

Évaluation du curviamètre MT 15

LES MESURES DE DÉFORMABILITÉ DE SURFACE DE CHAUSSÉES

RÉSUMÉ

Au cours des années 1970, le CEBTP a mis au point un appareil de mesure de la déformabilité de surface présentant une cadence de mesures (18 km/h) très intéressante, le curviamètre. Au début des années 1990, il a produit une nouvelle version de cet appareil, le curviamètre MT 15, présentant des performances métrologiques accrues, tout en conservant la vitesse de mesure. Les laboratoires des Ponts et Chaussées et le CEBTP ont organisé une expérimentation conjointe pour évaluer ces performances. Le curviamètre s'inscrit dans la classe de déflectomètre la plus performante, au sens de la méthode LPC d'exécution et d'exploitation de la déformabilité de surface.

Les principales contraintes d'utilisation de l'appareil résident dans son rayon de virage limité (~ 40 m) et plus encore dans le fait que la mesure n'est valable que lorsque la vitesse de l'appareil est stabilisée à 18 km/h. Sur les tronçons où les mesures sont possibles, le pourcentage de mesures invalides varie, selon l'état de surface et la sinuosité de la chaussée, entre 7 et 24 %, ce qui est comparable aux autres déflectomètres.

MOTS CLÉS : 22 - 61 - Appareil de mesure - Évaluation - Déformation - Surface - Mesure - Déflectographe - Vitesse - Expérimentation - Chaussée (corps de).

Philippe LEPERT

Directeur de recherche
Division Gestion de l'entretien routier

Georges AUSSEDAT

Chef du Service routes
Centre d'Étude du Bâtiment et des Travaux Publics

Jean-Michel SIMONIN

Chargé de recherche
Division Gestion de l'entretien routier
Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Introduction

Le Centre d'Expérimentation pour le Bâtiment et les Travaux Publics (CEBTP) a mis au point un appareil de mesure de la déformabilité de surface des chaussées : le curviamètre [1]. Il construit et commercialise cet appareil et en exploite un exemplaire dans le cadre de ses propres études routières. Au cours des dernières années, il a procédé à un certain nombre de modifications du curviamètre de nature à améliorer la qualité métrologique de cet appareil, qui est désormais dénommé le curviamètre MT 15.

En 1992, le CEBTP a proposé au Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) d'évaluer ce nouvel appareil dans le cadre d'une procédure de normalisation. L'objectif était aussi de le faire mieux connaître au réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC).

Au cours de 1992 également, le LCPC a mis au point une méthode de mesure de la déformabilité de surface [2]. Il a entrepris d'évaluer, par rapport à cette méthode, les différents appareils de mesure de déformabilité de surface (déflexion et courbure) existants sur le marché. À ce titre, il s'est naturellement intéressé au nouveau curviamètre MT 15.

Présentation du curviamètre MT 15

Le principe de mesure de l'appareil consiste à déposer sur la chaussée un géophone qui relève un signal créé par le déplacement vertical de la chaussée au passage de l'essieu arrière d'un poids lourd. L'exploitation de ce signal permet d'obtenir en ce point la déflexion et le rayon de courbure de la structure de chaussée sous une charge contrôlée en statique (entre 80 et 130 kN). Un système de chenille assure la dépose du géophone avant le passage de l'essieu et sa reprise après. Cette séquence est automatiquement répétée en une succession de points de mesure régulièrement espacés sur la chaussée, et ceci à une vitesse constante de 5 m/s. La mesure de la déformée débute un mètre avant le passage du jumelage arrière et se termine trois mètres après son passage. La figure 1 résume ces caractéristiques.

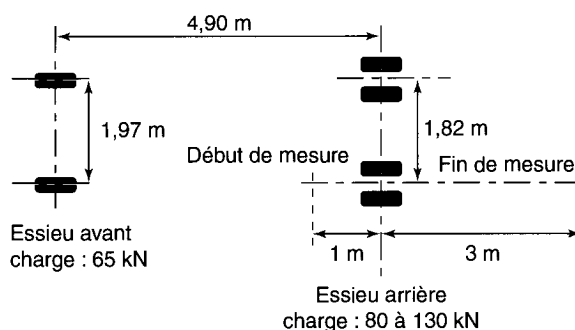


Fig. 1 - Diagramme de charge du curviamètre et principe de la mesure.

En jouant sur le gain du conditionneur auquel est connecté le géophone, on peut disposer de deux gammes de mesure différentes :

- la gamme n° 1, dite « à grand gain », a une petite étendue de mesure (déflexions < 0,50 mm) mais une bonne résolution ;
- une gamme n° 2, dite « à petit gain », a une grande étendue de mesure (déflexions < 2 mm) et une résolution plus faible.

Objectifs de l'évaluation du curviamètre

Deux objectifs principaux étaient assignés à l'évaluation du curviamètre MT 15 :

- quantifier la répétabilité des mesures de déflexion maximale et de courbure ;
- estimer la justesse des mesures de déflexion maximale et de courbure.

Pour avoir une approche plus fine de la justesse de l'appareil, et des possibilités d'exploitation de ses mesures, il était également prévu de comparer les bassins de déflexion mesurés par le curviamètre d'une part et par un capteur ancré dans la chaussée [3] d'autre part.

Principe de l'évaluation

Généralités

L'évaluation de la répétabilité des mesures de déflexion maximale et courbure s'est faite en appliquant la norme **NF X06-041**, en vigueur au moment de l'étude.

L'évaluation de la justesse des mesures de déflexion maximale et de courbure s'est faite, conformément au projet de méthode LPC d'exécution et d'exploitation de la mesure de déformabilité de surface [2], par comparaison avec les mesures d'un capteur ancré.

Protocole d'essai

L'évaluation s'est déroulée sur quatre sections de route, de 4 km de longueur chacune, choisies dans la région de Gap. Les chaussées (tableau I) et les états de surface représentaient ce qu'on rencontre usuellement sur les réseaux routiers français. On y trouvait également des virages plus ou moins serrés, dans la limite inférieure d'un rayon de 40 m, sauf cas exceptionnel.

TABLEAU I
Structure des sections d'essai

Section	Structure de chaussée
1	25 GCV + 25 GCV + 3 SB + 4 BB
2	Renf : AC + 25 GCV + 6 BB
3	Renf : AC + 15 GB + 6 BB + ES
4	Souple traditionnelle
<i>GCV : grave cendres volantes - GB : grave bitume SB : sable bitume - BB : béton bitumineux AC : ancienne chaussée - ES : enduit superficiel</i>	

Pour quantifier la répétabilité des mesures de déflexion maximale et de courbure, on a choisi sur chaque section un tronçon de route à peu près rectiligne, de 200 m de longueur. Sur ces tronçons, quarante et un points ont été marqués à intervalles réguliers de 5 mètres. Le curviamètre mesurait à plusieurs reprises la déformabilité de

surface sur les quarante et un points d'un tronçon, à raison de cinq passages pour chaque gamme de mesure.

La justesse des mesures de déflexion maximale et de courbure fut évaluée sur le onzième point de mesure de chaque tronçon dit « point test » (fig. 2). Ce point était équipé d'un capteur ancré [3] implanté dans la bande de roulement de rive de la chaussée.

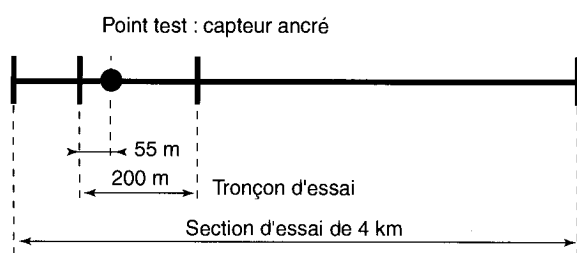


Fig. 2 - Schéma d'implantation des tronçons et des points tests sur les sections.

Des sondes de températures étaient implantées à 10 m du capteur ancré et à 30 cm du bord de la chaussée revêtue. Elles mesuraient les températures à 5, 12 et 20 cm de profondeur dans la chaussée. La température de l'air était également enregistrée.

Protocole de dépouillement

Seules les mesures déclarées valides par le curviamètre furent analysées. De plus, les mesures faites sur les points tests n'étaient prises en compte dans l'analyse de justesse que si le point de mesure du curviamètre était suffisamment proche du capteur ancré, c'est-à-dire :

- à moins de 30 cm sur les chaussées à assise traitée (sections n° 1 à 3),
- à moins de 20 cm sur la chaussée traditionnelle (section n° 4).

L'analyse des relevés sur les sections de 4 km s'est résumée à une observation visuelle des schémas itinéraires.

Le calcul de la répétabilité des mesures a porté sur la déflexion maximale et la courbure. Il a été fait à partir des mesures réalisées sur les quarante et un points marqués sur les quatre tronçons, et selon la norme NF X06-041 (voir détails du calcul dans [4]).

Enfin, on a estimé que le curviamètre, compte tenu de ses caractéristiques géométriques et de son chargement, représentait de façon acceptable le diagramme des charges de l'essai de référence. La justesse des mesures de déflexion

maximale et de courbure a donc été estimée en comparant directement les valeurs délivrées par le curviamètre à chaque passage sur les points tests, et les valeurs de référence. Ces valeurs de référence étaient calculées à partir des mesures des capteurs ancrés selon la procédure exposée dans la méthode LPC [2].

Résultats d'évaluation

Taux de mesures invalides

Sur chaque section de 4 km, le pourcentage moyen de mesures invalidées par le logiciel d'acquisition du curviamètre a été calculé (tableau II).

TABLEAU II
Pourcentage moyen de mesures invalides, par sections de 4 km et par gamme

Gamme de mesure	Grand gain	Petit gain
Section 1	11 %	—
Section 2	18 %	24 %
Section 3	7 %	11 %
Section 4	—	18 %

Les sections n° 1 et 3 sont plates, avec un revêtement correct et un bon uni. On peut expliquer le nombre plus élevé d'invalidations sur les sections n° 2 et 4 par l'état de surface de la chaussée, sa sinuosité et son uni médiocre.

À ces invalidations s'ajoutent :

- des zones sans mesure (virages trop serrés) : 170 m sur la section n° 2, et 260 m sur la section n° 4 ;
- les zones d'arrêt et de démarrage de chaque section (ou partie de section).

Répétabilité générale des mesures

La figure 3 montre, sur un exemple, que les relevés faits successivement sur une même section se superposent correctement, si on excepte les mesures invalides détectées en fin de section. Ce résultat est confirmé sur les autres sections.

Répétabilité en déflexion maximale

Gamme de mesure « grand gain »

La répétabilité en déflexion maximale du curviamètre, avec cette gamme de mesure, a été quantifiée à partir des mesures répétées sur les 123 points marqués des sections 1, 2 et 3. Elle est illustrée par la figure 4.

Fig. 3 -
Superposition des
relevés exécutés sur la
section n° 3 avec la
gamme « grand gain ».

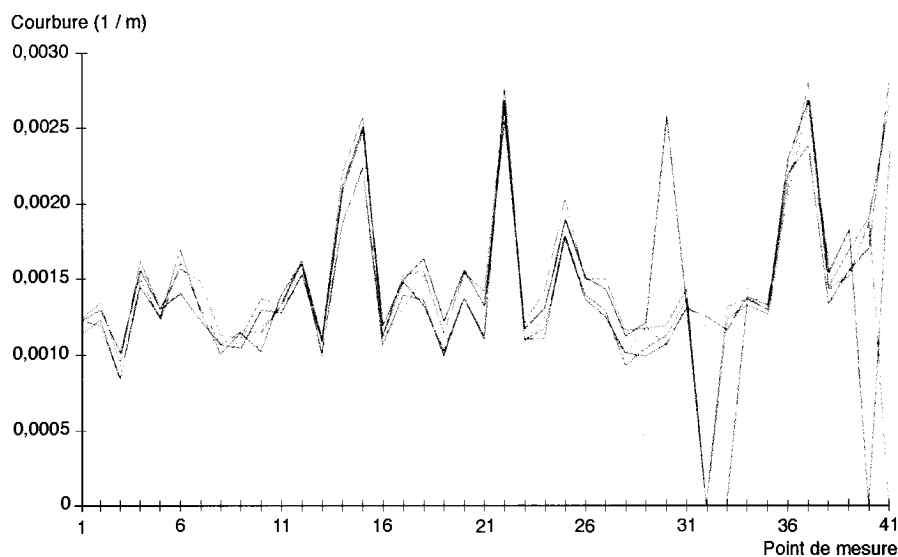


Fig. 4 -
Répétabilité des
mesures de déflexion
maximale avec la
gamme « grand gain ».

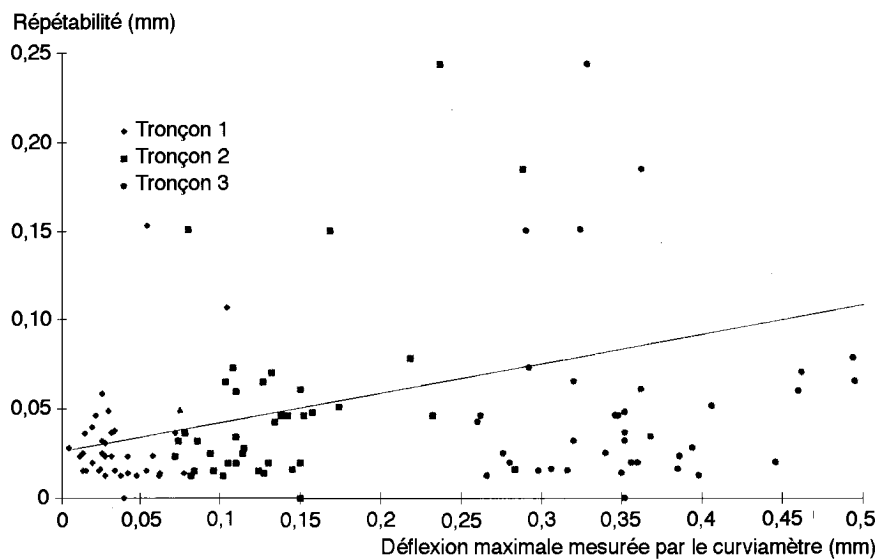
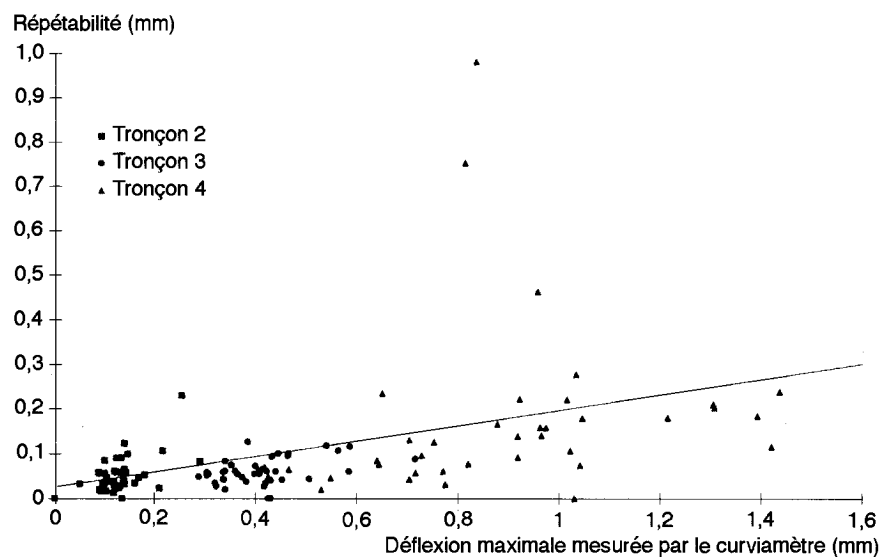


Fig. 5 -
Répétabilité des
mesures de déflexion
maximale avec la
gamme « petit gain ».



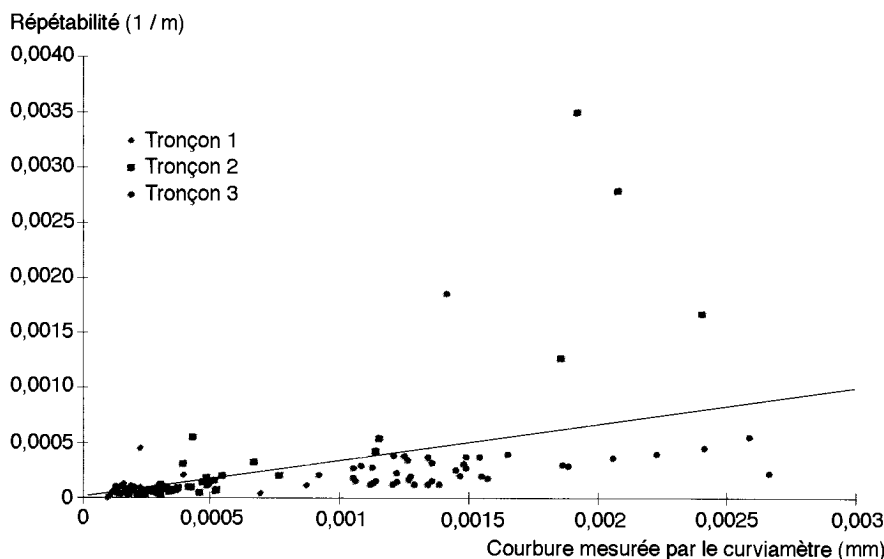


Fig. 6 -
Répétabilité des
mesures de courbure
avec la gamme
« grand gain ».

Cette répétabilité est une fonction du niveau de la mesure représentée par la droite (en trait continu dans la figure 4) :

$$r = 0,023 + 0,16 d \quad [1]$$

où r est la répétabilité et d la déflexion, en mm.

Gamme de mesure « petit gain »

La répétabilité en déflexion du curviamètre, avec cette seconde gamme de mesure, fut quantifiée sur les 123 points des sections 2, 3 et 4. Elle est présentée sur la figure 5.

Cette répétabilité est aussi une fonction du niveau de la mesure :

$$r = 0,018 + 0,18 d \quad [2]$$

où r est la répétabilité et d la déflexion, en mm.

Répétabilité en courbure

Gamme de mesure « grand gain »

La répétabilité en courbure du curviamètre, avec sa gamme de mesure « grand gain », a été évaluée sur les 123 points marqués sur des sections 1, 2 et 3 (fig. 6).

Cette répétabilité est directement proportionnelle au niveau de mesure :

$$r = 0,35 c \quad [3]$$

où r est la répétabilité et c la courbure en m^{-1} .

Gamme de mesure « petit gain »

Lorsque le curviamètre est configuré avec sa gamme de mesure « petit gain », sa répétabilité est évaluée sur les 123 points de mesures des sections 2, 3 et 4 (fig. 7).

Cette répétabilité est encore proportionnelle au niveau de la mesure :

$$r = 0,35 c \quad [4]$$

où r est la répétabilité et c le niveau de courbure en m^{-1} .

Justesse en déflexion maximale

Gamme de mesure « grand gain »

La figure 8 permet de comparer les valeurs de déflexion maximale mesurées par le curviamètre configuré avec la gamme de mesure « grand gain » et les valeurs de référence, mesurées simultanément par le capteur ancré.

Gamme de mesure « petit gain »

La figure 9 reporte les valeurs de déflexion maximale mesurées par le curviamètre avec sa gamme de mesure n° 2 par rapport aux valeurs de référence, mesurées par le capteur ancré.

Fig. 7 -
Répétabilité des
mesures en courbure
avec la gamme
« petit gain ».

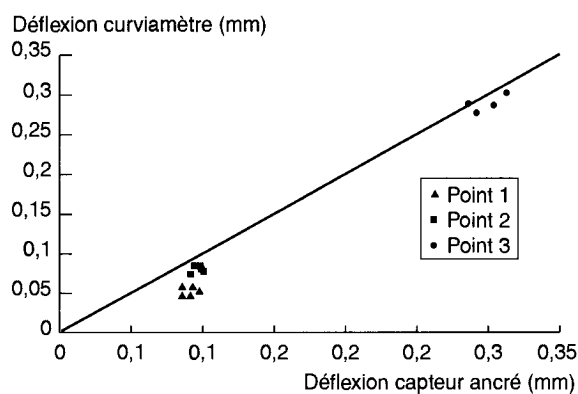
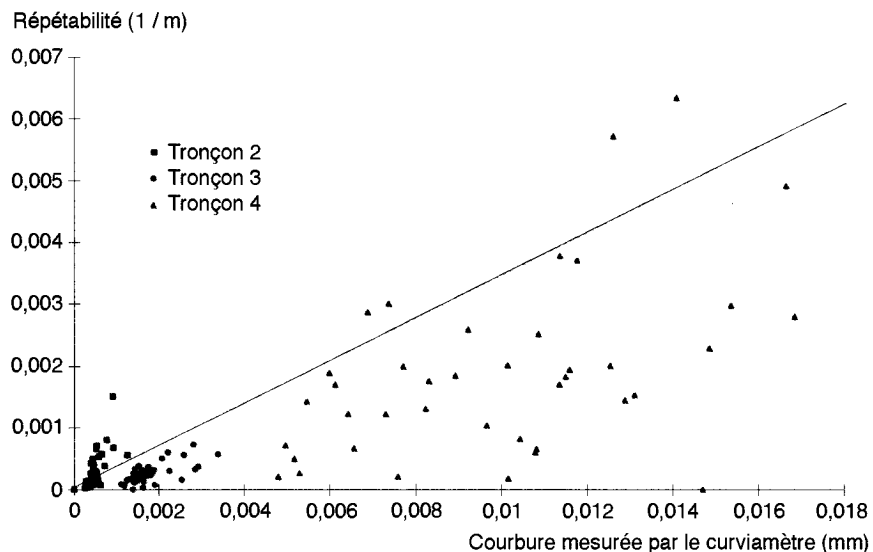


Fig. 8 - Comparaison des déflexions maximales mesurées
par le capteur ancré et le curviamètre avec la gamme
« grand gain ».

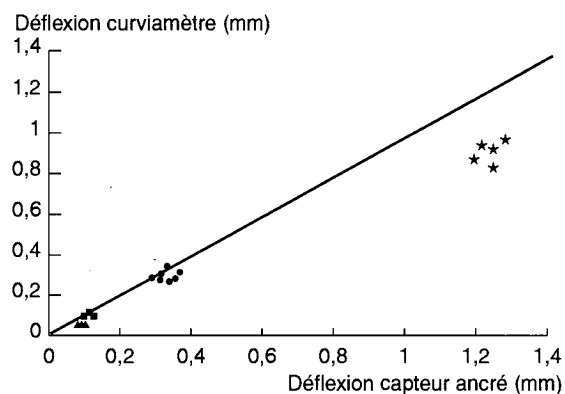


Fig. 10 - Comparaison des déflexions maximales
mesurées par le capteur ancré et par le curviamètre
(petit et grand gains).

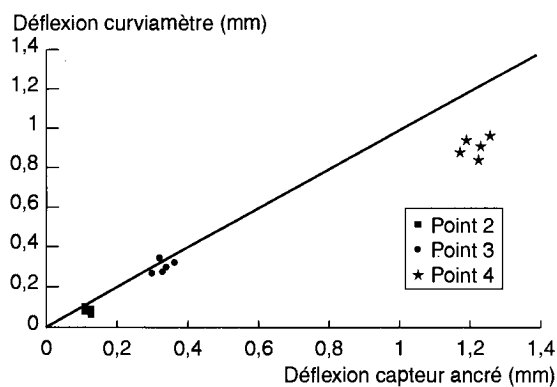


Fig. 9 - Comparaison des déflexions maximales mesurées
par le capteur ancré et par le curviamètre avec sa gamme
« petit gain ».

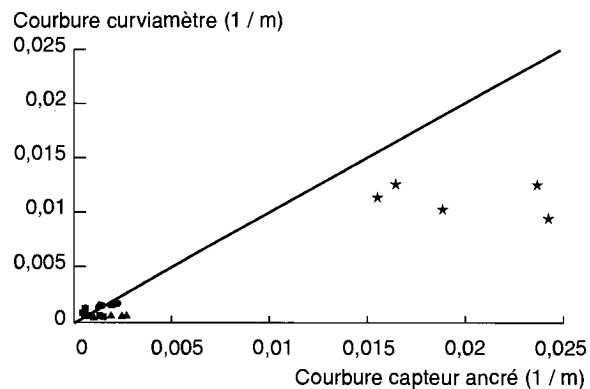


Fig. 11 - Comparaison des mesures de courbure
effectuées par le capteur ancré et par le curviamètre
(grand et petit gains).

Synthèse

Sur la figure 10, on a regroupé les résultats présentés sur les figures 8 et 9. On obtient donc une comparaison des valeurs de déflexion maximale mesurées avec le curviamètre par rapport aux références mesurées par le capteur ancré, pour les deux gammes de mesure confondues.

Sur les points tests 2 et 3, la gamme de mesure « grand gain » donne de meilleurs résultats que la gamme « petit gain », ce qui est logique compte tenu des niveaux de déflexion sur ces points. Les écarts entre mesures curviamètre et mesures de référence varient de 3 à 14 % pour la gamme « grand gain », et de 7 à 22 % pour l'autre gamme.

La justesse apparaît moins bonne sur le point test n° 1, avec la gamme « grand gain », puisque l'écart est de l'ordre de 40 %. Cette observation est toutefois à nuancer en raison du niveau très faible de la déflexion sur ce point, et de la présence probable (mais non avérée) d'une fissure transversale à proximité. La justesse est également moins bonne sur le point test n° 4 (gamme de mesure « petit gain ») puisque l'écart est de 25 %. Cet écart peut s'expliquer en partie par le fait que le capteur du curviamètre est, par construction, dans l'entraxe du jumelage, alors que la position transversale du capteur ancré est un peu plus aléatoire. Celui-ci peut se retrouver, lors de certains passages, sous une roue, où il est probable (notamment sur les chaussées très souples) que la déflexion est plus forte qu'à l'entraxe [1] et [5].

Justesse de la courbure

La figure 11 compare les valeurs de la courbure mesurées par le curviamètre à celles de référence, mesurées par le capteur ancré, en regroupant les résultats des deux gammes de mesure.

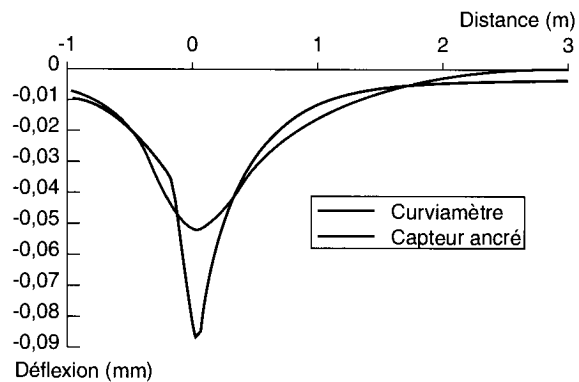
Pour ce paramètre, le curviamètre n'apparaît véritablement en accord avec la référence que sur le point test n° 3. Sur ce point, la mesure avec la gamme « grand gain » est la plus fiable.

Sur les points tests 1, 2 et 4, les mesures sont très différentes (de 40 à 75 % d'écart). L'analyse des bassins de déflexion a permis de confirmer ces écarts, et de proposer des explications partielles.

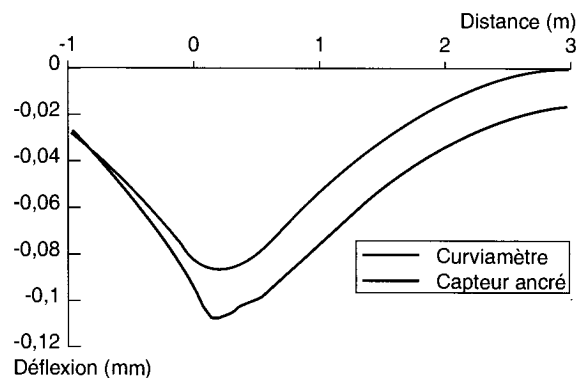
Bassin de déflexion

Les figures 12a à 12d comparent les bassins de déflexion mesurés, sur les quatre points tests, par le capteur ancré (bassin de référence) d'une part, et le curviamètre d'autre part.

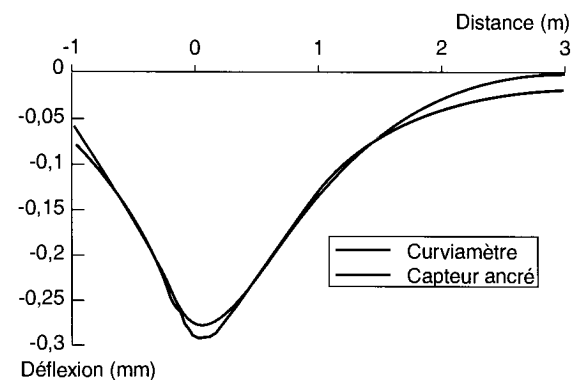
Fig. 12 - Bassin de déflexion mesuré



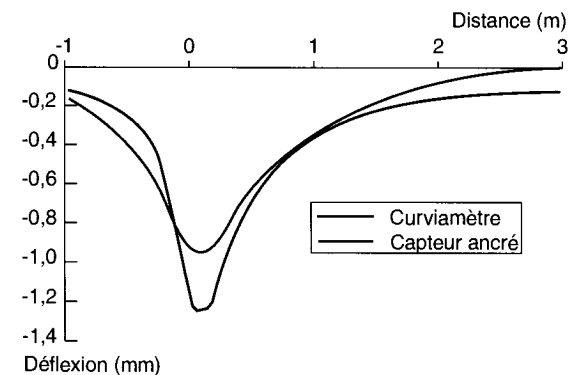
a. sur le point test 1.



b. sur le point test 2.



c. sur le point test 3.



d. sur le point test 4.

On remarque d'abord que le logiciel qui dépouille les mesures du curviamètre fait l'hypothèse que la déflexion est nulle 3 m après l'essieu. Or, la déflexion de référence mesurée par le capteur ancré n'est pas encore nulle lorsque l'essieu s'est éloigné de 3 m. Ceci a pour conséquence de réduire la déflexion mesurée par le curviamètre.

Par ailleurs, on observe que le bassin relevé par le curviamètre est souvent moins « creux » que celui mesuré par le capteur ancré. Ce phénomène peut résulter d'un filtrage du signal, ou encore du fait que le capteur ancré n'était pas rigoureusement dans l'entraxe du jumelage lors de la mesure (cf. § *Justesse en déflexion maximale*). Quoiqu'il en soit, il est clair que ce phénomène est à rapprocher des écarts sur la mesure de déflexion maximale et pour l'essentiel, de ceux sur la courbure.

Conclusions

L'opération d'évaluation du curviamètre MT 15 a permis de porter plusieurs conclusions, dont certaines concernent la métrologie de l'appareil, d'autres sa mise en œuvre.

Éléments métrologiques

La valeur moyenne de la répétabilité des mesures de déflexion maximale est fonction du niveau et de la gamme de mesure selon la relation :

$$r = \alpha d_{\max} + \beta \quad [5]$$

dans laquelle d_{\max} , et r sont en millimètres. La valeur moyenne de la répétabilité des mesures de courbure est fonction du niveau et de la gamme de mesure selon la relation :

$$r = \gamma_c \quad [6]$$

dans laquelle r et c sont en m^{-1} . Les valeurs des coefficients sont résumées dans le tableau III.

TABLEAU III
Coefficients caractéristiques de répétabilité
du curviamètre MT 15 en déflexion maximale
et en courbure

Gamme de mesure	α	β (mm)	γ
Grand gain	0,16	0,023	0,35
Petit gain	0,18	0,018	0,35

La justesse des mesures du curviamètre MT 15 est résumée dans le tableau IV qui compare, pour chaque point test, la valeur moyenne mesurée par le curviamètre d'une part, le capteur ancré d'autre part, tant en déflexion maximale qu'en courbure.

À noter que la comparaison des bassins de déflexion mesurés par le capteur ancré et par le curviamètre MT 15 montre une différence de forme entre ces bassins, notamment sur les points tests 1 et 4 pour lesquels le bassin de référence est particulièrement « creux ». La déflexion et la courbure sont alors minimisées.

TABLEAU IV
Comparaison des moyennes des valeurs mesurées en déflexion maximale
et en courbure par le capteur ancré et par le curviamètre aux différents points tests

Point test	Gamme de mesure du curviamètre	Déflexion maximale (mm)		Courbure ($10^{-3}m^{-1}$)	
		Capteur ancré	Curviamètre	Capteur ancré	Curviamètre
Point 1	Grand gain	0,0907	0,0532	1,92	0,49
Point 2	Grand gain	0,0951	0,0818	1,03	0,42
Point 2	Petit gain	0,1136	0,0882	0,92	0,52
Point 3	Grand gain	0,3015	0,2928	1,41	1,34
Point 3	Petit gain	0,3287	0,3037	1,90	1,41
Point 4	Petit gain	1,2160	0,9180	19,82	11,35

Éléments sur les conditions de mise en œuvre

Les essais ont d'abord confirmé que la vitesse de mesure du curviamètre est effectivement de 18 km/h. Le fait que cette vitesse doive être constante pendant la mesure restreint parfois les conditions d'utilisation réelles du curviamètre.

À plusieurs reprises, le système de mesure a dû être déconnecté pour effectuer le passage de virages de rayon inférieur à 40 m. La vitesse moyenne, principal avantage du curviamètre, est alors sensiblement diminuée. De plus, une certaine quantité d'informations est perdue avant, pendant et après la zone courbe.

Enfin, sur les tronçons où les mesures étaient possibles, le pourcentage de mesures invalides

varie de 7 à 24 %, ce qui est comparable à ce qui est observé sur les autres déflectomètres [4].

Conclusion générale

Les résultats obtenus lors de l'évaluation du curviamètre autorise à l'inscrire parmi les déflectomètres de classe 2 (la plus performante) sur tous les types de chaussées, au sens de la classification performancielle de la méthode LPC [2].

Ses caractéristiques pratiques en font un bon appareil pour mesurer la déformabilité de surface sur les différentes structures de chaussées dont le tracé permet de maintenir constante la vitesse de déplacement du curviamètre.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] PAQUET J. (1977), Un nouvel appareil d'auscultation des chaussées : le curviamètre, *RGRA* **530**, avril.
- [2] SIMONIN J.-M. et al., (1997), *Méthode LPC d'exécution et d'exploitation de la déformabilité de surface*, LCPC, coll. Techniques et méthodes des LPC, avril 1997.
- [3] LEPERT Ph., SIMONIN J.-M. (1997), La méthode LPC d'exécution et d'exploitation de la déformabilité de surface, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **208**, mars-avril.
- [4] SIMONIN J.-M., RIOUALL A. (1997), Qualification des déflectographes, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **208**, mars-avril.
- [5] LEROLLE Y. (1994), *Évaluation des performances du curviamètre MT 15*, Rapport interne CEBTP, décembre.

ABSTRACT

Appraisal of the MT 15 Curviameter

PH. LEPERT - G. AUSSÉDAT - J.-M. SIMONIN

During the 1970s the CEBTP developed the Curviameter, a device which measured surface deformability at a high speed (18 km/h). The CEBTP produced a new version of the device in the early 1990s, the MT 15 Curviameter. This retained the speed of the original version, but improved on its measurement capability. The Laboratoires des Ponts et Chaussées and the CEBTP have organized a joint trial in order to evaluate its performance.

The chief limitations of the device are its restricted turning radius (~ 40 m) and, in particular, the fact that the device must travel at a steady speed of 18 km/h for the results to be valid. On those road sections where measurements are possible, the percentage of invalid measurements varied between 7 and 24 % depending on the condition of the surface and the bendiness of the road, which is comparable with other deflectionometers.