

Évaluation des déflectographes

Jean-Michel SIMONIN
Chargé de recherche

Alain RIQUALL
Expert technique principal

Division Gestion de l'entretien des routes
Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

RÉSUMÉ

La mise en place d'une politique qualité nécessite l'évaluation des performances des appareils de mesure. Pour la déformabilité de surface, la Méthode LPC spécifie les performances à respecter en répétabilité et en justesse en comparaison avec la mesure d'un capteur ancré, considérée comme la mesure de référence. Deux opérations d'évaluation ont permis d'évaluer l'ensemble des déflectographes du réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC).

À partir de l'ensemble des mesures recueillies, différents traitements ont été effectués validant ou rejetant les résultats de chaque mesure individuelle. Globalement, les différents types de déflectographes valident environ 95 % des mesures de déflexion. Par contre, ce pourcentage varie suivant le type d'appareil pour ce qui concerne la mesure de la courbure.

Le calcul des performances de chaque appareil a été mené conformément aux normes en vigueur et à la Méthode LPC de mesure de la déformabilité de surface. Pour un type de déflectographe donné, on constate une homogénéité des performances métrologiques des appareils du réseau. Les résultats obtenus permettent de qualifier les différents types d'appareils dans les classes définies par la Méthode LPC en fonction de la structure de chaussée où s'effectue les mesures.

Les déflectographes de type 02 sont qualifiés en classe 1 sur les chaussées souples. Les appareils de type 03 (plus performants) sont qualifiés en classe 2 sur le même type de chaussée. Les déflectographes de type 04, qui ont les meilleures performances métrologiques, sont qualifiés en classe 2 sur tous les types de chaussées.

MOTS CLÉS : 22-60 - *Défectographe - Déformation - Surface - Évaluation - Qualité - Mesure - Déflexion - Appareil de mesure - Chaussée (corps de) - Essai - Auscultation - Courbure.*

Introduction

Le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) met en œuvre actuellement une politique qualité qui s'applique notamment au domaine de l'auscultation structurelle des chaussées. Dans le cadre de cette politique, le LCPC a organisé une opération d'évaluation de l'ensemble des matériels de mesure de la déformabilité de surface des chaussées.

Les objectifs de cette opération sont :

- d'évaluer les performances de chaque déflectographe en justesse, en répétabilité, et donc en exactitude de mesure ;
- de vérifier la conformité des déflectographes par rapport aux spécifications de performances des mesures indiquées dans la Méthode LPC [1], voire d'identifier les déflectographes non conformes.

Le présent article rend compte des résultats de cette opération d'évaluation.

Principe de l'évaluation

Évaluation de la justesse

La justesse d'un déflectographe est évaluée en comparant, en un point, la valeur mesurée par l'appareil et la valeur « conventionnellement vraie » telle qu'elle est définie dans la Méthode LPC [1]. Par définition, cette valeur est calculée à partir du relevé effectué par un capteur ancré à 6 m de profondeur, au droit du jumelage arrière d'un appareil circulant à une vitesse de 1 m/s. La

répartition des charges sur la chaussée doit respecter celle imposée par un déflectographe de type châssis court. La charge des essieux est de 55 kN pour l'essieu avant, 130 kN pour l'essieu arrière.

La justesse de la mesure d'un appareil est caractérisée par l'écart de justesse. Celui-ci est égal à la moyenne, sur au moins dix essais, de la valeur absolue des écarts entre la valeur mesurée par l'appareil et la grandeur conventionnellement vraie.

Évaluation de la répétabilité d'un déflectographe

La répétabilité d'un appareil représente la dispersion des mesures de celui-ci effectuées en un même point dans des conditions opératoires constantes. Pour chaque appareil et chaque point de mesure, la moyenne m et l'écart type σ des mesures sont calculés. La répétabilité r pour le niveau de mesure m est : $r = 2,83 \times \sigma$ [2]. Les couples de valeurs (m, r) sont représentés sur un diagramme où les moyennes apparaissent en abscisse et la répétabilité en ordonnée. Pour la déformabilité de surface (déflexion ou courbure), une loi sensiblement linéaire lie ces deux paramètres :

$$r = a \times m + b$$

où

- r : représente la répétabilité de l'appareil ;
- m : représente le niveau moyen de mesure ;
- a et b : sont deux coefficients propres à l'appareil évalué.

La Méthode LPC distingue deux classes d'appareils de mesure de la déformabilité de surface. Pour chaque classe, la Méthode LPC définit des spécifications par rapport à l'écart maximal de justesse (E_M) et à la répétabilité r . Le tableau I présente ces spécifications en déflexion et en courbure.

Déroulement des essais

Deux sites, comportant chacun quatre sections, ont été retenus en raison de leurs aménagements en capteurs ancrés :

- ① autour du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Nancy (sections numérotées de 1 à 4) ;
- ② dans la région de Gap (sections numérotées de 5 à 8).

Le tableau II donne la structure et le niveau moyen de déflexion mesuré par le capteur ancré, sur chaque structure.

Sur chaque section, vingt-et-un points étaient marqués à la peinture tous les 5 mètres. Le pre-

mier point était généralement équipé d'un dispositif de mesure à capteur ancré, destiné à évaluer la justesse des déflectographes.

L'évaluation s'est déroulée en deux opérations :

- ① tous les déflectographes ont participé à la première opération en septembre 1994. Ils ont été répartis sur les deux sites (six châssis courts et sept châssis longs à Nancy ; quatre châssis courts et six châssis longs à Gap) ;
- ② les déflectographes jugés non conformes à l'issue de cette évaluation ont été révisés mécaniquement et métrologiquement par le Centre coordonnateur de Trappes. Ils ont ensuite participé à une seconde opération en novembre 1995.

Sur chaque site, une semaine a été nécessaire à la réalisation des essais d'évaluation. Chaque déflectographe a effectué de dix à quinze passages sur les quatre sections testées. Chaque appareil a ainsi effectué quelque 2 000 mesures (1 000 en rive et 1 000 en axe). Au cours de la même opération, environ 4 500 mesures de capteurs ancrés ont été enregistrées.

Traitement des relevés effectués par le capteur ancré

La justesse d'un appareil est évaluée en comparant, en un point de la chaussée, la valeur mesurée par cet appareil et la valeur conventionnellement vraie. Cette valeur est une caractéristique intrinsèque de la chaussée. L'essai de référence renouvelé plusieurs fois doit conduire, dans des conditions opératoires constantes, à la même valeur. Dans la pratique, on observe toujours une certaine variation de la mesure réalisée par un capteur ancré aux passages du même déflectographe. Cette dispersion est due :

- aux variations de conditions opératoires ;
- à une certaine dispersion de la mesure du capteur ancré.

Il a donc fallu définir une procédure permettant d'accéder aux valeurs de référence à partir des valeurs mesurées par le capteur ancré. Cette procédure comporte quatre étapes.

Élimination des mesures invalides

Lors de la réalisation des essais, les déflectographes se sont parfois trop écartés de la trajectoire prévue au niveau du capteur ancré (passage de l'essieu arrière à plus de 20 cm du capteur ancré). Les résultats de mesure du capteur ancré obtenus dans ces conditions ont été invalidés. Pour cha-

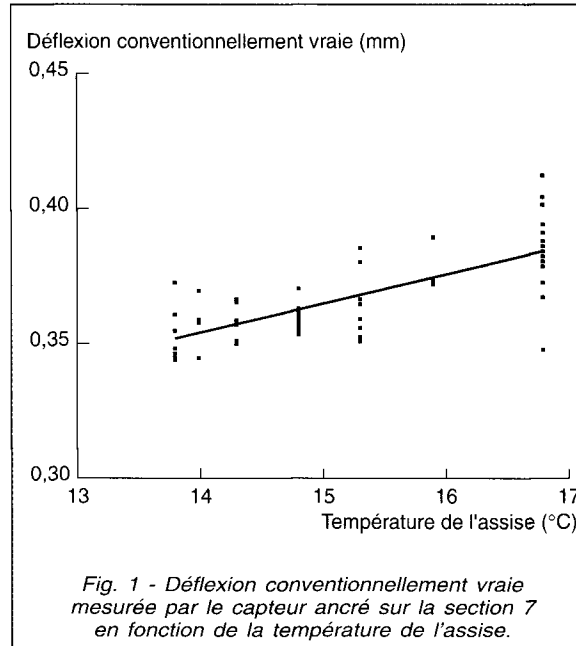
TABLEAU I
Spécifications de justesse et de répétabilité définies dans la Méthode LPC

Spécifications	Classe 1		Classe 2	
	Déflexion	Courbure	Déflexion	Courbure
Justesse	$E_{MJ} (d) \leq 0,21 d + 0,12$	$E_{MJ} (c) \leq 0,15 c + 0,0015$	$E_{MJ} (d) \leq 0,07 d + 0,12$	$E_{MJ} (c) \leq 0,15 c + 0,0015$
Répétabilité	$r (d) \leq 0,283 d + 0,085$	$r (c) \leq 2 c$	$r (d) \leq 0,2 d + 0,085$	$r (c) \leq c$

TABLEAU II
Structure et niveau moyen de déflexion mesurée par le capteur ancré sur chaque section

Section	Structure théorique	Déflexion (mm)
1	8 BB / 25 GCV / 25 GCV	0,21
2	6 BB / 25 GL / GNT	0,45
3	6 BB / 25 GL / GNT	0,35
4	6 BB / 15 GL désagrégée	0,60
5	25 GCV + 25 GCV + 3 SB + 4 BB	0,05
6	Renf. 25 GCV + 6 BB	0,06
7	Renf. AC + 15 GB + 6 BB + ES	0,38
8	Souple traditionnelle	1,30

BB = béton bitumineux ; GCV = grave cendres volantes ; GL = grave laitier ; GNT = grave non traitée ; SB = Sable bitume ; AC = ancienne chaussée ; GB = grave bitume ; ES = enduit superficiel.



cune des mesures validées au passage d'un déflectographe châssis court (chargement « de référence »), on a calculé la déflexion maximale et la courbure conventionnellement vraies.

Étude de la relation entre les mesures du capteur ancré et la charge réelle sur l'essieu

Une relation de dépendance linéaire a été recherchée entre les mesures du capteur ancré et le poids de l'essieu arrière des appareils. Mais, dans les limites des charges imposées par les déflectograpes (128 à 134 kN), il n'y a pas de variation significative de mesure du capteur ancré.

Étude de la relation entre les mesures du capteur ancré et les températures relevées

Une relation de dépendance linéaire a été recherchée entre les mesures du capteur ancré, et les températures relevées au cours des essais (tem-

pérature ambiante, température au milieu de la couche de roulement, température de l'assise). Une relation linéaire a été trouvée entre la température de l'assise et la mesure du capteur ancré. La figure 1 illustre la relation trouvée sur la section 7. La droite de régression pour l'ensemble des couples (température, déflexion) est également tracée sur ce graphique.

Calcul des mesures de référence

Pour chaque section, la température moyenne de l'assise a été calculée par demi-journée. Les valeurs de référence (déflexion et courbure) ont été déduites de cette température moyenne, pour chaque section et chaque demi-journée, en appliquant les relations précédemment établies (cf. § Étude de la relation entre les mesures du capteur ancré et les températures relevées). La justesse d'un déflectographe est évaluée en comparant les valeurs mesurées par l'appareil et les valeurs de référence sur la même section et durant la même demi-journée.

Traitement des relevés effectués par les déflectographes

Calcul des déflexions et courbures

Le relevé effectué par un déflectographe est composé de quatre-vingt-une mesures élémentaires (prélèvements). La première mesure est effectuée lorsque le patin de mesure est situé 1,45 m avant le jumelage arrière du déflectographe. Les prélèvements suivants sont effectués pendant l'avance du véhicule à raison d'une mesure tous les 2 cm. L'ensemble des prélèvements constitue une courbe de déflexion. À partir de cette courbe, le traitement habituel des mesures (logiciel RDS [3]) calcule la déflexion maximale et la courbure au point de mesure. Ce traitement a invalidé certaines mesures dont le bassin de déflexion semblait anormal (mouvement intempestif de la poutre, etc.).

Localisation des mesures

La phase suivante du traitement des mesures a consisté à vérifier la localisation réelle de chaque mesure par rapport aux positions marquées sur la section. Celle-ci comprend vingt-et-un points tests espacés de 5 m (fig. 2). La longueur réelle entre le premier et le dernier point test est donc de 100 mètres.

Une analyse des informations « distances » attachées à chaque mesure sur les fichiers délivrés par les déflectographes a été menée. Pour une section déterminée et l'ensemble des passages, la moyenne de la distance entre le premier et le dernier point peut varier, suivant les déflectographes, de 99 à 104,5 mètres. Un système de recalage de la distance, spécifique à chaque déflectographe et sur chaque section, a permis de ramener, par une règle de trois, la distance moyenne mesurée par un déflectographe à la distance réelle de 100 mètres. Une fois ce recalage effectué, la distance corrigée entre chaque mesure et la première mesure a été calculée, puis comparée à la distance théorique (5, 10, 15 ...). Les points de mesure, dont la distance corrigée s'écarte de plus de 1,5 m de la distance attendue, ont été invalidés (localisation invalide).

Visualisation des mesures

La dernière étape du traitement des mesures a consisté à visualiser, pour chaque déflectographe et pour chaque section, les schémas d'itinéraires de déflexion et de courbure enregistrés au cours des différents passages. La figure 3 présente un exemple de schémas d'itinéraires superposés obtenus sur la section 2. Il apparaît clairement des mesures aberrantes aux points 6 et 11.

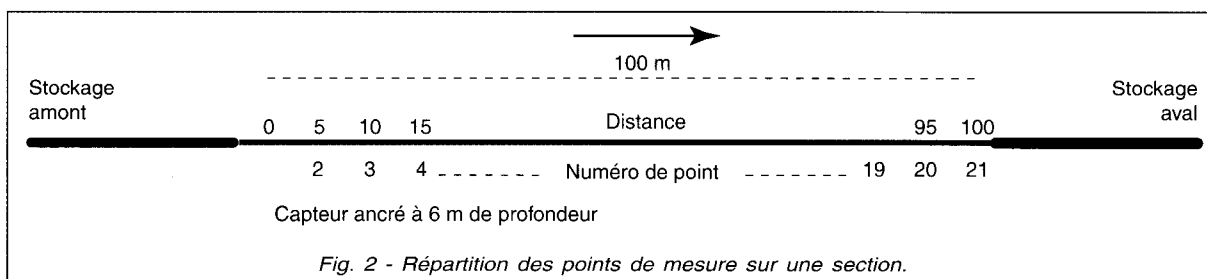


Fig. 2 - Répartition des points de mesure sur une section.

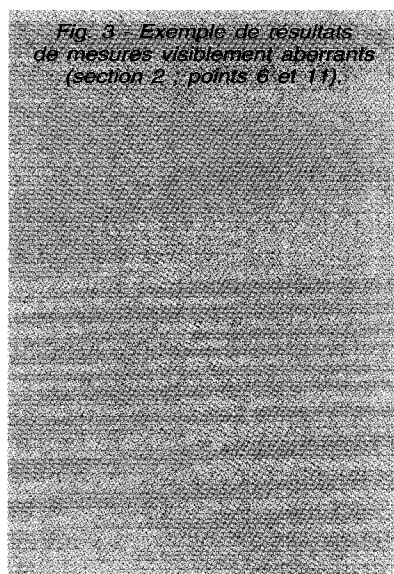
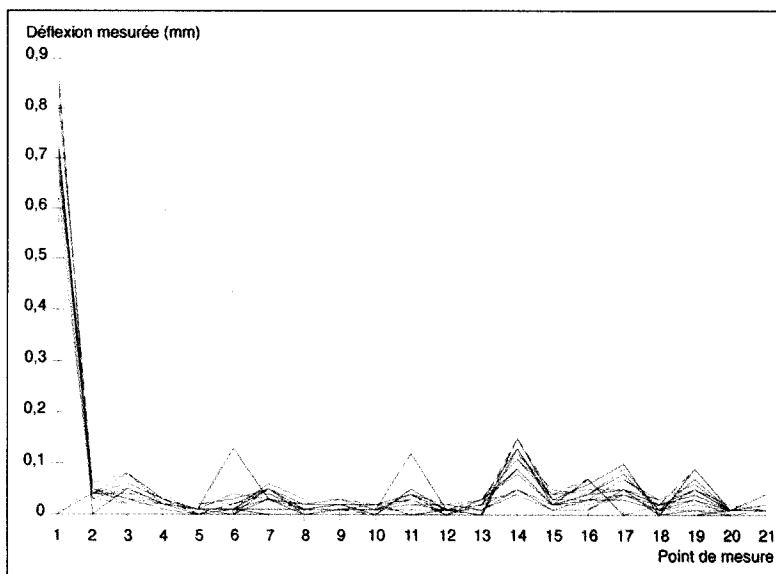


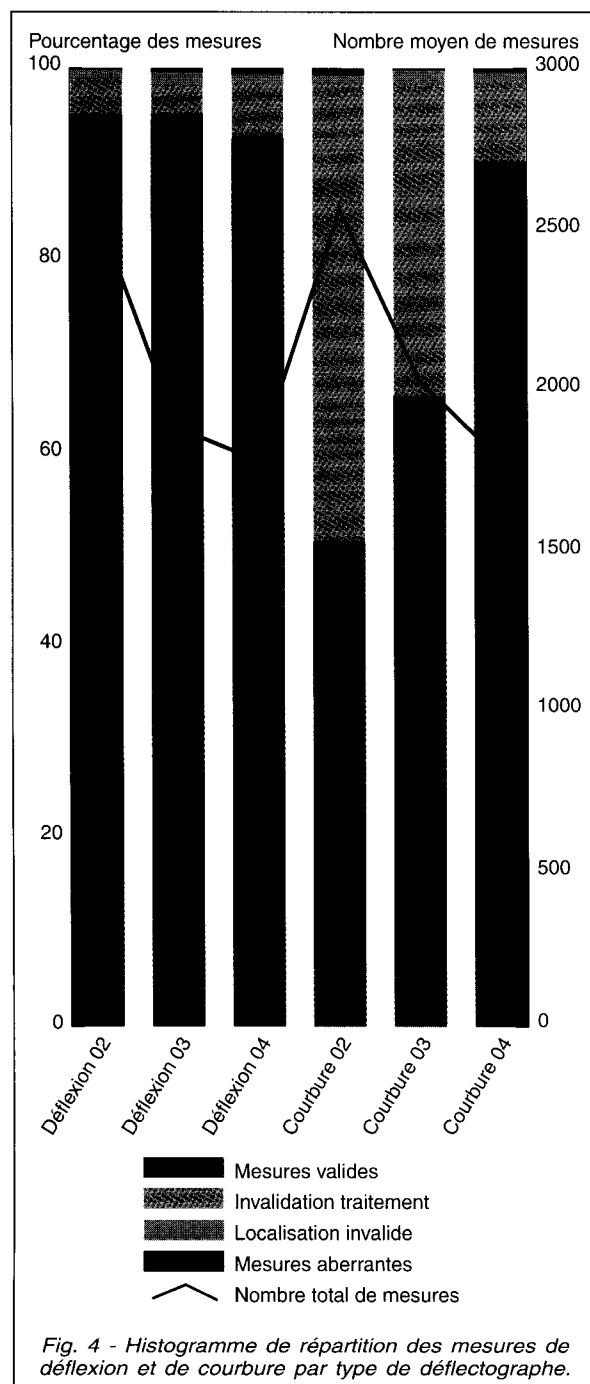
Fig. 3 - Exemple de résultats de mesures visiblement aberrantes (section 2, points 6 et 11).



Si on n'élimine pas ces résultats aberrants (0,14 et 0,12 mm), la répétabilité est de 0,09 et 0,07 mm. En éliminant ces résultats aberrants, la répétabilité est alors de 0,03 mm pour les deux points de mesure.

Quantité et nature des mesures invalidées

Pour chaque déflectographe et chaque section, les pourcentages des mesures invalidées par les différents traitements ont été calculés. Comme le montre la figure 4, plus de 95 % des mesures de



déflexion ont été conservées. Ceci représente environ 2 000 mesures par appareil. En ce qui concerne les mesures de courbure, le pourcentage des mesures valides est d'environ 50 % pour les déflectographes 02, 60 % pour les appareils de type 03 et 90 % pour les appareils de type 04. Ceci représente une moyenne de 1 200 à 1 500 mesures par appareil. La quasi-totalité des mesures dites invalides a été réalisée sur les chaussées semi-rigides épaisses (sections 1 et 6). Sur ces sections, le logiciel de traitement RDS n'a pu calculer la courbure (invalidation traitement). L'ensemble des autres causes d'invalidation de mesures représente, comme pour la déflexion, moins de 2 % des mesures (localisation invalide ou mesures aberrantes).

Justesse en déflexion

La justesse d'un appareil est évaluée en calculant la moyenne des valeurs absolues des écarts entre la mesure de l'appareil et la valeur de référence, e . Pour chaque capteur ancré et chaque déflectographe, cet écart moyen e a été calculé. Les figures 5 à 7 présentent en abscisse, le niveau de mesure de référence, et en ordonnée, l'écart moyen e calculé précédemment. Les droites en pointillés représentent les limites d'écart maximal de justesse toléré par la Méthode LPC pour les deux classes d'appareils.

On observe d'abord une homogénéité des résultats pour un même type d'appareil. En effet, pour un niveau de mesure donné, les écarts moyens, entre la mesure de référence et les mesures des différents appareils, sont regroupés autour d'un même point. Par exemple, sur la section 8, où la mesure de référence du capteur ancré est de 1,32 mm, la mesure des appareils de type 02 varie entre 0,95 et 1,02 millimètres. Celle des déflectographes de type 03 varie entre 1,16 et 1,26 millimètres.

Les appareils de type 02 et 03 évaluent correctement la déflexion sur les chaussées souples (section 4 et 8). Sur les autres types de chaussées, ils sous-estiment la déflexion.

Les appareils de type 04 mesurent de façon satisfaisante la déflexion sur les chaussées plus rigides. On constate que, sur la section 4 (souple), les appareils surestiment la déflexion. Ce résultat est dû à la conception même de la poutre, qui induit un phénomène de compensation de la déflexion initiale décrit par de Boissoudy [4]. Ce phénomène est moins important sur la section 8, plus souple, qui n'induit pas ce phénomène de compensation.

Au total, et compte tenu des critères fixés dans la Méthode LPC, il apparaît, pour la mesure de dé-

Moyenne des écarts entre les mesures d'un appareil et la déflexion de référence en fonction du niveau moyen de référence

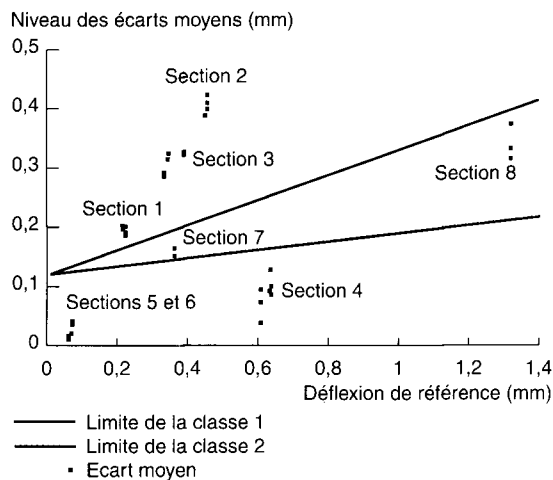


Fig. 5 - Déflectographe de type 02.

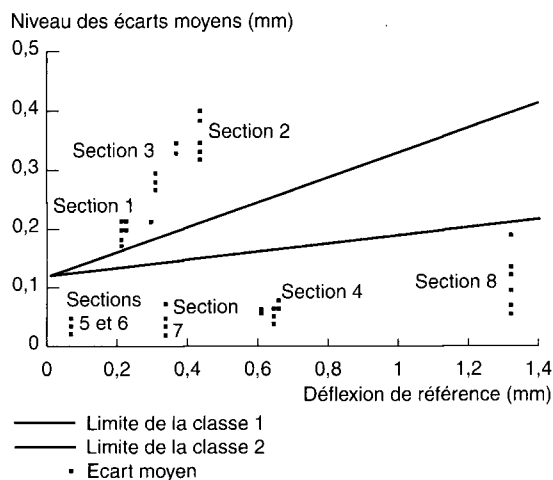


Fig. 6 - Déflectographe de type 03.

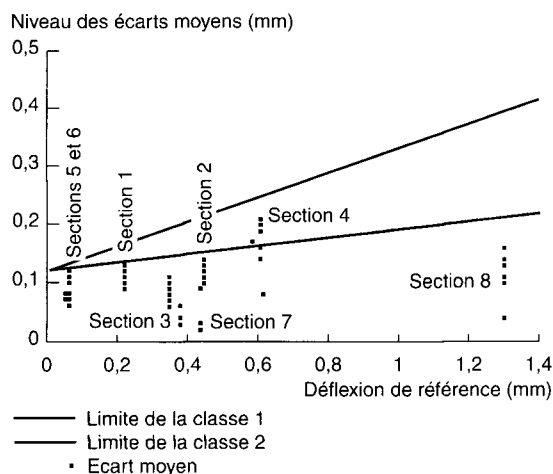


Fig. 7 - Déflectographe de type 04.

flexion, que les déflectographes de type 02 sont qualifiés en classe 1 sur les chaussées souples ; les appareils de type 03 sont qualifiés en classe 2 sur les chaussées souples. Les appareils de type 04 sont, quant à eux, qualifiés en classe 2 sur tous les types de chaussées.

Comparaison de la courbure de référence et de la courbure estimée par le logiciel RDS

Lors des essais de Nancy et de Gap, la courbure donnée par les déflectographes était estimée par le logiciel RDS développé par le LRPC de Saint-Brieuc. À terme, la courbure sera mesurée par le système inclinométrique embarqué sur les déflectographes. Ce système est en cours d'industrialisation au Centre d'étude et de construction de prototypes d'Angers. Cependant, la comparaison entre la courbure de référence et celle calculée par le logiciel RDS a été effectuée.

Les figures 8 à 10 présentent, en abscisse, la courbure de référence mesurée par les capteurs ancrés, et, en ordonnée, la moyenne des courbures estimées par le logiciel RDS pour chaque appareil sur les capteurs ancrés.

La mesure de courbure est moins homogène que la mesure de déflexion. De plus, la mesure de courbure est surestimée par tous les appareils.

Afin d'améliorer l'estimation de la courbure, nous avons établi une régression linéaire entre la courbure de référence C_{ref} et la courbure estimée C_{est} . Cette analyse statistique permet de calculer un coefficient de proportionnalité « a » entre ces deux mesures.

$$C_{ref} = a \times C_{est}$$

Pour les déflectographes de type 02, 03 et 04, le coefficient « a » trouvé vaut respectivement 0,48, 0,61 et 0,57. Il permet de calculer une courbure corrigée C_{cor} à partir de la courbure estimée.

$$C_{cor} = a \times C_{est}$$

Cette correction apporte une meilleure estimation de la courbure de référence. Une analyse statistique plus poussée (régression non linéaire) pourrait améliorer ce système de correction.

Comparaison de la courbure relevée
avec la courbure de référence

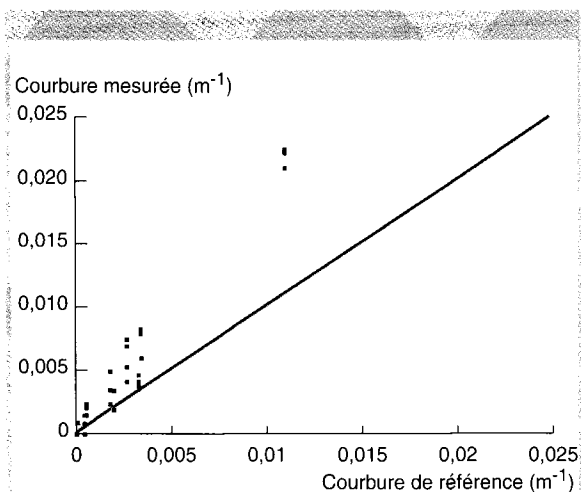


Fig. 8 - Déflectographe de type 02.

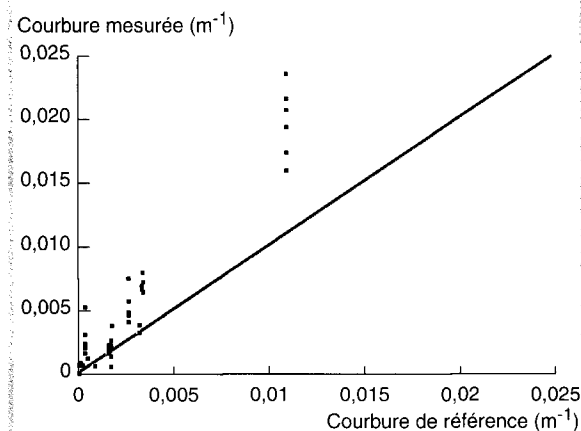


Fig. 9 - Déflectographe de type 03.

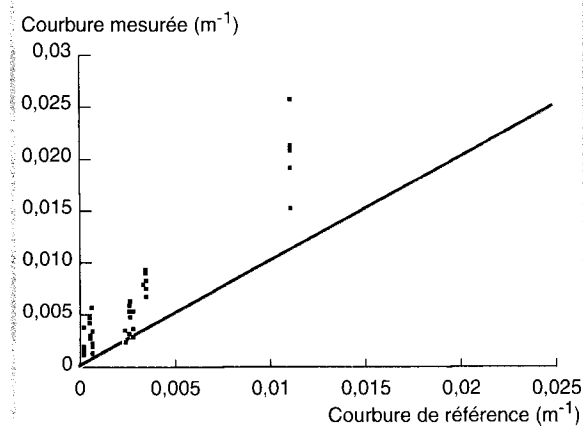


Fig. 10 - Déflectographe de type 04.

Répétabilité des déflectographes

La répétabilité r d'un appareil en un point de mesure de niveau m est donnée par la relation $r = 2,83 \times \sigma$ [2], dans laquelle σ représente l'écart type de la population de mesures.

Les couples de valeurs (m, r) sont représentés sur un diagramme tel que celui de la figure 11. La répétabilité d'un appareil est une fonction sensiblement linéaire des valeurs qu'il mesure. Ainsi, pour la déflexion, la répétabilité r_d est liée au niveau de mesure d par la relation :

$$r_d = a \times d + b$$

où :

- d est le niveau de déflexion mesurée ;
- r_d est la répétabilité des mesures au niveau de mesure d ;
- a et b sont deux coefficients, fonction de l'appareil.

La répétabilité d'un appareil est donc caractérisée par le calcul de ses quatre droites de répétabilité (déflexion en axe et en rive, courbure en axe et en rive).

Les figures 12 à 14 présentent, par type d'appareils, les deux droites de répétabilité de déflexion de l'ensemble des déflectographes. La droite rouge représente la limite de la classe 1. La droite verte présente la limite de la classe 2.

La répétabilité en déflexion des appareils de type 04 pour un niveau de mesure de 3 mm varie entre 0,16 et 0,59 mm (mesures de rive et d'axe confondues). La répétabilité moyenne de ces appareils pour le même niveau de mesure est de 0,32 millimètres.

Pour les appareils de type 03 et 02, la répétabilité moyenne pour le même niveau de mesure est de 0,40 et 0,50 millimètres.

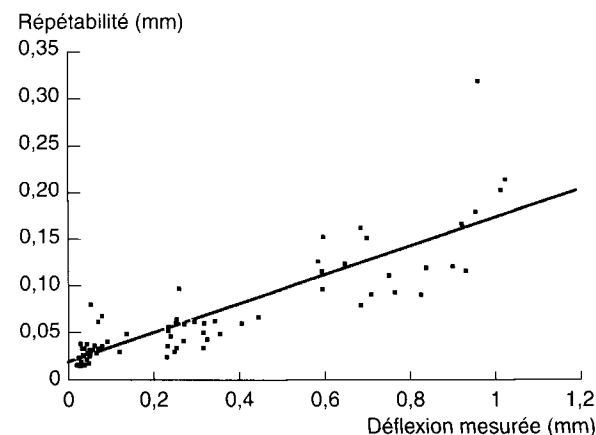


Fig. 11 - Graphique présentant les résultats de répétabilité d'un déflectographe pour les mesures de déflexion en rive.