

Méthode LPC d'exécution et d'exploitation de la mesure de déformabilité de surface

Philippe LEPERT
Directeur de recherche

Jean-Michel SIMONIN
Chargé de recherche

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

RÉSUMÉ

L'essai de déformabilité de surface reste un essai très pertinent pour caractériser l'état des structures de chaussée. Son intérêt a motivé bien des recherches depuis 50 ans, recherches qui ont conduit à des évolutions profondes tant des matériels que des procédures d'exécution et d'exploitation de l'essai. De ce fait, il devenait nécessaire d'actualiser et de clarifier la démarche. C'est l'objet de la méthode d'essai sur la mesure de la déformabilité de surface décrite dans cet article.

Pour adapter l'essai aux différents contextes dans lesquels il peut être mis en œuvre, six modes opératoires ont été définis. Ils précisent à la fois la procédure d'essai proprement dite et celle d'exploitation des mesures. Selon le mode opératoire, les performances minimales des déflectomètres pouvant être mis en œuvre sont précisées. Pour fixer ces performances, notamment en terme de justesse, la méthode définit un essai de référence qui permet d'accéder aux « valeurs conventionnellement vraies » des principaux paramètres de déformabilité de surface.

Cette méthode permet entre autres applications, la comparaison, sur des bases objectives, des performances des différents déflectomètres, et l'établissement de Plans d'Assurance Qualité pour les prestations d'essais routiers.

MOTS CLÉS : 22-60 - Mesure - Déformation - Surface - Méthode d'essai - Essai - Chaussée (corps de) - Auscultation - Assurance de qualité.

Introduction

Depuis une cinquantaine d'années, la mesure de la déformabilité de surface est l'essai de base pour analyser le comportement des structures de chaussées et évaluer leur capacité à supporter le trafic de poids lourds. Cet essai fut d'abord mis en œuvre ponctuellement avec des poutres Benkelman [1]. Dans les années 1960, son usage est devenu plus systématique avec l'apparition du déflectographe Lacroix [2]. Au milieu des années 1970, des méthodologies d'études d'entretien, bien adaptées au cas des chaussées souples, étaient largement appliquées, en France comme à l'étranger [3], [4]. Elles donnaient une place centrale à la mesure de la déformabilité de surface.

La situation a fortement évolué au cours des vingt dernières années. L'intérêt de l'essai et la pertinence des informations qu'il délivre ont motivé de nombreuses recherches en France et à l'étranger. Ainsi ont été mis au point de nouveaux systèmes de mesure, tel le curviamètre [5], le FWD (d'après son nom anglais *Falling Weight Deflectometer*) [6] ou l'inclinomètre, disposé manuellement sur la chaussée ou installé à l'extrémité de la poutre de mesure des déflectographes [7]. Parallèlement, l'apparition des assises traitées en forte épaisseur avec des liants hydrauliques ou bitumineux a produit des chaussées présentant de nouveaux comportements. Sur ces chaussées, les procédures traditionnelles d'exécution et d'exploitation des mesures de déformabilité de surface n'étaient plus forcément pertinentes. Il a donc fallu adapter les équipements (déflectographe Lacroix « à châssis long », par exemple [9]). De nouvelles procédures de mesure ont été définies, telles que la mesure du battement des dalles de béton, ou des bords des fissures transversales sur les chaussées semi-rigides [10].

Les procédures d'exploitation se sont aussi sophistiquées, évoluant du simple calcul de la déflexion « caractéristique » à la détermination précise de la forme du bassin de déflexion, en passant par le calcul du rayon de courbure [8].

Cette multiplication des moyens d'essais et des procédures d'exécution et d'exploitation a conduit à une situation un peu confuse. En s'enrichissant, la démarche technique a perdu en lisibilité. Selon la nature de la chaussée, selon les objectifs de l'étude, quels appareils pouvait-on mettre en œuvre, quelles procédures d'essai devait-on appliquer, quelles informations pouvait-on en déduire, et comment ? Cette situation impliquait un effort d'actualisation, d'éclaircissement. Le travail entrepris par les laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC), en 1992, débouche aujourd'hui sur une *Méthode LPC d'exécution et d'exploitation de l'essai de déformabilité de surface* [14].

Objectifs de l'actualisation de la méthode

La rédaction de la méthode d'essai répondait à deux objectifs pratiques :

- 1 prendre acte des acquis des vingt dernières années, relatifs à la mesure de déformabilité de surface ;
- 2 les organiser en un document à vocation opérationnelle, susceptible de servir de base à une « Politique Qualité » autour de cet essai.

Le premier objectif exigeait d'abord d'actualiser le vocabulaire technique relatif à l'essai. Il nécessitait ensuite un effort pour identifier les connaissances solidement établies. Il demandait enfin que le cadre conçu soit assez large pour que les diverses procédures d'essais, et que les appareils existants et reconnus, y trouvent leur place.

Le second objectif impliquait un effort rédactionnel rigoureux, produisant un document clair et complet, décrivant toutes les procédures d'essais et d'exploitation des résultats. Il supposait, en plus, qu'un souci de réalisme préside à cette rédaction.

Le groupe de travail auquel fut confiée l'actualisation de la méthode rassemblait une dizaine d'experts du réseau technique. Le document qu'il produisit fut soumis à l'ensemble des unités concernées dans les Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC). Différentes expérimentations furent organisées pour vérifier le réalisme des spécifications contenues dans la méthode. La méthode fut appliquée pour réaliser diverses opérations de qualification des deflectomètres [15], [16], [18]. Elle fut également appli-

quée à titre provisoire, en 1994 et 1995, dans le cadre de campagnes nationales de mesure sur le Réseau routier national (RRN).

Contenu de la méthode

Comme les autres méthodes d'essais LPC publiées depuis trois ans [11], [12] et [13], la méthode d'essai *Exécution et exploitation des mesures de déformabilité de surface* [14] est organisée en trois parties :

- les considérations générales ;
- les modes opératoires ;
- les annexes techniques.

Considérations générales

Nature de l'essai

L'essai vise à mesurer la forme du bassin de déflexion produit par l'application d'une charge normalisée à la surface de la chaussée. Lorsque la charge est mobile, la « déformée » de la chaussée est assimilée à la « ligne d'influence » de la charge. Fréquemment, la caractérisation de la déformation de la chaussée est réduite à la détermination de la déflexion maximale (enfonce-ment maximal du bassin de déflexion) et de la courbure (courbure du bassin au point d'enfoncement maximal).

Essai de référence

On ne peut pas définir une méthode d'essai, et encore moins l'évaluer, si l'on n'a pas, au préalable, défini rigoureusement la ou les grandeurs qu'on entend déterminer par cet essai. Toute méthode peut conduire à une valeur de déflexion (ou une forme de bassin). Ce résultat est-il juste ou non ? Est-il proche ou éloigné de la grandeur à mesurer ? Lorsque deux méthodes, ou deux deflectomètres, donnent des résultats différents, quel est le plus juste ? On ne peut répondre à ces questions qu'en ayant défini une valeur dite « conventionnellement vraie » en ce qu'elle représente, par convention, la valeur vraie. Pour ce qui concerne la déformabilité de surface, deux possibilités existaient pour définir cette référence :

- 1 définir un étalon, c'est-à-dire un ensemble de points tests sur lesquels les valeurs vraies de déflexion et de courbure auraient été fixées, par convention ;
- 2 définir une procédure d'essai conventionnel, donnant accès, en tout point d'une chaussée quelconque, aux valeurs vraies de déflexion et de courbure.

La première définition posait le problème habituel de la conservation de l'étalon. La déformabilité d'une chaussée dépend non seulement de l'état hydrique du sol support, de la température des matériaux la constituant, mais aussi de l'âge et de l'endommagement de ces matériaux. Maintenir un état mécanique parfaitement stable eût été un tour de force.

Outre qu'elle ne posait pas ce problème, la seconde solution (adoptée aujourd'hui pour la mesure des longueurs) présentait trois avantages :

- fournir les déflexions et courbures de référence en tout lieu et à tout instant ;
- couvrir à volonté tous les niveaux de mesures ;
- dans la mesure où cette définition était facile à respecter dans un modèle numérique, rendre plus rigoureux le rapprochement entre résultats d'essai et résultats de calcul, donc l'interprétation des résultats de l'essai.

C'est cette solution qui fut retenue. En pratique, la mesure **conventionnellement vraie** est effectuée avec un capteur ancré à 6 m de profondeur (fig. 1). Le chargement appliqué à la chaussée a une configuration (fig. 2) dérivée du diagramme des charges d'un poids lourd à châssis court. Ce chargement se déplace sur le point instrumenté à une vitesse de 1 m/s. Le signal délivré par le capteur ancré est enregistré sous forme numérique (fig. 3). Le calcul des deux paramètres de référence (déflexion maximale et courbure) est réalisé selon une procédure mathématique décrite dans les annexes techniques de la méthode.

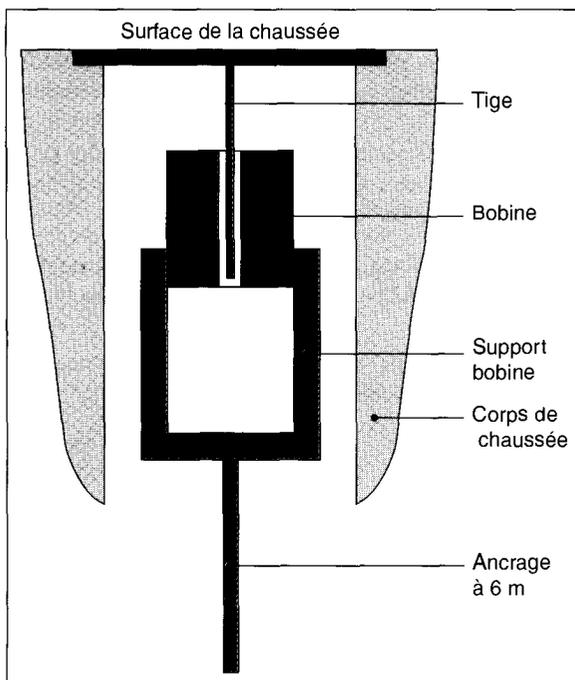


Fig. 1 - Principe de la mesure de référence.

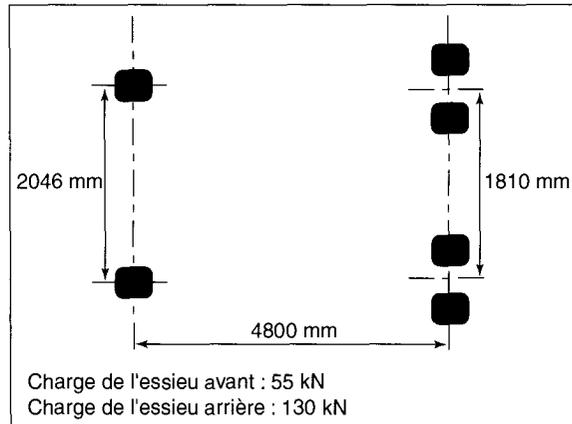


Fig. 2 - Diagramme des charges de l'essai de référence.

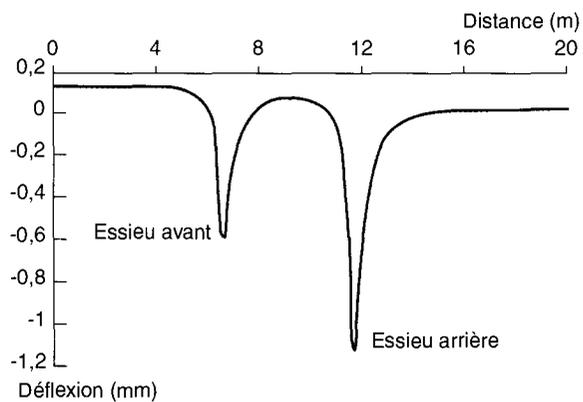


Fig. 3 - Exemple de signal acquis par le système de mesure de l'essai de référence.

TABLEAU I
Mode opératoire à retenir suivant la fonction que doit remplir la mesure et le type de chaussée sur laquelle elle s'applique

Type de chaussée \ Fonctions	Découpage en zone homogène	Calage de modèle	Caractéristiques d'une section
Souple traditionnelle	D1	D2	D3
Bitumineuse épaisse			
Inverse		D4	
Mixte			
Semi-rigide		Il n'existe pas de mode opératoire disponible	
Béton armé continu	D5		D5
Dalles béton	D5		D5

Nota : Un sixième mode opératoire d'essai a été défini pour l'écrêtage lors du contrôle de travaux.

Organisation en modes opératoires

L'exécution et l'exploitation de la mesure doivent être adaptées, d'une part, à l'objectif de la mesure (caractériser la portance d'une section prédéfinie de chaussée, découper un itinéraire en zones homogènes en structure, calculer les modules des couches de matériaux en place, etc.) et, d'autre part, au type de la chaussée (souple, semi-rigide, rigide, etc.). La méthode d'essai est donc déclinée en six modes opératoires différents, couvrant toutes les circonstances évoquées ci-dessus (tableau I).

Modes opératoires

Chaque mode opératoire précise d'abord les paramètres de déformabilité de surface qu'il permet de déterminer. Il décrit ensuite les conditions d'exécution des mesures, notamment les performances minimales des appareils à mettre en œuvre et les conditions de validité des mesures. Il indique enfin les procédures d'exploitation pour obtenir les paramètres de déformabilité.

Paramètres de déformabilité

Pour travailler à l'échelle d'un itinéraire ou d'un réseau routier, les paramètres à mesurer doivent pouvoir être acquis par des procédures simples, autorisant des cadences élevées. Ils doivent être peu nombreux, pour limiter le volume de données stockées. Sur les chaussées souples, semi-rigides ou en béton armé continu, on retient la déflexion maximale, et la courbure (mode D1 et D3), mesurées à intervalle régulier (< 10 m). Dans le même contexte, mais sur des chaussées en dalles de béton, l'importance des joints dans le fonctionnement mécanique de la chaussée impose qu'on s'intéresse de préférence à la déflexion près de ces joints. La déflexion du bord amont et du bord aval des joints et leur battement apparaissent alors comme les paramètres les plus pertinents (mode D5).

Pour faire une analyse fine du comportement d'une section de chaussée, la cadence d'acquisition et le volume des données ne constituent plus un critère. En revanche, il devient indispensable d'avoir des informations précises et détaillées. Ainsi, sur les chaussées souples, il est préférable de disposer d'une description complète du bassin de déflexion (en sept points bien choisis) pour estimer les modules des différentes couches de la chaussée (mode D2). Le comportement mécanique des chaussées semi-rigides et mixtes est beaucoup plus complexe. On ne peut le caractériser valablement qu'en mesurant la forme com-

plète du bassin de déflexion en milieu de dalles et en mesurant la déflexion maximale en bord de dalles, c'est-à-dire au niveau des fissures (mode D4). Bien entendu, dans ces deux derniers modes, les procédures de mesure sont relativement complexes.

Enfin, il est indispensable d'accompagner toutes les mesures de déformabilité, et notamment celles faites sur les chaussées présentant au moins une couche bitumineuse épaisse, par une mesure de température en surface et au sein des couches bitumineuses.

Caractéristiques minimales des appareils de mesurage

La déformabilité d'une chaussée comportant des couches traitées aux liants hydrauliques est plus faible que celle d'une chaussée bitumineuse ou à assise non traitée. Son mesurage requiert des appareils plus précis (plus juste, plus répétable) dans le premier cas que dans le second. Il était donc indispensable que la méthode spécifique, pour chaque mode opératoire, les performances minimales des déflectomètres utilisables. De fait, elle distingue deux classes d'appareils, définies chacune par les courbes enveloppant d'une part l'écart de justesse admissible, d'autre part l'écart type de répétabilité. La figure 4 présente ces courbes, fonction du niveau de mesure.

Pour appliquer un mode opératoire dans les conditions de la méthode, il faut utiliser un déflectomètre entrant dans la classe spécifiée dans ce mode opératoire. Par exemple, seul un déflectomètre de classe 2 (la plus exigeante) peut être utilisé pour appliquer le mode opératoire D4. Ceci implique que l'appareil ait fait l'objet d'une procédure pour déterminer sa classe de justesse et de répétabilité. Ceci a été fait pour tous les déflectomètres opérationnels en France (cf. § *Évaluation des déflectomètres*).

De la même façon, la méthode précise les performances des capteurs annexes (température, abs-cisse).

Conditions de validité des mesures

La méthode d'essai se doit de spécifier, par mode opératoire, quelles sont les conditions à respecter dans l'exécution de l'essai pour que ses résultats soient valides. Dans le cas de la mesure de déformabilité de surface, on sait que les phénomènes de gel, de dégel, ou de déficit hydrique correspondent à des situations très particulières et peuvent ainsi conduire à des conclusions totalement erronées. Les périodes marquées par ces phénomènes sont donc à éviter.

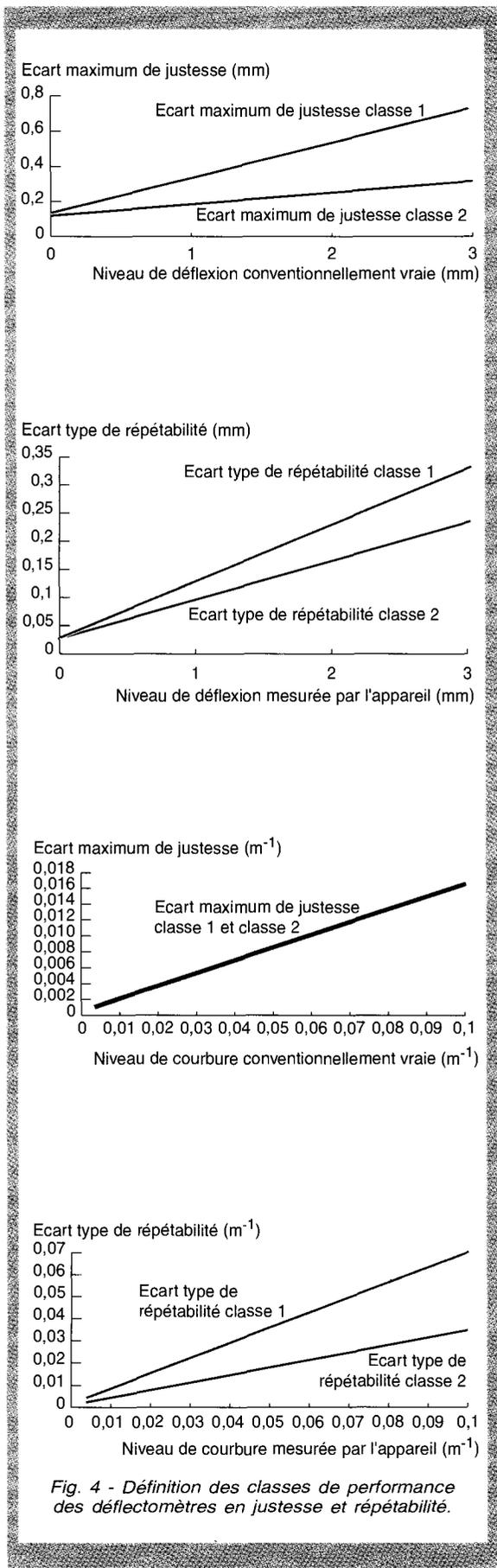


Fig. 4 - Définition des classes de performance des déflectomètres en justesse et répétabilité.

Dans certains cas, il faut invalider les mesures faites dans des conditions caractérisées par :

- une température supérieure à 35 °C à la surface de la chaussée ;
- une température supérieure à 30 °C à 15 cm de profondeur dans la chaussée ;
- un gradient thermique supérieur à 0,8 °C/cm entre 5 et 15 cm de profondeur.

Ces seuils résultent de la synthèse de trente ans d'expérience sur toute la France. Il a été vérifié qu'ils ne conduisaient pas à limiter de façon excessive les situations dans lesquelles l'essai pouvait être considéré comme valide. Dans ce but, en 1994, toutes les mesures de déformabilité réalisées sur le réseau routier national ont été accompagnées sur le relevé des températures en surface et à l'intérieur de la chaussée (à 5 et 15 cm de profondeur), dans des conditions opératoires rigoureusement précisées [17]. Le traitement de ces relevés a montré que les seuils préconisés dans la méthode conduisaient à invalider 17 % des mesures, ce qui semble un maximum tolérable.

Exploitation des mesures

Chaque mode opératoire spécifie les traitements à appliquer aux mesures brutes (résultant de l'acquisition) pour obtenir les paramètres retenus (cf. § Les paramètres de déformabilité). Il s'agit :

- du calcul des zones homogènes (D1) ;
- du calcul des modules estimés de la structure (D2, D4) ;
- du calcul des déflexions et courbures caractéristiques (D3, D4) ;
- du calcul des battements de dalles de béton (D5).

Les annexes techniques

◆ La première annexe de la méthode est un glossaire des termes techniques utilisés. La rédaction de la méthode a en effet démontré qu'au sein du groupe d'experts, certaines expressions couramment utilisées pouvaient recouvrir des notions très différentes (« déflexion caractéristique », voire n'avoir qu'un sens très vague (« zones homogènes »). Cette annexe constitue donc le premier pas vers une normalisation de la terminologie.

◆ Une autre annexe décrit précisément l'essai de référence, et notamment la procédure d'installation du capteur ancré et les procédures de calculs des mesures faites avec ce capteur pour déduire les valeurs de déflexion maximale et de courbure. C'est un texte essentiel de la méthode. Pour une bonne part, les procédures de qualification des déflectomètres qui sont rapportées dans les articles associés [15], [16], [18] se fondent sur cette annexe.

Validation et premières applications de la méthode

Évaluation des déflectomètres

Avant d'être publiée, la méthode d'essai a fait l'objet d'une validation. Dans ce but, elle a été mise en œuvre dans le cadre de plusieurs opérations de grande envergure, et notamment de l'évaluation des déflectomètres utilisés en France.

Une procédure d'évaluation a été déduite de la méthode d'essai. Elle fut appliquée en avril 1993 pour évaluer les performances du curviamètre MT 15 et du FWD Dynatest 8000 [15], [16]. La même procédure fut employée pour évaluer les performances des vingt-quatre déflectographes du réseau des LPC [18].

Application au réseau routier national

Depuis 1994, les modes opératoires D1 et D3 sont appliqués sur le réseau routier national, respectivement dans le cadre d'études particulières sur chaussées souples et semi-rigides, et pour l'évaluation de parties d'itinéraires.

Prise en compte de la méthode par les méthodologies d'études de chaussées

En l'absence de méthode d'essai définissant précisément les indicateurs de déformabilité de surface, les études :

- dans le meilleur cas, les définissaient elles-mêmes ;
- dans le pire des cas, mentionnaient un indicateur vague (par ex. : la déflexion caractéristique).

La méthode d'essai lève cette difficulté, en définissant les paramètres à retenir dans chaque cas.

La méthode de déformabilité de surface est aujourd'hui utilisée pour les entrées du système d'aide à la gestion des routes GIRR, et dans le cahier des charges des campagnes de mesure de déformabilité de surface sur le réseau routier national.

Conclusions

Trente années d'utilisation du déflectographe ont permis d'établir solidement certains éléments techniques. D'autres points restent encore à clarifier, même s'ils sont parfois intégrés dans les pratiques actuelles. Ceci explique que la méthode puisse parfois apparaître en retrait des

pratiques, notamment sur les procédures d'exploitation des mesures. Quoiqu'il en paraisse, ce travail était une étape indispensable pour faire progresser la technique, tant dans ses aspects qualité que dans la recherche.

_____ RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES _____

- [1] LACROIX J. (1963), Défectographe pour l'auscultation rapide des chaussées, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **3**, sept., pp. 191.1-191.16.
- [2] NORET H. et al. (1965), Le déflectomètre Lacroix, version 1964, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **11**, janv., pp. 1.1-1.28.
- [3] AUTRET P. (1972), Évolution du déflectographe Lacroix : pourquoi ?, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **60**, juil., pp. 11-17.
- [4] SAUTERET R., AUTRET P. (1977), *Guide d'auscultation des chaussées souples*, éd. Eyrolles, Paris.
- [5] LIAUTAUD G., BAMBA B. (1983), *Le curviamètre, un appareil fidèle d'auscultation des chaussées*, RGRA, **602**, nov., pp. 17-38.
- [6] JANSSON H. (1982), Falling Weight Deflectometer (FWD) Measurement on Gravel Roads International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfield, Trondheim, Norway, juin, pp. 65-68.
- [7] BRENGARTH M., ROCHE J.-P. (1978), Mesure du rayon de courbure des déflexions sur chaussées - utilisation d'un inclinomètre de précision, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **97**, sept., pp. 195-198.
- [8] AUTRET P. (1969), Utilisation du produit Rd pour l'auscultation des chaussées à couche de base traitée, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **42**, déc., pp. 67-80.
- [9] de BOISSOUDY A. et al. (1984), Le déflectographe 04, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **129**, janv., pp. 81-98.
- [10] CHRISTORY J.-P. (1978), Méthodologie d'auscultation des chaussées en béton, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **97**, sept., pp. 81-106.
- [11] BERTRAND L. et al. (1993), *Méthode LPC de relevé des dégradations de surface des chaussées*, LCPC, coll. Techniques et méthodes des LPC, méthode **38**, févr.
- [12] MARTIN J.-M. et al. (1995), *Méthode LPC d'ovalisation*, LCPC, coll. Techniques et méthodes des LPC, méthode **41**, juin.
- [13] LEPERT Ph. et al. (1996), *Méthode LPC d'exécution et d'exploitation de l'essai de carottage*, LCPC, coll. Techniques et méthodes des LPC, **43**, juin.

- [14] 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, **39**, avril.
- [15] LEPERT Ph., AUSSÉDAT G., SIMONIN J.-M. (1997), *Évaluation du curviamètre MT 15*, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **209**, mai-juin.
- [16] LEPERT Ph., KOBISCH R. (1996), *Le FWD : performances, utilisation en France et en Europe*, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **209**, mai-juin.
- [17] MAISONNEUVE P., LEPERT Ph. (1995), *Températures relevées pendant les mesures de déflexion IQRN 94*, rapport LCPC, août.
- [18] SIMONIN J.-M., RIOUALL A. (1997), *Évaluation des deflectographes*, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **208**, mars-avril.

ABSTRACT

LPC method to conduct and run surface deformability tests

Ph. LEPERT - J.-M. SIMONIN

Surface deformability testing remains a very important means of determining the structural condition of pavements. It has been the subject of a considerable amount of research in the last 50 years and this has led to profound changes in the procedures for conducting the test and analyzing the results. It has therefore become necessary to update and clarify the process. This is the aim of the "Surface deformability" test.

In order to adapt the test to the different circumstances in which it can be implemented, six different measurement procedures have been specified. These lay down both the test procedure proper and the method to be used to analyze the measurements. The minimum performance of the deflectographs which can be used are stated for each measurement procedure. In order to fix these levels of performance, particularly as regards accuracy, the method describes a reference test which provides "conventionally accepted values" for the main parameters of surface deformability.

Among the applications of this method are that it provides an objective means of comparing the performance of different deflectographs and also makes it possible to draw up Quality Assurance Plans for road testing services.