

Falling Weight Deflectometer et déflectographe Lacroix: Comparaison, domaine d'application et perspectives

La portance d'une chaussée est mesurée en Suisse avec la poutre Benkelman, le Déflectographe Lacroix ou le Falling Weight Deflectometer (FWD). Les deux derniers appareils permettent un meilleur rendement et fournissent une information plus complète sur l'état structurel avec une exploitation des résultats plus poussée. Il existe de nombreuses différences entre les deux appareils, certaines méconnues, d'autres nécessitant plus d'explications. Cet article a pour objectif de donner une première base de comparaison entre les deux appareils permettant aux lecteurs, selon le but à atteindre, de choisir l'appareil la plus approprié.

Par Mehdi Ould Henia et Robert Braber *

La méthode de dimensionnement en vigueur en Suisse est inspirée de l'essai AASHTO (Etats-Unis, 1958) et est décrite dans les normes VSS SN 640 324 et 640 317. La tendance en Europe est à la transition vers les méthodes analytico-empiriques suite, entre autre, à l'apparition de matériaux non-normalisés plus performants et de charges de trafic plus importantes. La commission d'experts VSS EK 5.03, dont les deux auteurs sont membres, discute actuellement de l'opportunité de lancer une recherche sur l'introduction de méthodes analytico-empiriques, et qui nécessiterait une évaluation des deux appareils de mesure (Lacroix et FWD).

Description des appareils et principe de mesure

Déflectographe Lacroix

En 1956, M. J. Lacroix, Ingénieur des Ponts et Chaussées au Service des Ponts et Chaussées de la Dordogne

en France, met au point un déflectographe en intégrant la poutre Benkelman à un camion pour mesurer la déflexion sous essieux lourds des chaussées. Le but de cette innovation était de mesurer la déflexion plus rapidement et avec plus de points qu'avec la poutre Benkelman.

La direction des Ponts et Chaussées perçoit rapidement l'intérêt du déflectographe Lacroix pour les mesures de déflexions de la chaussée à grande échelle et à grand rendement, et collabore à la construction d'un second appareil prototype en 1961.

Le déflectographe Lacroix subit dans les 30 années suivantes plusieurs modifications plus ou moins importantes dont les deux dernières sont:

- en 1984 avec l'allongement et la modification de la géométrie de la poutre: modèle Lacroix 04, dont un exemplaire est en service en Suisse
- en 1997 avec une ré-conception d'ensemble de la poutre de mesure: modèle Flash, ce qui portait la vitesse de mesure à 8 km/h

Pour réaliser les mesures, le cadre sur lequel sont fixés les deux bras palpeurs est positionné entre les traces de roulement dans l'espace situé entre les essieux du véhi-



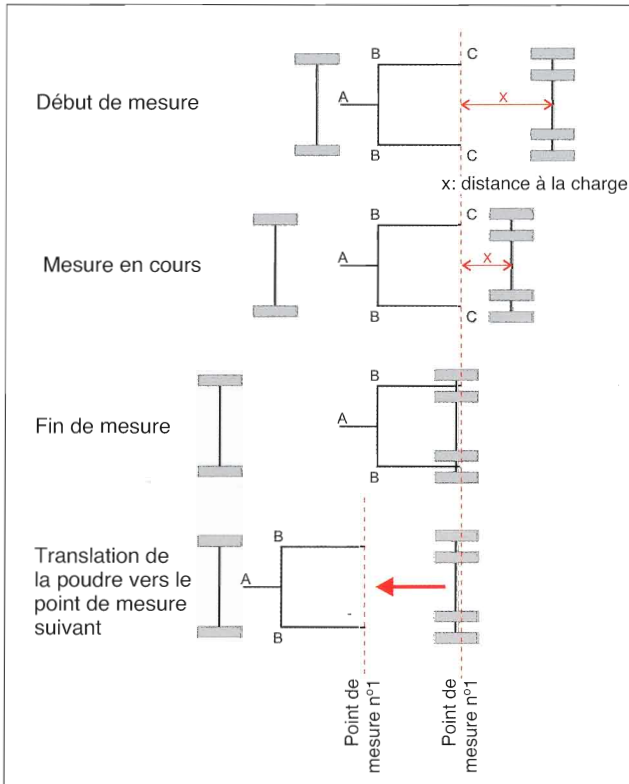
* Mehdi Ould Henia,
dr. ès science EPF, nibuXs
Sàrl, Ecublens VD.



* Robert Braber,
ing. dipl. HTS, Infralab SA,
Le Mont-sur-Lausanne.

Falling Weight Deflectometer und Deflektograph Lacroix: Vergleich, Anwendungsbereich und Ausblick

In der Schweiz wird die Tragfähigkeit einer Fahrbahn mit dem Benkelmanbalken, dem Deflektograph Lacroix oder dem Falling Weight Deflectometer (FWD) gemessen. Die beiden letztgenannten Geräte gewähren eine bessere Leistung sowie ausführlichere Auskünfte über den Strukturzustand zusammen mit einer feineren Auswertung der Ergebnisse. Zwischen den beiden Geräten bestehen zahlreiche Unterschiede, manche schlecht bekannt und andere, die weitere Erklärungen erfordern. Dieser Artikel soll eine erste Vergleichsgrundlage zwischen den Geräten vermitteln, um das je nach Ziel geeignetere zu wählen.

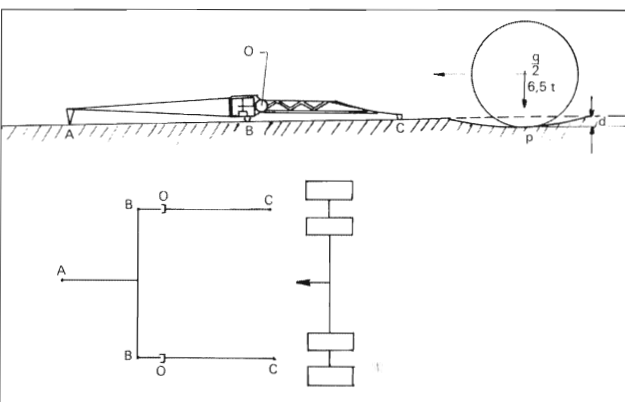


1: Principe du Défectographe Lacroix (reproduit de [5]).

1: Grundprinzip des Deflektographen Lacroix (angebildet nach [5]).

cule d'auscultation. Le camion roule à une vitesse constante (environ 3 à 8 km/h). Le cadre reste fixe sur la chaussée jusqu'à ce que l'essieu arrière dépasse de 10 cm le point de mesure des bras. Ainsi le Lacroix enregistre un bassin de déflexion de 65 points de mesure dans chaque trace de roue. Le système passe au prochain point de mesure (4 à 6 m plus loin) en tirant le bâti de mesure avec un treuil (Lacroix classique à 3 km/h) ou en soulevant le bâti (Lacroix Flash à 8 km/h) sans arrêt du véhicule. Le principe de mesure est présenté dans les figures 2 à 4.

Les structures routières récentes, de par leur rigidité plus élevée, présentent des valeurs de déflexion mesurées plus faibles et ont pour résultat une ligne d'influence de la charge qui englobe les points de référence supposés «fixes» de la poutre de mesure. Le déflectographe La-



2: Schéma et positionnement du bâti de mesure du Défectographe Lacroix (source [5]).

2: Schema und Positionierung des Messgerätes vom Deflektographen Lacroix (nach [5]).



3: Vue du bâti de mesure du déflectographe Lacroix (source SACR SA).

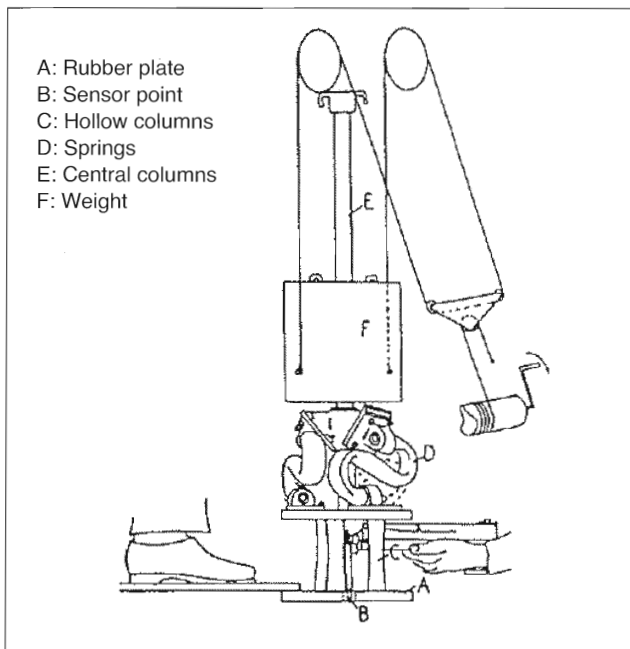
3: Ansicht des Messgerütes vom Deflektographen Lacroix (nach SACR SA).

croix 04 tient compte de ce phénomène inévitable en proposant une géométrie de cadre qui compense le mouvement des points de références au voisinage de la valeur de déflexion maximale.

La géométrie choisie constitue un compromis qui minimise l'effet de la ligne d'influence de la charge pour l'ensemble des rigidités des structures auscultées. Pour une structure semi-rigide, la compensation, optimale au voisinage de la charge, s'écarte de plus en plus de la déflexion réelle au fur et à mesure que l'on s'éloigne du chargement. La déflexion maximale est donc correcte, mais dans le cadre d'une détermination du module des couches, la valeur du module des couches d'assise devra être corrigée à la baisse.

Falling Weight Deflectometer (FWD)

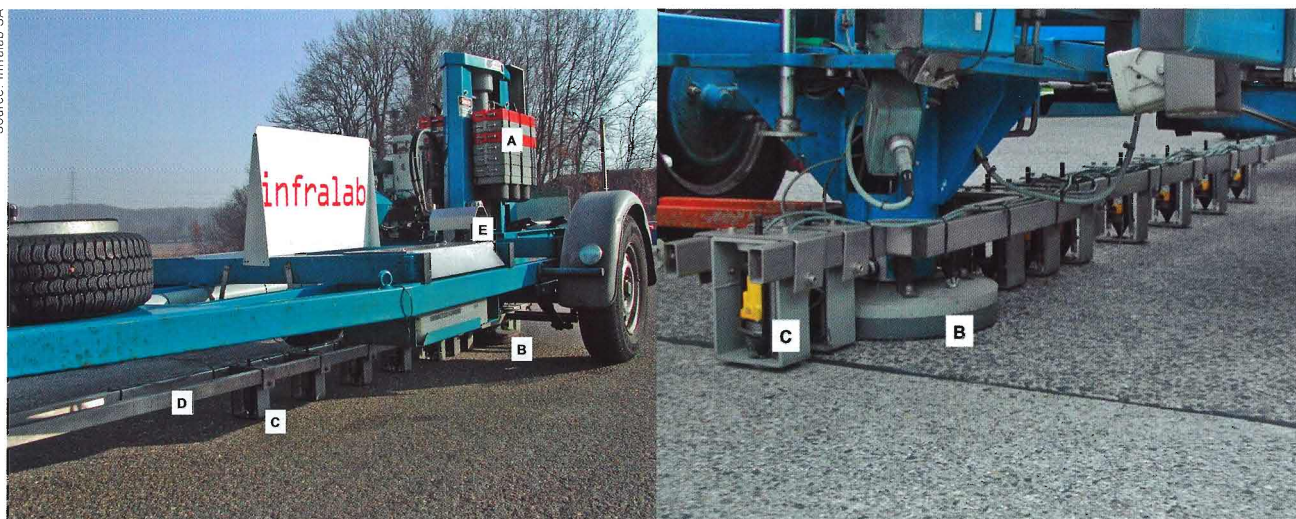
En 1965, M. Bretonniere publie dans le Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers un article intitulé «Etude



4: Le premier FWD danois (source [9]).

4: Der erste dänische FWD (nach [9]).

Source: Infralab SA



5: Vue d'ensemble de la remorque FWD et 6: Détail de la poutre de mesure

- a. Masse de 50 à 300 kg
- b. Plaque de diamètre de 30 cm sur laquelle est appliquée la charge de 7 à 120 kN.
- c. Géophone
- d. Poutre sur laquelle sont fixés les 9 géophones enregistrant la déformée longitudinale sur 1,8 mètres environ depuis le point d'application
- e. Un capteur infrarouge permettant le relevé en permanence des températures de la couche bitumineuse.

5: Gesamtansicht des Anhängers und 6: Nahansicht des Messbalkens.

- a. Gewicht von 50 bis 300 kg
- b. Scheibe (Durchmesser 30 cm), die mit einem Stoss von 7 bis 120 kN belastet wird
- c. Abhörgerät
- d. Balken mit den 9 Abhörgeräten, die die Längsverformung auf ca. 1,8 m ab dem Druckpunkt aufnehmen
- e. Infrarotsensor zur Dauerablesung der Temperaturen in der Asphalt-schicht.

d'un déflectomètre à boulet» qui décrit pour la première fois le principe de mesure d'un déflectomètre à masse tombante (Falling Weight Deflectometer). Cet appareil est ensuite repris et optimisé à l'Université Technique de Danemark.

En France, le développement du FWD a été arrêté au profit du Défectographe Lacroix.

Les premiers appareils étaient produits à la fin des années 60. Aujourd'hui ils sont équipés de 9 à 15 géophones mesurant le bassin de déflexions, un capteur de force relevant la charge sous la plaque et des poids qui permettent, en changeant la hauteur de chute, d'atteindre une charge variant de 7 à 120 kN (FWD) ou de 30 à 240 kN (Heavy Weight Deflectometer). Aujourd'hui plus de 500 déflectomètres FWD/HWD sont en service dont un en Suisse.

Le déflectomètre à masse tombante ou FWD est conçu pour mesurer le bassin des déflexions provoqué par une masse tombante appliquée sur une plaque (de diamètre 30 cm).

Il se compose:

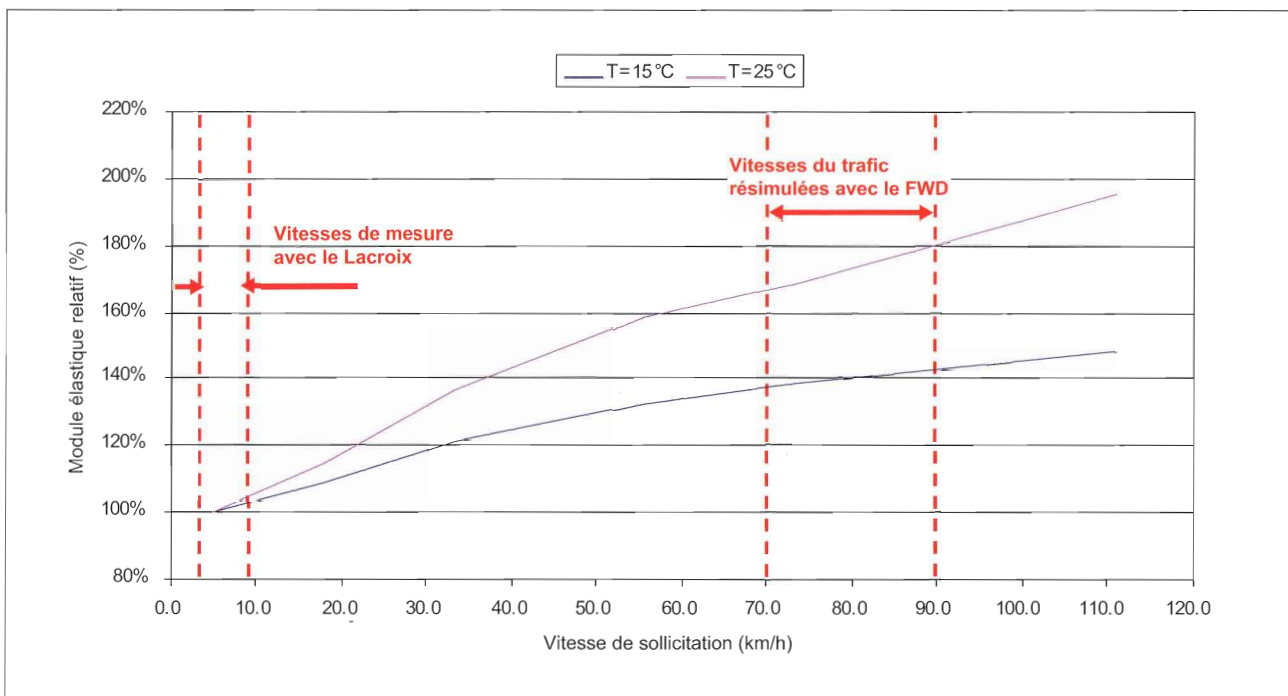
- d'une remorque tractée de 850 kg environ transportant les éléments de mise en charge et les neuf géophones,
- d'un système de pilotage automatique, d'acquisition et de traitement de l'information, embarqué dans le véhicule tracteur.

Après la mise en station de la remorque au droit du point de mesure, la masse est libérée d'une hauteur pouvant varier de 2 à 40 cm provoquant une force variable de 7 à 120 kN. La hauteur de chute et la force appliquée sont fixées en fonction de la nature de la structure testée. La

Caractéristique	Déflectographe Lacroix	FWD
Mode d'application de la charge	Charge roulante	Impulsion verticale
Vitesse d'application de la charge	10 km/h (5Hz)	70 km/h (34 Hz)
Rendement (mesures de routine)	2 à 3 km/h (Lacroix classique) 6 à 8 km/h (Lacroix Flash)	0,5 à 3 km/h
Pas de mesure	4 à 6 m (Lacroix classique) 10 à 20 m (Lacroix Flash)	Variable
Résolution du capteur de mesure	1/100 mm	1/1000 mm
Emplacement des mesures	Trace de roue gauche et droite	Trace de roue gauche ou droite
Mesure du bassin de déflexion	Bassin réel pour les chaussées souples/ 65 points	Bassin réel / 9 points
Niveau de chargement appliqué pour une mesure	Unique (50 kN ou 65 kN – essieu 10 t ou 13 t)	Réglable et mesuré (7 à 120 kN – essieu 1,4 à 24 t)
Type de superstructures auscultées	Chaussées souples et semi-rigides (fondation stabilisée)	Chaussées souples, semi-rigides et rigides (béton)

Tab. 1: Comparatif des caractéristiques du déflectographe Lacroix et du FWD.

Tab. 1: Vergleichstafel der technischen Kenndaten des Deflektographen Lacroix und des FWDs.



7: Module élastique relatif d'un enrobé bitumineux en fonction de la vitesse de sollicitation à différentes températures (source: nibuXs).

7: Elastizitätsmodul eines Asphaltbelages im Verhältnis zur Beanspruchungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Temperaturen (Quelle: nibuXs).

transmission de la charge se fait par un ressort dont la constante de raideur permet de définir la durée du chargement. Les 9 à 15 capteurs (dont un est au centre de la plaque) enregistrent la déformée longitudinale sur 2 mètres environ du point d'application de la charge.

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.

L'exploitation des résultats est facilitée par l'enregistrement de la pression de contact sous la plaque, la durée d'application de la charge et les déflexions mesurées par les capteurs. Le FWD est utilisable sur les chaussées souples, Semi-rigides ou rigides. Dans ce dernier cas, les caractéristiques «de référence» de chaque dalle sont mesurées au centre, au bord et sur le coin. 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 joint.

Comparaison Lacroix – FWD et domaine d'application

Le choix de l'appareil d'auscultation de la déflexion adéquat dépend, comme l'on pourrait s'y attendre, des besoins du gestionnaire routier et des questions auxquelles il veut répondre.

Pour clarifier ce point, les caractéristiques et particularités des deux appareils d'auscultation sont résumées au tableau 1.

Mode d'application de la charge

Le deflectographe Lacroix applique une charge roulante à la structure de chaussée contrairement au FWD. Ce mode de chargement est plus conforme aux sollicitations

du trafic en provoquant la rotation des contraintes principales dans le massif pouvant être schématisé comme un effet de «pétrissage» du matériau.

Vitesse d'application de la charge

La vitesse de sollicitation de la structure est très lente dans le cas du Lacroix. Compte tenu du comportement viscoélastique des matériaux bitumineux, leur rigidité apparente peut diminuer de 30 à 70% par rapport à la même structure sollicitée à une vitesse de trafic courante (fig. 7).

Le FWD induit une impulsion de chargement plus courte à même de simuler une réaction des matériaux bitumineux équivalente à un chargement réel (vitesse de l'ordre de 70 km/h).

La réaction des matériaux de surface étant moins rigide avec le Lacroix, les contraintes sont transmises avec un niveau plus élevé vers les couches les plus profondes. Cette particularité permet au Lacroix d'avoir un pouvoir discriminant plus important vis-à-vis des sols et couches de fondation. D'un autre côté, le FWD est plus fiable pour estimer les caractéristiques mécaniques des couches bitumineuses en surface.

Rendement et pas de mesure

Le rendement opérationnel de l'appareil est à l'avantage du Lacroix qui permet de relever la déflexion sur les deux traces de roue (gauche et droite) avec un ratio (Vitesse / Intervalle de mesure) plus élevé.

Le FWD compense son rendement plus faible par une souplesse d'utilisation plus grande. Il est en effet possible de disposer l'appareil longitudinalement ou transversalement au niveau d'un point quelconque sur toute la surface de la voie. Le FWD peut rencontrer une certaine difficulté à réaliser des mesures sur la trace droite dans le cas d'une chaussée étroite, où la proximité de la banquette empêche la mise en station de la remorque.

Résolution des capteurs de mesure

Le déflectographe Lacroix sollicite la structure de telle sorte qu'il engendre une amplitude de déflexion plus grande et variant plus lentement que dans le cas du FWD. Ce mode de chargement s'accommode d'un capteur inductif mesurant le déplacement au $\frac{1}{100}$ de mm.

Le FWD applique une impulsion brève conduisant à une déflexion faible et variant très vite. Cette caractéristique du chargement nécessite un capteur sismique (géophone) permettant une précision de mesure de $\frac{1}{1000}$ de mm.

Le FWD peut présenter un avantage dans le cas où l'on cherche à mesurer une légère variation dans le temps de la capacité portante d'une structure.

Niveau de chargement appliqué et type de surfaces auscultées

Le FWD offre la possibilité de faire varier l'intensité de la charge appliquée en fonction de la rigidité de structure observée in situ. Le déflectographe Lacroix dispose d'une charge unique choisie au début de l'auscultation par un lestage du camion à 10 ou 13 t sur l'essieu de mesure.

Les dimensions et le poids du camion Lacroix peut le pénaliser sur certaines routes (virages serrés, forte déclivité, passages à niveau) alors que le FWD y sera plus à l'aise. Ce dernier permet de réaliser des mesures sur tout type de surfaces allant des matériaux granulaires en fondation aux couches de surface bitumineuses ou cimentaires. De plus, avec le FWD il est possible de déterminer l'état des joints d'un revêtement en béton.

De par sa charge potentiellement très élevée (FWD jusqu'à 24 t et HWD jusqu'à 48 t), le FWD/HWD permet également d'effectuer des mesures de portance sur des pistes aéroportuaires.

Exploitation des mesures

Les mesures de déflexion fournies par le Lacroix et le FWD servent de base à une évaluation de la capacité portante de la structure auscultée. Il existe pour cela des approches permettant une exploitation plus ou moins poussée et qui sont, par degré de sophistication:

1. Calcul de la déflexion déterminante d'un tronçon homogène
2. Calcul du module élastique apparent des couches
3. Estimation de la durée de vie résiduelle de la structure
4. Détermination de l'épaisseur de renforcement

Déflexion déterminante

Le calcul de la déflexion déterminante est défini dans la norme SN 640 733b. Il s'agit pour un tronçon homogène d'au minimum 10 points de mesure, de majorer, la valeur moyenne par deux écarts types. Ainsi 95% des déflexions du tronçon homogène se situent en dessous de la valeur caractéristique calculée. Une telle exploitation peut être effectuée sur les déflexions relevées par le Lacroix, FWD ou Benkelman.

Module élastique des couches

La détermination du module élastique peut servir à contrôler la conformité des propriétés mécaniques du matériau posé. Le suivi à long terme de l'évolution du module élastique permet de détecter soit un durcissement du matériau, soit une diminution de la rigidité syno-

nyme de dégradation des couches liées (bitumineuses ou hydrauliques).

Le calcul du module élastique se base, pour les deux appareils, sur une approche de calcul inverse à l'aide d'un modèle mécanique de la chaussée.

La directive [5] sur l'exploitation des résultats Lacroix laisse le choix de la méthode de calcul ouvert. Elle donne par contre des recommandations sur les hypothèses du modèle mécanique (taille du modèle) et une limitation du gradient thermique dans les couches bitumineuses. Le calcul inverse dans le cas du FWD est également concevable par une multitude d'approches numériques (Bousinesq-Odemark, modèle multicouche de Burmister, éléments finis). Une exploitation de routine peut être réalisée avec un logiciel dédié et convivial à l'image de ELMOD, WESDEF, MICHBACK, EVERCALC, etc.

Durée de vie résiduelle

La durée de vie résiduelle est une information très parlante pour le gestionnaire de la maintenance car exprimant l'état structurel de la chaussée en nombre d'années de service disponibles.

Pour déterminer ce paramètre, il est courant de procéder en deux étapes:

1. Définir le niveau de sollicitation que subit la chaussée actuelle ou modèle de réponse: Il s'agit du calcul inverse des modules élastiques décrit plus haut.
2. Extrapoler l'état de la chaussée dans le temps au moyen de lois de dégradation désignées par modèle de performance: Il est courant de recourir à des lois de fatigue élaborées à partir d'essais accélérés et d'expérience pratique.

Le résultat recherché est fortement sensible aux hypothèses de calcul retenues ce qui nécessite d'être très prudents lors de ce choix. En effet, les lois de dégradation qui se présentent sous une forme exponentielle peuvent conduire à des durées de vie différentes selon les hypothèses admises.

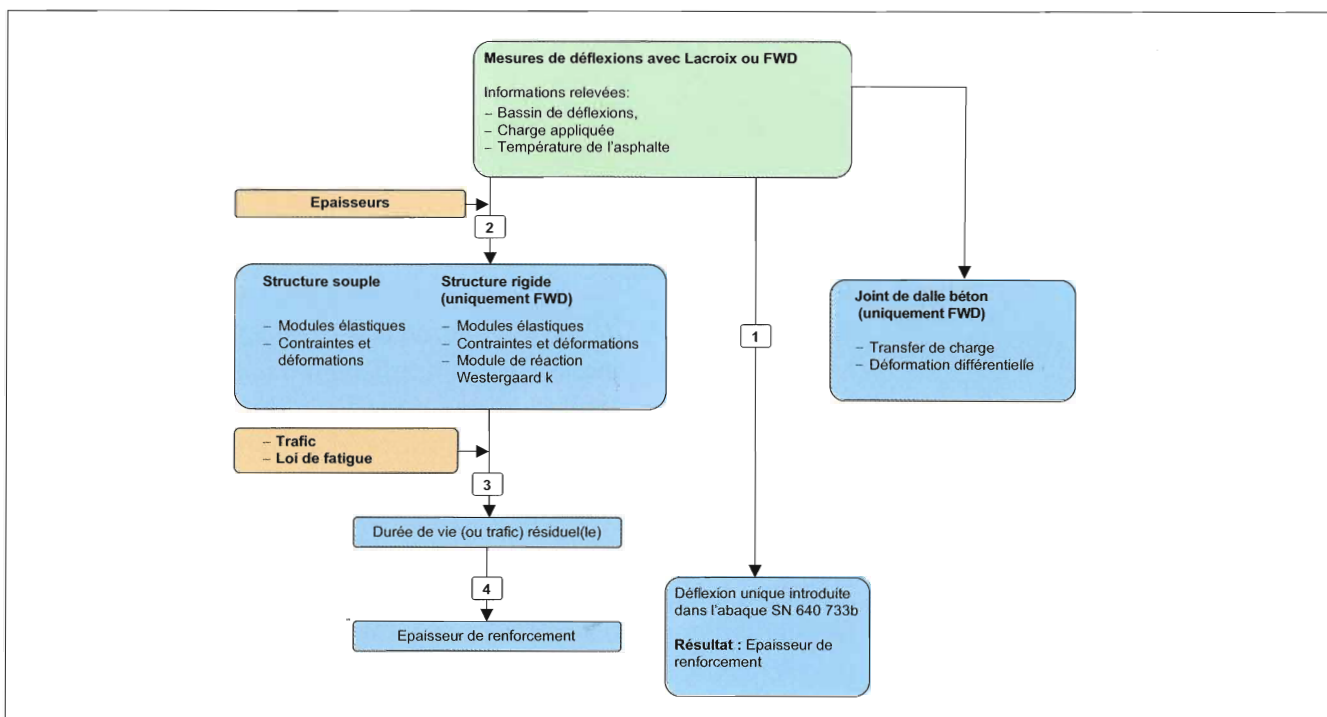
Épaisseur de renforcement

La proposition d'une épaisseur de renforcement est une étape très délicate de l'exploitation des mesures de déflexions.

Le déflectographe Lacroix, comme la poutre Benkelman, se base, en Suisse, sur l'abaque de la norme SN 640 733b pour proposer une épaisseur de renforcement en fonction de la déflexion obtenue et du trafic envisagé. Cet abaque empirique est issu d'une série d'auscultations de chaussées obtenues dans le cadre de la recherche VSS 4/85 [8]. Il s'agissait de déterminer le pouvoir de diminution de la déflexion en réalisant des mesures avant et après le renforcement des structures souples avec différentes épaisseurs. Bien que cette méthode ait fait ses preuves pendant de longues années, elle présente des points faibles: D'une part, les effets de la température et l'épaisseur des couches sur l'amplitude de la déflexion sont négligés. D'autre part, la réduction de l'amplitude de la déflexion ne représente pas une garantie de la pérennité de la structure routière.

Il n'existe pas pour le moment un abaque équivalent pour l'appareil FWD.

Les programmes d'exploitation des mesures FWD calculent l'épaisseur de renforcement au travers de méthodes analytico-empiriques, à savoir:



8: Organigramme des différentes exploitations des mesures de déflexion.

8: Betriebssystemschema der verschiedenen Benützigungen der Deflexionsmessungen.

1. calcul des modules élastiques du modèle mécanique
2. calcul de l'épaisseur de renforcement permettant de réduire la sollicitation critique en fonction du trafic et de la durée de vie escomptés

Le FWD identifie la couche de la structure qui subie la sollicitation critique (couche bitumineuse, grave ou sol fondation) et ne se contente pas comme la méthode Benkelman d'une valeur unique qui caractérise la portance de la structure. Cette faculté du FWD, également possible avec le Lacroix, est possible grâce à l'enregistrement du bassin de déflexion complet.

L'organigramme de la fig. 8 représente les différentes exploitations (1 à 4).

Corrélation entre les déflexions FWD, Lacroix et Benkelman

Il existe une multitude de corrélations entre les déflexions FWD, Lacroix et Benkelman qui sont proposées dans la littérature scientifique sans toutefois arriver à un consensus valable pour toutes les structures routières. La plupart des relations étant trop «simples» et majoritairement linéaires, elles dépendent de la structure auscultée et des conditions climatiques rencontrées.

L'écart entre les méthodes de mesure peut être expliqué rationnellement par les effets de viscoélasticité des revêtements bitumineux en fonction du mode d'application de la charge. Ce constat est conforté par le fait que plusieurs auteurs ont observé que les déflexions Benkelman et FWD sont équivalentes dans le cas d'une structure en béton de ciment ne présentant pas ce comportement viscoélastique.

La commission d'experts VSS EK 5.03 discute de l'opportunité de lancer une recherche sur la détermination d'une corrélation entre les déflexions obtenues par le FWD, le Lacroix et la poutre de Benkelman qui reste la méthode de référence en Suisse.

Discussion

Le deflectographe Lacroix et le FWD sont des appareils de mesure de la portance qui, de part leur rendement, remplacent avantageusement la poutre de Benkelman. Le choix entre l'un ou l'autre dépend des besoins du gestionnaire de l'entretien qui peut trouver des éléments de réponse dans le comparatif établi dans le présent article.

La méthode suisse de dimensionnement du renforcement a été établie avec des approches empiriques qui ont rempli leur rôle au mieux pendant plusieurs années. Il devient nécessaire de mettre à jour cette méthode en adoptant une approche mécanique plus rationnelle, ce à quoi s'attelle la commission VSS EK 5.03. Ce changement favorisera une meilleure prise en compte de nouveaux matériaux performants et des stratégies d'entretien plus économiques. ■

Références bibliographiques

- [1] Norme suisse SN 670 733b, Entretien des chaussées – Renforcement de superstructures de chaussées avec revêtements bitumineux à l'aide de mesures de déflexion, VSS 1997.
- [2] Rohr C., Cuennet G. et Dr. Caprez M., Mesures sur les sols et graves de fondation, Rapport de recherche 18/94, octobre 1998.
- [3] Jacot A., «Variations saisonnières de la déflexion sur les chaussées souples; Recherche bibliographique», Rapport de recherche OFROU n°231.
- [4] Baucheron de Boissoudy A., Gramsammer J.-C., Keryell P., Paillard M., Le Défectographe 04, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 129, 1984.
- [5] Méthode d'essai LPC n° 39, Études routières ; Déformabilité de surface des chaussées ; Exécution et exploitation des mesures, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 1997.
- [6] Ullidtz P., Modelling Flexible Pavement Response and Performance, 1998.
- [7] Sauterey R., Utilisation des mesures de déflexion pour le dimensionnement et la surveillance des chaussées.
- [8] Blumer M., Jacot A., Contausset F., Oberbauerstärkung von flexiblen Strassen, Rapport de recherche OFROU n°155.
- [9] Bohn A.O., The History of the Falling Weight Deflectometer (FWD), Technical University of Denmark.