

Évaluation d'un prototype danois de déflectographe à grande vitesse (HSD)

Jean-Michel SIMONIN *

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Gregers HILDEBRAND

Danish Road Institute, Danemark

Denis LIÈVRE

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Les résultats de l'évaluation d'un prototype danois de déflectographe à grande vitesse (HSD : High Speed Deflectograph) sont présentés. Cet appareil mesure, à l'aide de deux vélocimètres laser, la vitesse de déformation verticale de la chaussée au passage d'un poids lourd intégré au trafic. Une étude numérique effectuée avec le logiciel Alizé montre qu'une relation existe entre la pente déduite des mesures du HSD et la déflexion maximale mesurée par les appareils traditionnels. Cette relation dépend de la plate-forme de la chaussée. Sur différentes sections tests variables en structures et en longueurs, la pente du bassin de déflexion a été estimée par le HSD. La répétabilité de l'appareil a été estimée et les résultats obtenus ont été comparés à ceux des appareils de référence (FWD et déflectographe Flash). Il est montré que le HSD réalise des mesures répétibles et qu'il est apte à détecter des différences significatives de niveau de déflexion.

DOMAINE : Route.

ABSTRACT

EVALUATION OF A DANISH PROTOTYPE FOR A HIGH-SPEED DEFLECTOGRAPH (HSD)

The results from an evaluation of a Danish High-Speed Deflectograph (HSD) prototype are presented herein. This device serves to measure, thanks to two laser velocimeters, the vertical deformation velocity of pavement when traversed by a truck traveling in regular traffic flow. A numerical study, using the Alizé software, reveals the presence of a relationship between the slope deduced from HSD measurements and the maximum deflection measured by means of conventional instruments ; this relationship depends on the pavement platform. On test sections varying in both structure and length, the slope of the deflection basin has been estimated using the HSD device. The repeatability of HSD application has been assessed and results were compared with those from reference tools (FWD and Flash deflectograph). Findings demonstrate that HSD yields repeatable measurements and is indeed able to detect major differences in deflection level.

FIELD: Roads

INTRODUCTION

L'évaluation de la durabilité structurelle d'une chaussée nécessite l'estimation de sa capacité de portance ; la mesure de déformation sous une charge lourde, généralement appelée déflexion, en est l'indicateur principal [1]. Les appareils actuellement opérationnels ne réalisent cette mesure qu'à faible vitesse, ce qui pose des problèmes de sécurité importants qui en limitent l'usage. Pour remédier à ce problème, l'Institut danois des Routes (DRI) développe, en partenariat avec l'entreprise danoise Greenwood Engineering A/S, un prototype dénommé HSD (High Speed Deflectograph : déflectographe à grande vitesse) dont l'objectif est d'effectuer des mesures de déformation sous charge à une vitesse voisine de celle du trafic.

Le LCPC et le DRI ont évalué les performances de ce prototype dans le cadre du projet européen FORMAT (Fully Optimized Road MAInTenance). Les résultats des essais effectués dans la région lilloise en septembre 2003 sont présentés ici.

* Centre de Nantes du LCPC, Route de Bouaye, BP 4129, 44341 Bouguenais cedex, e-mail : jean-michel.simonin@lcpc.fr

DESCRIPTION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU HSD

Sur les quatre projets d'appareils de mesure de déflexion à grande vitesse actuellement en cours de développement, trois reposent sur le principe de la comparaison de deux profils, en long ou en travers [2-8]. Le premier profil doit être hors de l'influence de la charge, le second sous l'influence d'une charge mesurée. Par différence, on obtient un profil de déflexion. Ces concepts butent sur deux difficultés majeures :

- la capacité de réalisation des deux mesures sur le même profil ;
- l'étendue de la zone d'influence des charges, qui conduit à des appareils difficilement opérationnels car de trop grandes dimensions.

Pour contourner ces difficultés, le prototype danois vise à mesurer la vitesse instantanée de déformation verticale de la chaussée à différentes distances de la charge, puis à intégrer cette courbe de vitesse pour obtenir une courbe de déflexion [9-12]. La vitesse de déformation verticale est mesurée par plusieurs capteurs laser à effet Doppler, appelés aussi vélocimètres, montés sur une poutre de mesure (Fig. 1) placée dans l'axe de roulement d'un jumelage supportant la charge. Le principe de fonctionnement repose sur les mesures synchrones effectuées par sept capteurs. Par intégration, le bassin de déflexion est calculé en faisant l'hypothèse d'une déflexion nulle à 4,20 mètres.

Le prototype évalué est constitué d'un véhicule tracteur et d'une remorque. Celle-ci porte la charge appliquée à la chaussée, le système de mesure et l'équipement informatique. La console de commande est située dans la cabine du tracteur. Pour des raisons de coût, le prototype, qui vise à valider le concept de mesure, ne comprend que deux vélocimètres. Ces capteurs, situés à 0,30 et 4,18 m devant l'essieu de la remorque dans l'axe du jumelage droit, sont légèrement inclinés pour tenir compte de la vitesse d'avance du véhicule. Cette dernière, ainsi que le roulis et le tangage du véhicule et de la poutre de mesure, influencent la mesure des capteurs à effet Doppler. Pour corriger ces influences, le système est complété par :

- une centrale gyroscopique couplée à trois accéléromètres fixés sur la poutre ;
- un accéléromètre sur chaque vélocimètre ;
- un accéléromètre sur les masses pour estimer la charge appliquée et ses variations ;
- deux capteurs laser pour mesurer et asservir la hauteur de la poutre de mesure par rapport à la surface de la chaussée et permettre ainsi une bonne focalisation des capteurs à effet Doppler ;
- une roue codeuse permettant d'estimer finement la vitesse d'avance du véhicule.

□ **Figure 1**

Vue de la poutre de mesure du HSD équipée des différents capteurs et de la roue codeuse pour la mesure de distance.



PRINCIPE DE L'ÉVALUATION

L'évaluation du HSD a pour objectif d'étudier les performances de l'appareil dans deux contextes différents :

- relevé de l'état structurel de la chaussée sur des **itinéraires** relativement longs en effectuant deux ou trois passages sur chaque itinéraire. Il s'agit de mieux appréhender le fonctionnement global de l'appareil sur site et de comparer ses résultats avec ceux de l'appareil habituellement utilisé par le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (déflectographe Flash) ;

➤ relevé de l'état structurel de la chaussée sur des **sections** courtes (environ 2 km). Sur chaque section courte, le HSD doit effectuer cinq à dix passages à vitesse normale (70 km/h) et, si possible, trois passages à vitesse réduite (40 à 50 km/h). L'objectif est d'évaluer la répétabilité de l'appareil et l'influence de divers facteurs (vitesse du véhicule, conditions météorologiques) et, également, de comparer ses résultats avec ceux du FWD (Falling Weight Deflectometer : déflectomètre à masse tombante) et du déflectographe Flash.

L'évaluation se déroule sur trois itinéraires représentatifs de différents types de chaussées des réseaux routiers français. Les sections courtes sont incluses dans les itinéraires.

Le HSD doit délivrer, tous les 10 m, des valeurs de mesure comprenant au moins l'abscisse, la vitesse de déformation de la chaussée et l'accélération de la charge appliquée.

Sur les itinéraires, la comparaison des résultats obtenus à partir des mesures du HSD avec ceux issus des mesures du déflectographe Flash [13] doit permettre de vérifier la sensibilité du HSD à détecter des variations de niveau de portance et, notamment, de localiser des zones homogènes.

L'analyse des résultats sur les sections courtes consiste à calculer la répétabilité du HSD et à comparer les valeurs moyennes des résultats obtenus avec les valeurs relevées par le FWD [14] et le déflectographe Flash.

DÉROULEMENT DES ESSAIS

Les trois itinéraires sélectionnés pour l'évaluation se trouvent dans le département du Nord :

- ❶ l'itinéraire 1 (11,5 km) se situe sur l'autoroute A16 près de Dunkerque ; sa structure est semi-rigide (GH) ;
- ❷ l'itinéraire 2 (15 km) est localisé près de Cambrai sur la route nationale RN 43 et se compose de tronçons rectilignes séparés par des traversées d'agglomérations, dont certaines avec des virages à faible rayon ; sa structure est semi-rigide (GH) ;
- ❸ l'itinéraire 3 (8 km), qui traverse plusieurs villages, correspond à un tronçon de la route départementale RD 942 près de Cambrai. Il comporte une structure semi-rigide sur deux kilomètres puis bitumineuse souple.

Avant de réaliser la campagne de mesures avec le HSD, il a été nécessaire de :

- monter les capteurs vélocimétriques et régler leur orientation ;
- mesurer sans charge une section rigide (supposée indéformable) pour estimer la différence d'orientation relative des capteurs Doppler (calibrage).

Ces opérations nécessitent environ une demi-journée. Le tableau I récapitule les relevés effectués. Les conditions météorologiques n'ont pas permis de mener tous les essais initialement prévus. Cependant, les essais réalisés ont été jugés suffisants. D'un point de vue pratique, ils ont montré que :

- le prototype fonctionne jusqu'à des vitesses d'environ 70 km/h et s'insère bien dans le trafic ;
- il circule sur tous les types de routes, comme n'importe quel ensemble tracteur plus remorque, avec les problèmes liés à son encombrement en cas de virages serrés ;
- les capteurs laser, notamment les vélocimètres, sont sensibles à la température, à la pluie et au vent.

TABLEAU I
Récapitulatif des relevés effectués avec le HSD du 25 septembre au 1^{er} octobre 2003

Date	Route	Type de relevé	PR début	PR fin	Nombre de passages	Commentaire
25/09/03	A16	Section courte	127 + 000	125 + 000	8	Vitesse : 60-70 km/h
26/09/03	A16 G	Itinéraire sens moins	134 + 000	128 + 000	1	Vitesse normale
30/09/03	RN 43	Section courte	28 + 400	30 + 800	9	3 passages à 40 km/h, les autres à 70 km/h
30/09/03	RD 942	Section courte	24 + 000	26 + 000	6	3 passages à 40 km/h, 3 passages à 50 km/h
01/10/03	RD 942	Itinéraire sens plus	21 + 000	29 + 000	1	Temps couvert, venteux et pluvieux ; vitesse ≤ 40 km/h

MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT DE L'APPAREIL

Le prototype HSD mesure la pente du bassin de déflexion, paramètre qui n'est généralement pas délivré par les appareils opérationnels de mesure de déformabilité de surface. Ces derniers délivrent des déflexions maximales ou des rayons de courbure qui sont liés aux caractéristiques structurelles de la chaussée. Diverses études ont montré l'existence de relations entre la déflexion maximale (d) et le rayon de courbure (R) [15-17]. Elles ont également montré que ces relations, comme le produit Rd , étaient dépendantes du type de structure auscultée. L'objectif de la modélisation présentée ici est de définir dans quelle mesure les paramètres pente et déflexion maximale sont comparables. Pour cela, le principe de mesure du HSD a été simulé et la pente simulée comparée à la déflexion maximale calculée.

Modélisation du bassin de déflexion

Pour simuler le principe de mesure du HSD, il a été considéré dans la modélisation que :

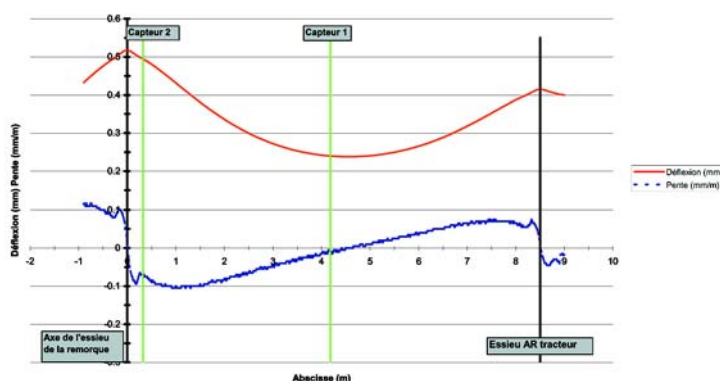
- les vitesses mesurées sont verticales ;
- les mesures sont corrigées des mouvements du véhicule porteur ;
- la chaussée est homogène ;
- le comportement de la chaussée est de type élastique linéaire.

Dans ces conditions, les vitesses mesurées peuvent être considérées comme proportionnelles à la pente du bassin de déflexion. Ce dernier est identique à celui résultant de l'application d'une charge statique de même répartition. Une simulation avec le logiciel Alizé a permis de simuler la mesure sur 86 structures issues du catalogue des structures types de chaussées neuves [18]. La déflexion a été calculée tous les 2 cm sur 10 m le long du profil de mesure. Les charges des dix roues du HSD (remorque et véhicule tracteur) ont été considérées.

La figure 2 donne les résultats obtenus pour une chaussée bitumineuse épaisse (référence catalogue VRS 1, 2 fois 14 cm de grave-bitume). L'axe longitudinal est en abscisse ; l'axe des ordonnées donne la déflexion (mm) ou la pente (mm/m). L'axe de l'essieu de la remorque est situé à l'abscisse nulle ; celui du jumelage arrière du véhicule tracteur est à l'abscisse 8,5 m. La position de l'essieu avant n'est pas représentée. La position des capteurs est indiquée par des traits verticaux verts. La courbe rouge présente la déflexion calculée par Alizé ; la courbe bleue indique la pente déduite de la courbe précédente. Sur cette figure, on peut observer que :

- la ligne d'influence de déflexion est maximale à l'abscisse 0 (essieu de la remorque) ;
- cette ligne est minimale au voisinage du capteur 1 ; cette valeur minimale, de presque 50 % de la valeur maximale, n'est néanmoins pas négligeable ;
- la pente au niveau du capteur 1 est quasi nulle ;
- des phénomènes locaux liés aux bords des charges (uniformément réparties) apparaissent ; ils sont plus accentués sur la courbe des pentes ;
- la valeur calculée au niveau du capteur 2, situé au voisinage des charges, ne semble pas perturbée par ces phénomènes locaux ;
- la pente au niveau du capteur 2 est significativement différente de 0.

Figure 2
Ligne d'influence et pente du bassin de déflexion calculée sous les charges du HSD pour une chaussée bitumineuse épaisse.



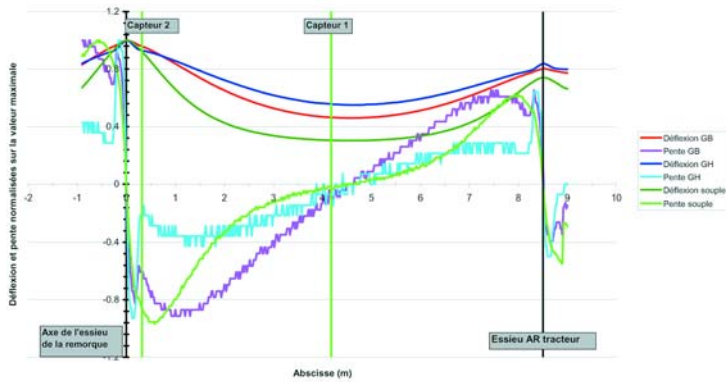


Figure 3
 Comparaison de la ligne d'influence et de la pente du bassin de déflexion normalisée calculée sous les charges du HSD pour trois types de chaussées différentes.

La figure 3 présente des résultats normalisés sur la valeur maximale pour trois structures différentes :

- une chaussée bitumineuse (notée GB) de déflexion maximale 0,52 mm ;
- une chaussée hydraulique (notée GH) de déflexion maximale 0,19 mm ;
- une chaussée souple (notée souple) de déflexion maximale 0,75 mm.

Les observations précédentes restent valables ; on notera cependant que la déflexion minimale représente entre 30 et 55 % de la déflexion maximale, ce qui n'est pas négligeable.

Comparaison entre la déflexion maximale et la différence de pente

Le HSD corrige la vitesse mesurée au niveau du capteur 2 en lui soustrayant la valeur mesurée au niveau du capteur 1. Les valeurs de la déflexion maximale et la différence de pente entre les capteurs 2 et 1 ont été calculées pour les 86 structures sélectionnées, permettant ainsi de définir 86 couples de résultats. La figure 4 présente l'ensemble de ces couples avec en abscisse la déflexion maximale et en ordonnée la différence de pente. On observe que les points se répartissent en trois fuseaux correspondant aux trois types de plate-forme du modèle de structure (PF 2 = 50 MPa ; PF 3 = 120 MPa ; PF 4 = 200 MPa).

Pour un ensemble de points issus d'une même plate-forme, une différence de déflexion significative se traduit par une variation significative de la différence de pente. Dans sa réalisation avec deux capteurs, le HSD apparaît donc déjà comme un outil capable de distinguer des variations de portance le long d'un itinéraire homogène en plate-forme. La recherche d'informations plus complètes sur la capacité de portance nécessite, comme le prévoit le projet danois, d'ajouter d'autres vélocimètres à l'appareil. En l'état actuel, le HSD doit être capable de localiser, **sur des itinéraires homogènes en plate-forme**, des variations de niveau de portance comme le réalisent les appareils actuels (déflectographe Flash ou FWD).

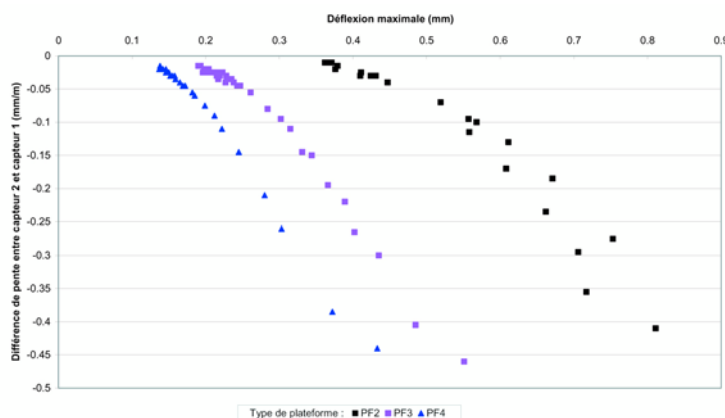


Figure 4
 Différence de pente entre les capteurs 2 et 1 en fonction de la déflexion maximale sous les charges du HSD pour différents types de plate-formes.

RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION

Les résultats des mesures du HSD ont été transmis sous forme de paramètres indexés sur le pas de temps de l'acquisition (1 ms), sans aucune agrégation. Ils comprennent notamment la pente du bassin de déflexion déduite des vitesses de déformation mesurées et de la vitesse d'avance du véhicule. Ces résultats ont été agrégés par zones de 10 m. Ces valeurs de pente moyennées par 10 m sont exploitées et présentées ci-après.

Schémas itinéraires

La figure 5 montre un exemple de comparaison des mesures du HSD avec celles du déflectographe Flash sur l'itinéraire de la RD 942 (un seul passage de chaque appareil en sens plus). Lors des mesures, les conditions de relevé ne semblaient pas très favorables (temps couvert, venteux et pluvieux). Toutefois, cet itinéraire est celui sur lequel les niveaux mesurés de déflexion présentent la plus grande amplitude de variation. On constate une bonne correspondance entre les deux signaux et, notamment, la localisation d'une zone rigide de part et d'autre de l'abscisse 23 000 mètres.

La figure 6 présente tous les relevés du HSD effectués à 70 km/h sur la section courte de la RN 43. La moyenne et l'écart type ont aussi été représentés. On observe un écart type significativement plus faible que la moyenne, ce qui laisse présager d'une bonne répétabilité.

Remarque : parmi l'ensemble des valeurs par zones de dix mètres sur les sections courtes, quatre valeurs visiblement aberrantes, soit 1 % du total, ont été invalidées.

Figure 5
Mesures HSD et Flash sur l'itinéraire de la route RD 942.

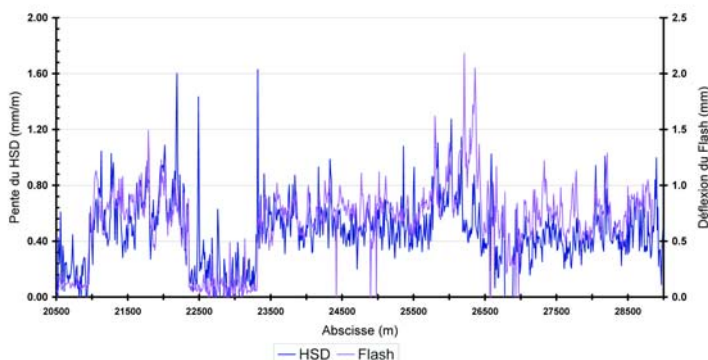
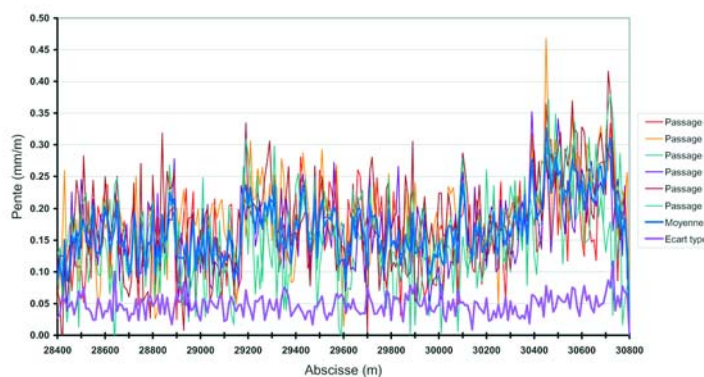


Figure 6
Pente de la tangente au bassin de déflexion au niveau du capteur 2, issue des mesures du HSD sur la section courte de la RN 43 (PR 28 + 400 à 30 + 800) à 70 km/h.



Répétabilité

La répétabilité r d'un paramètre du HSD pour une zone élémentaire est donnée par la relation $r = 2,83 \times \sigma$ étant la valeur de l'écart type pour un niveau de mesure m égal à la moyenne des résultats. La figure 7 présente la répétabilité du HSD avec en abscisse le niveau de mesure et en ordonnée la répétabilité. La droite d'équation $y = 0,17x + 0,3$ correspond à une limite au-dessous de laquelle se trouvent 95 % des mesures, quel que soit le niveau moyen mesuré (compris entre 0,08 et 1,23 mm/m). Les mesures du HSD peuvent être considérées comme répétables notamment pour des niveaux de mesure élevés.

En l'absence de dispositif de référence tel qu'un capteur ancré, la justesse est appréciée par la comparaison des mesures du HSD avec celles du déflectographe Flash et du FWD. Ces appareils avaient eux-mêmes été qualifiés par comparaison avec des capteurs ancrés [13, 14]. La figure 8 présente les mesures de déflexion en rive du Flash et du FWD et la pente moyenne par zone calculée pour le HSD sur les trois sections courtes juxtaposées (A16-RN 43-RD 942). Ces trois sections, représentatives de trois structures différentes, sont classées, de la gauche vers la droite, de la plus rigide vers la plus souple (du niveau de déflexion le plus faible au niveau le plus élevé).

Pour le FWD et le déflectographe Flash, la moyenne des niveaux de mesure correspondant à chaque section croît avec la souplesse ; pour la pente mesurée par le HSD, le niveau moyen diminue légèrement de la première section à la deuxième et augmente très nettement de la deuxième à la troisième. Visuellement, les niveaux de pente mesurée par le HSD sont distincts sur les trois sections tests et permettent de détecter les différences de niveaux de déflexion.

Les structures des sections de l'A16 et de la RN 43 sont voisines (GH dans les deux cas). Les niveaux de déflexion sont proches, mais les mesures de déflexion sont plus bruitées sur la RN 43. La différence de niveaux de mesure du HSD est inversée par rapport à celles observées pour le FWD et le déflectomètre Flash. Cela peut s'expliquer par une différence de nature de la plate-forme, comme cela a été montré lors de la modélisation de la mesure. Ainsi, la figure 4 montre qu'un niveau de pente de 0,2 mm/m peut conduire à des niveaux de déflexion maximale variant entre 0,28 mm pour une plate-forme de type 2 et 0,65 mm pour une plate-forme de type 4. Réciproquement, un niveau de déflexion de 0,2 mm peut conduire à des niveaux de pente significativement différents (0,025 mm/m pour une PF3 contre 0,15 mm/m pour une PF2).

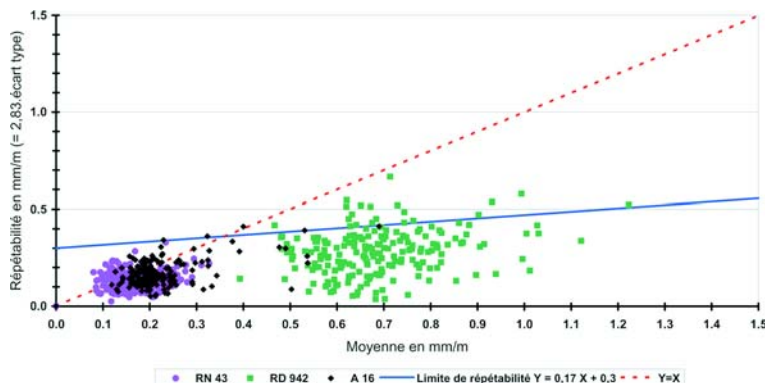


Figure 7
Répétabilité ($2,83\sigma$) du HSD pour la pente sur les trois sections tests.

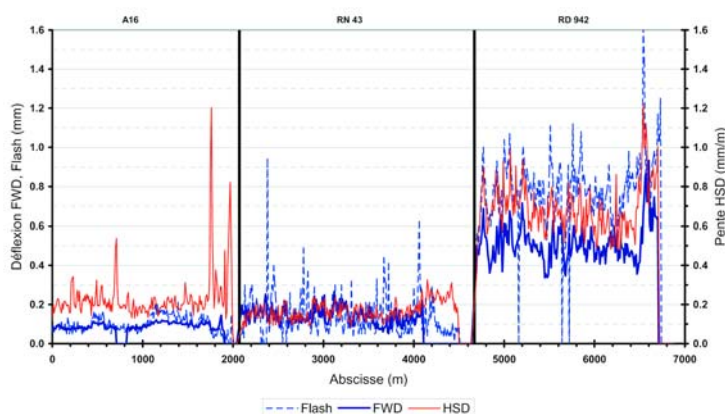
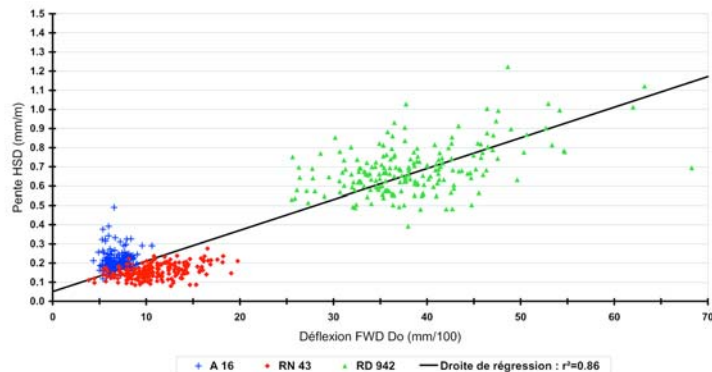


Figure 8
Déflexion du FWD et du déflectographe Flash ; pente de la tangente du HSD sur les trois sections tests.

Comparaison des mesures du HSD avec celles du FWD

La figure 9 compare les déflexions mesurées par le FWD aux valeurs de pente relevées par le HSD. Les couples de valeurs obtenues sur les différentes sections sont représentés par des symboles différents. Une régression linéaire calculée à partir de l'ensemble de ces couples conduit à une bonne corrélation ($r^2 = 0,86$). Cependant, on observe que l'ensemble des couples issus des mesures sur l'autoroute est situé au-dessus de la droite de régression. *A contrario*, les couples issus des mesures sur la route nationale sont généralement situés sous la droite. Cela peut provenir de la différence de sol support qui, comme l'indiquait l'étude numérique, influence la relation entre la déflexion maximale et la pente. Il en découle qu'il ne faut pas utiliser cette droite de régression pour convertir les mesures de pente en valeurs de déflexion maximale.

□ **Figure 9**
Pente du HSD en fonction de la déflexion maximale du FWD.



CONCLUSIONS

Fondé sur la mesure de la vitesse de déformation verticale de la chaussée, le principe de mesure de l'appareil développe une idée originale qui semble prometteuse. L'interprétation des mesures reste toutefois à poursuivre, notamment en affinant la forme du bassin de déflexion pour mieux définir la zone d'influence des charges. La distance à laquelle la déflexion est considérée comme négligeable (nulle) reste primordiale pour intégrer la courbe de vitesse en courbe de déflexion directement utilisable.

Le premier prototype montre un potentiel important. Son fonctionnement est répétable et sensible à des variations de niveau de mesure. Sur un itinéraire homogène en plate-forme, ses variations de niveau de mesure de pente sont corrélées avec les variations de niveau de mesure de déflexion maximale des appareils utilisés actuellement. Enfin, il circule aisément sur tous les types de réseaux en s'intégrant au trafic.

Une seconde version du prototype, en cours de construction, intègre une poutre climatisée pour limiter l'influence des conditions climatiques sur la réponse des capteurs. Il comprend également quatre vélocimètres, ce qui permet de proposer d'autres voies d'interprétation.

Cette nouvelle version devrait confirmer tout le potentiel de ce principe de mesure. Avant d'envisager son évaluation, il sera nécessaire de compléter les études numériques préalables pour optimiser l'interprétation de la mesure et définir les informations utilisables dans les systèmes actuels de gestion et d'entretien des routes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Robert Bonte qui a coordonné avec André Muchembled et son équipe l'action des différentes personnes sur le terrain. Ils remercient également les agents des administrations routières (Conseil général du Nord, Direction régionale de l'Équipement et Direction départementale de l'Équipement du Nord, Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lille) qui ont permis la réussite de cette expérimentation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LCPC, *Méthode LPC d'exécution et d'exploitation de la déformabilité de surface*, coll. Techniques et méthodes des LPC, **39**, avril **1997**.
- [2] GROGG G., HALL J.W., Measuring Pavement Deflection at 55 MPH, *Public Road*, **4**, vol. 67, January February **2004**, <http://www.tfhr.gov/pubrds/04jan/04.htm>.
- [3] JOHNSON R.F., RISH J.W., *Rolling Weight Deflectometer with Thermal and Vibrational Bending Compensation*, TRR 1540, **1996**.
- [4] HALL J., BOTELHO F., *Rolling Wheel Deflectometer, Status of research and development*, FWD user Mailing n° **498**, November **1999**, <http://www.co-tracker.com/FWD/frames.htm>.
- [5] BRIGGS R.C., JOHNSON R.F., STUBSTAD R.N., PIERCE L., A comparison of the Rolling Weight Deflectometer with the Falling Weight Deflectometer, Non-destructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, *ASTM conference*, Seattle, **1999**.
- [6] PETER A., High-speed rolling deflectometer data evaluation, Non-destructive Evaluation of Aging Aircraft, *Airports and Aerospace Hardware III*, vol. 3586, pp. 137-147, SPIE – The International Society for Optical Engineering, **1999**.
- [7] LENNGREN C.A., Rolling Deflectometer meter data strategy dos and don'ts, *5th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields*, June **1998**, vol. I, pp. 233-243.
- [8] ARNBERG P. HOLEN Å., MAGNUSSON G., The high-speed road deflection tester, Heavy vehicles and roads, *Third symposium on heavy vehicle weights and dimensions*, **1992**, Cebon & Mitchell, pp. 176-181.
- [9] HILDEBRAND G., RASMUSSEN S., ANDRÈS R., Development of a laser-Based High Speed Deflectograph, Non destructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, *ASTM conference*, Seattle, **1999**.
- [10] HILDEBRAND G., RASMUSSEN S., *Development of a High Speed Deflectograph*, Danish Road Institute, Report 117, Road Directorate – Ministry of Transport, Danemark, **2002**, <http://www.vejdirektoratet.dk>.
- [11] RASMUSSEN S., KRARUP J.A., HILDEBRAND G., Non-contact Deflection Measurement at High Speed, *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, **2002**, Balkema, pp. 53-60.
- [12] <http://www.greenwood.dk/about.asp>
- [13] VIALLETTEL H., SIMONIN J-M., Le déflectographe Flash, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **208**, mars-avril **1997**, pp. 49-52.
- [14] LEPERT PH., SIMONIN J-M., KÖBISCH R., Le FWD : Performances, utilisation en France et en Europe, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **209**, mai-juin **1997**, pp 19-28.
- [15] AUTRET P., Utilisation du produit Rd pour l'auscultation des chaussées à couches de base traitée, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **42**, **1969**, pp 67-80.
- [16] MARTINEZ J., JOUVE P., Rational Determination of Pavements Deflection from Lacroix Deflectograph Measurements, European Symposium on flexible Pavements, *EUROFLEX*, Lisbon, 20-22 September **1993**, pp. 5/51-5/60.
- [17] KEYMANESH R., *Contribution à l'étude de la déflexion des structures de chaussées*, Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 12 juillet **2001**.
- [18] LCPC-SETRA, Catalogue des structures types de chaussées neuves, LCPC-SETRA, Édition **1998**.

