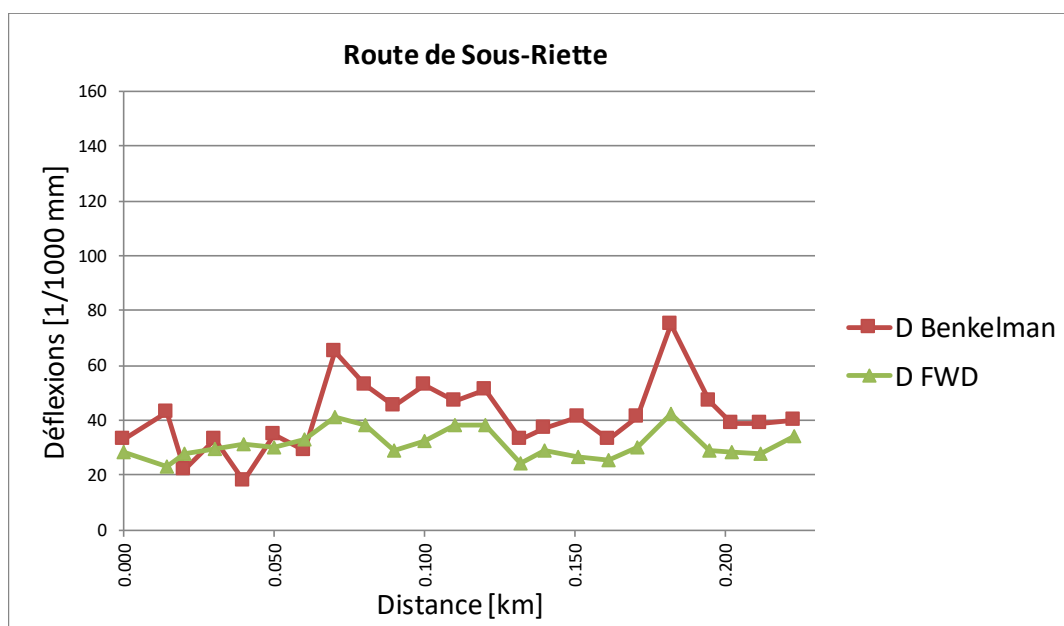


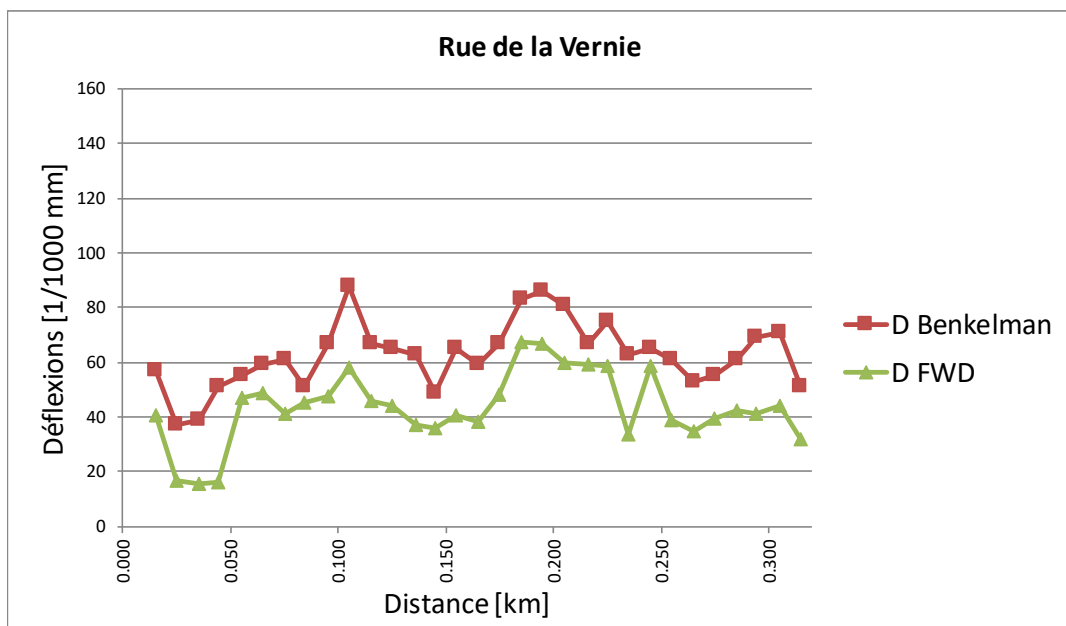
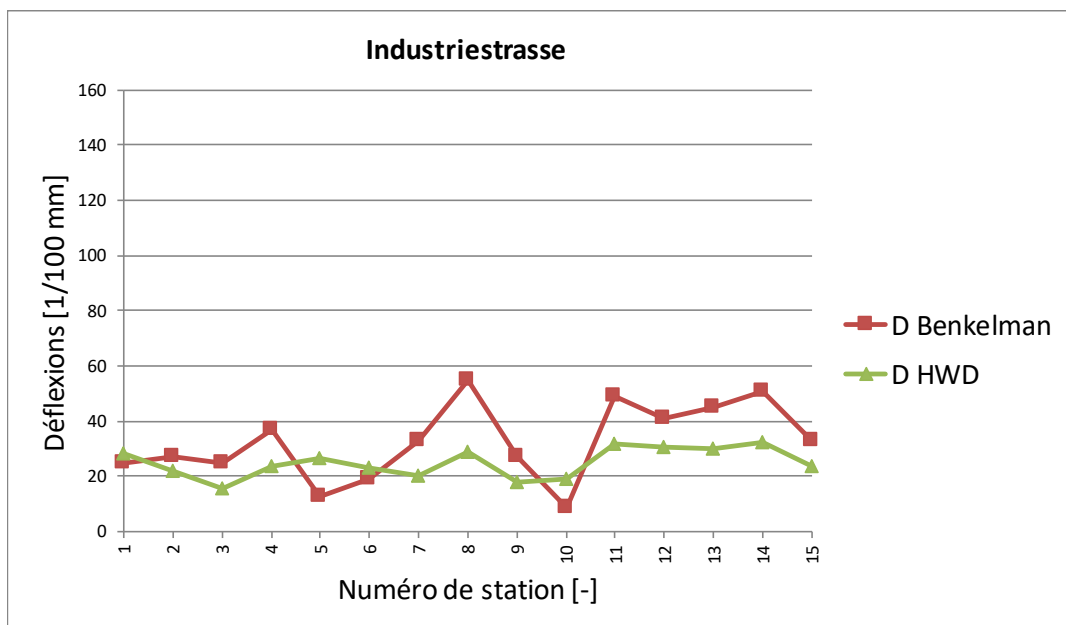
Chemin de la Redoute – Nyon – Sens PositifChemin de la Redoute – Nyon – Sens Négatif

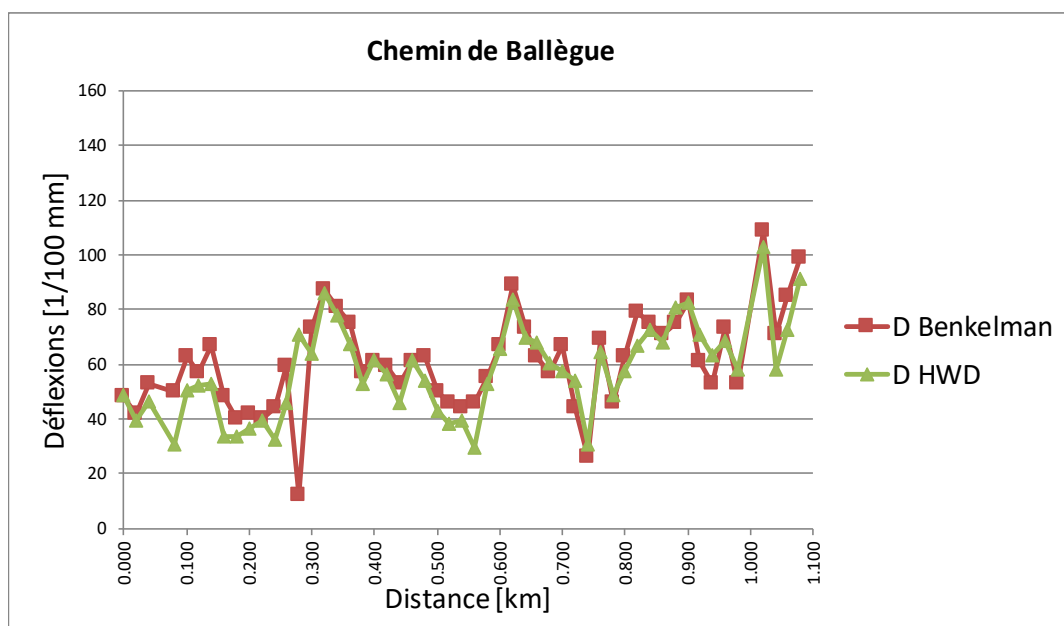
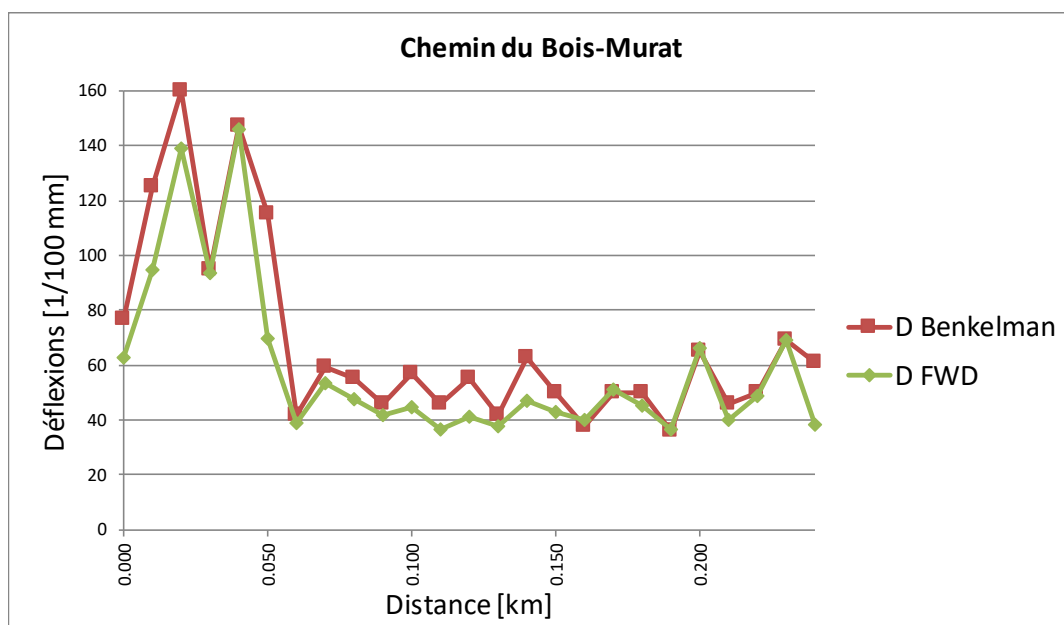
Avenue du Moulin – Morges – Sens PositifAvenue du Moulin – Morges – Sens Négatif

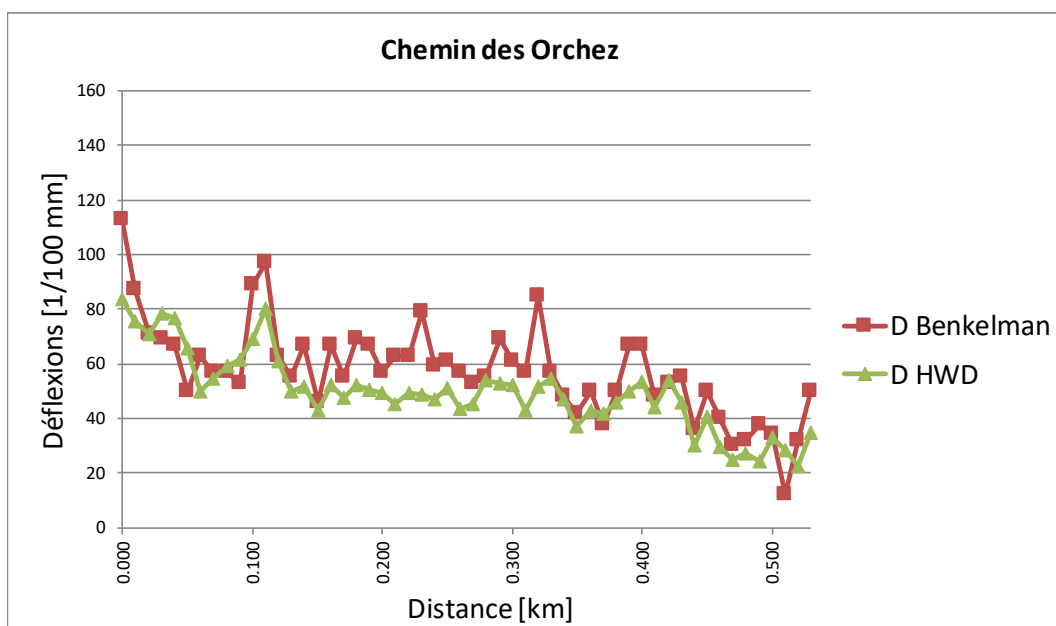
N12 Riaz – Ecuwillens – Voie rapide – Sens PositifN12 Riaz – Ecuwillens – Voie rapide – Sens Négatif

Route de Châtel - Corsier-sur-Vevey – Tronçon 1Route de Châtel - Corsier-sur-Vevey – Tronçon 2

Route de Châtel - Corsier-sur-Vevey – Tronçon 3Route de Sous-Riette - Crissier

Rue de la Vernie - CrissierIndustriestrasse, Oberbuchsitzen (Ringversuch)

Chemin de Ballègue, EpalingesChemin du Bois-Murat, Epalinges

Chemin des Orchez, Epalinges

III Certificat CROW



praktische kennis **direct toepasbaar**

kennisplatform
CROW

Glossaire

Terme	Signification
FWD	Falling Weight Deflecometer
HWD	Heavy Weight Deflectometer
SN	Norme Suisse
BELLS	<u>B</u> altzer, <u>E</u> rtman- <u>L</u> arsen, <u>L</u> ukanen et <u>S</u> tubstad
SCF	Seasonal Correlation Factor, Facteur de correction saisonnier
STAC	Service Technique de l'Aviation Civile
VAB/ALA	Vereinigung Akkreditierter Baustoffprüflabors – Association des laboratoires accrédités

Bibliographie

Normes

- [1] Norme Suisse SN 640 733b – Renforcement de superstructures de chaussées avec revêtements bitumineux à l'aide de mesures de déflexion – 1993.
- [2] Norme Suisse SN 670 362a – Poutre de Benkelman – Appareil, mode opératoire et exploitation des résultats – 1991.
- [3] Norme Suisse SN 640 320 – Dimensionnement de la structure de Chaussée – Trafic pondéral équivalent – 2011
- [4] Norme Suisse SN 640 925b – Gestion de l'entretien des chaussées – Relevé d'état et appréciation en valeur d'indice – 2003
- [5] Norme Suisse SN 640 926 – Gestion de l'entretien des chaussées – Relevé d'état visuel : indices individuels – 2005

Documentation

- [6] Jacot, Contausset, Blumer - Rapport de recherche n°155 – Oberbauverstärkung von flexiblen Strassen» - 1988.
- [7] COST 324 – Long Term Performance of Road Pavements - 1997
- [8] Contausset, Jacot – Rapport de recherche 24/88 – Variations saisonnières de la déflexion sur les chaussées souples - 1992
- [9] Ould Hénia, Braber - Falling Weight Deflectometer et deflectographe Lacroix : Comparaison, domaine d'application et perspective – Route & Trafic 2008
- [10] Perret, Dumont – Modélisation des charges d'essieu – EPFL/LAVOC - 2000
- [11] Federal Highway Administration - Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement - 2000
- [12] Christ Van Gorp - Characterization of Seasonal Influences on Asphalt Pavements with the use of Falling Weight Deflectometers - 1995
- [13] Zaghoul, Gucunski, Jackson, Hadidi - Federal Highway Administration – New Jersey, Department of Transportation - Material Characterization and Seasonal Variation in Material Properties - 2006
- [14] CROW – Report D11-07 – Falling Weight Deflectometer calibration guide - 2011
- [15] COST 336 – Falling Weight Deflectometer – Information gathering report - 1998
- [16] CROW – Falling Weight Deflectometer Correlation Trial 2015 - 2015
- [17] Broutin, Felon – STAC - Campagne internationale d'Essais Croisés au HWD - 2015
- [18] VAB/ALA – Ringversuch 2015 – Deflexion Benkelman – Deflektionsmessungen (Rapport en cours de publication)
- [19] Murillo, Bejarano – Universidad de Colombia – Colombia - Correlation between deflections measurements on flexible pavements obtained under static and dynamic load techniques - 2013
- [20] Ferguson – Austroads – Australie - Guidelines for road network condition monitoring – 2005
- [21] Jansen, Kunz – Bast – Allemagne – Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen – 2011
- [22] Mabood – University of Waterloo, Canada – Evaluating tire pressure control system to improve productivity and mitigate pavement damage – 2008
- [23] Braber, Gautier – Article Route et Trafic n°11 – Approche pratique de la méthode ACN/PCN, Moyens d'évaluation pour déterminer la portance des chaussées aéroporueuses – 2012
- [24] Ole Fog - User Mailing List 1112 – Correlation FWD to BB - 2005
- [25] R. Palm - Détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée selon la norme ISO 5725-2.
- [26] STAC – Auscultation des chaussées souples aéronautiques au HWD – Février 2014

Clôture du projet

Formulaire n°3 ARAMIS RPT



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 24.08.2017

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2011/503

Projekttitel: Corrélation entre déflexions FWD et Benkelman

Enddatum:

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Les différences de méthodologie entre les mesures de déflexions avec la poutre Benkelman et avec le matériel FWD ont été exposées.

Les déflexions obtenues au moyen de ces deux systèmes ont été comparées pour 11 tronçons routiers présentant des caractéristiques diverses en matière de trafic reçu, d'état de dégradations et d'épaisseur de couche bitumineuse.

Des corrélations ont été établies en fonction des déflexions brutes d'une part et en fonction des déflexions déterminantes d'autre part.

Cette étape a été rendue difficile car des doutes sont émis sur la reproductibilité des mesures Benkelman en général et sur la fiabilité des résultats obtenus par la poutre Benkelman utilisée dans le cadre de ce projet.

Toutefois, la corrélation entre les déflexions déterminantes FWD et Benkelman, meilleures que celle entre les déflexions brutes, a été utilisée pour établir un diagramme de renforcement pour le FWD.

Ce diagramme a été testé :

- en comparant les résultats d'épaisseur de renforcement à ceux calculés sur les mêmes tronçons avec la poutre Benkelman. Les différences d'épaisseur de renforcement préconisées par le Benkelman et le FWD sont comprises entre 0 et 4 cm.
- en comparant les déflexions FWD avant et après renforcement sur 3 tronçons. Les résultats sont prometteurs malgré les différences observées entre les déflexions déterminantes réelles et théoriques après renforcement.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Le mandat de recherche a permis de remplir les objectifs fixés pour ce mandat de recherche, à savoir établir une corrélation entre les déflexions FWD et Benkelman et établir un diagramme de renforcement pour le FWD.

Toutefois et compte tenu des incertitudes liées à la corrélation entre les déflexions brutes Benkelman et FWD, un doute existe sur la robustesse du diagramme de renforcement établi en fonction de cette corrélation.

Avec l'expérience des investigations réalisées dans le cadre de ce mandat, la validation du diagramme de renforcement FWD au moyen de 3 tronçons seulement (soit environ 150 points de mesure) avant et après renforcement apparaît alors présomptueuse.

Folgerungen und Empfehlungen:

Des campagnes de mesures complémentaires avant et après renforcement au FWD devraient être effectuées dans le cadre d'un nouveau mandat de recherche pour :

- soit tester et valider le diagramme de renforcement établi dans ce rapport,
- soit établir un nouveau diagramme de renforcement FWD sans passer par une corrélation Benkelman – FWD.

Publikationen:

Aucune publication n'a été faite à ce jour

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Braber

Vorname: Robert

Amt, Firma, Institut: Infralab SA

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Ziele des Forschungsvorhabens konnten mehrheitlich erreicht werden. Nicht ganz unerwartet verdeutlichten sich die Unterschiede in der Methodik, mit der beim FWD und beim Benkelman-Balken Deflektionen erfasst werden. Es zeigte sich im weiteren eine gewisse Problematik bei der Aussagekraft der Messungen der verwendeten Gerätschaften, in erster Linie beim verwendeten Benkelman-Balken. Für Diskussionen sorgten unter anderem auch die Transformationen der Rohdaten in die effektiv zu benutzenden Vergleichswerte. Nicht zuletzt dadurch kam es zu gewissen Verzögerungen im Forschungsablauf. Im Endeffekt konnten akzeptable Korrelationen zwischen den beiden Messmethoden gefunden werden und im Forschungsbericht findet sich, wie angestrebt, ein getesteter Vorschlag für ein Verstärkungsdiagramm für Messungen mit dem FWD, so wie es für den Benkelmanbalken in der VSS SN 640 733b "Oberbauverstärkung von Fahrbahnen in bituminöser Bauweise aufgrund von Deflektionsmessungen" bereits existiert.

Umsetzung:

Im Hinblick auf die geplante Revision VSS SN 640 733b "Oberbauverstärkung von Fahrbahnen in bituminöser Bauweise aufgrund von Deflektionsmessungen" bietet die Forschungsarbeit wertvolle Inputs.

Die in der Forschungsarbeit angelegte Datenbank kann auch für weitere Analysen genutzt werden. Zudem ist die Datenbank eine aktuelle Grundlage, die ausbaubar ist und sich so etwa zur Verifizierung und Validierung der gefundenen Resultate anbietet.

weitergehender Forschungsbedarf:

Wie oben erwähnt, ist eine weitergehende Verifizierung und Validierung der gefundenen Resultate anzustreben. Im Management der Strassenerhaltung ist es von zunehmender Wichtigkeit, die Tragfähigkeit und den allfälligen Verstärkungsbedarf bestehender Verkehrsflächen zu ermitteln. Deflektionsmessungen bieten dazu ein bekanntes Hilfsmittel. Die Forschungsarbeit hat gezeigt, dass bei den in der Schweiz verwendeten Verfahren noch Verbesserungspotential bzgl. Auswertung und Interpretation steckt.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Forschungsarbeit bildet eine Grundlage im Hinblick auf die Revision der VSS SN 640 733b "Oberbauverstärkung von Fahrbahnen in bituminöser Bauweise aufgrund von Deflektionsmessungen".

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Horat

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut:

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Horat Martin

Digital unterschrieben von Horat Martin
DN: cn=Horat Martin, email=Martin.Horat@ast.bund.ch
Datum: 2017.07.18 06:58:02 +02'00'

Index des rapports de recherche en matière de route

L'index actuel des rapports publiés dernièrement peut être téléchargé sur notre site www.astra.admin.ch (Recherche en matière de routes --> Downloads --> Formulaires).