



**HAL**  
open science

# Développement d'une méthode optique pour évaluer la déformation sous contrainte dynamique d'une chaussée

Valérie Muzet, Christophe Heinkele, Jean Michel Simonin

## ► To cite this version:

Valérie Muzet, Christophe Heinkele, Jean Michel Simonin. Développement d'une méthode optique pour évaluer la déformation sous contrainte dynamique d'une chaussée. Congrès Français de Mécanique (CFM 2011), Aug 2011, Besançon, France. 6p. hal-00906239

**HAL Id: hal-00906239**

**<https://hal.science/hal-00906239v1>**

Submitted on 30 Jan 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Développement d'une méthode optique pour évaluer la déformation sous contrainte dynamique d'une chaussée

V. MUZET<sup>a</sup>, C. HEINKELE<sup>a</sup>, J-M SIMONIN<sup>b</sup>

a. Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg / CETE de l'EST, ERA 27 « Imagerie – Méthodes Optiques » associée à l'IFSTTAR, 11 rue Jean Mentelin, 67035 Strasbourg

b. Université Nantes, Angers, le-Mans - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), route de Bouaye CS4 44344 BOUGUENAI

## Résumé :

*La structure d'une chaussée est constituée d'une superposition de couches dont il est nécessaire de connaître les épaisseurs et les rigidités. La mesure de déflexion est la méthode de base pour évaluer la rigidité. Actuellement cette mesure s'effectue de façon discontinue à faible vitesse. Cette pratique est insuffisante sur les routes les plus modernes et constitue un danger pour les usagers du réseau routier. On présente ici un projet de développement d'appareil pouvant pallier ces deux inconvénients majeurs, ainsi que les premiers résultats de faisabilité.*

## Abstract :

*The structure of a roadway consists in a superposition of layers whose thickness and rigidity are necessary to be known. The deflection measurement is the basic method to evaluate rigidity. Currently this measurement is performed at low speed in a discontinuous way. This practice is unsatisfactory for the most modern roads and constitutes a danger for roads' users. We present the development projet of an equipment which would overcome these two drawbacks, and then the first results of its feasibility.*

**Mots clefs :** lumière structurée, déflexion, ondelette, CND

## 1 Contexte

### 1.1 Durabilité structurelle des chaussées

Une chaussée est une structure multi-couche qui se fatigue sous l'action du trafic des poids lourds. On estime sa durabilité structurelle résiduelle par un ensemble de données comme les dégradations apparaissant en surface, les différentes couches en place (épaisseur, type et caractéristiques des matériaux, interface), le trafic passé et futur. Des essais destructifs ou non peuvent compléter ces données. La mesure du bassin de déflexion sous l'action d'une charge quasi statique représente un essai non destructif de base pour estimer l'état des matériaux en place. Cependant, les appareils existants effectuent une mesure discontinue à vitesse lente réduisant ainsi son usage dans les systèmes de gestion des réseaux routiers.

### 1.2 Mesure de la déflexion

Actuellement, la déflexion est mesurée par des systèmes en contact avec la chaussée. On distingue les appareils à masse tombante ou FWD (Falling Weight deflectometer) [1] qui s'arrêtent pour réaliser une mesure et les appareils qui circulent à faible vitesse : deflectographes (4 ou 8 km/h) [2] et curviamètre (18 km/h) [3]. Les FWD réalisent une série de mesures en un point fixe en laissant tomber une masse simulant le passage d'un poids lourd. La durée d'immobilisation de l'appareil en un point de mesure atteint plusieurs minutes selon le nombre de chocs que l'on applique à la chaussée. La distance entre 2 mesures est choisie par l'opérateur et varie de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres selon les pratiques. Les appareils à charge roulante visent à minimiser la gêne à l'utilisateur tout en assurant un meilleur rendement. Pour cela, l'appareil automatise la pose et reprise du système de mesure qui réagit à l'avancement de la charge lorsque lui-même est en position fixe à la surface de la chaussée. Pour des raisons technologiques, l'intervalle entre deux mesures est de 4, 5 ou 10m selon les appareils et la vitesse d'avance est réduite.

### 1.3 Le besoin d'une nouvelle méthode

La faible vitesse d'avance des véhicules de mesure représente une gêne à l'utilisateur, mais également un risque pour sa sécurité et celle des opérateurs. De plus, l'intervalle entre 2 mesures (plusieurs mètres) ne permet pas de détecter des variations locales de l'état de la structure de chaussée. Cette mesure discontinue n'est pas pertinente pour détecter la présence de défauts localisés (fissuration, défaut d'interface). Enfin, le coût élevé de cette mesure conduit à une réduction de son usage actuel.

Depuis plusieurs années, divers projets ont été conduits aux Etats-Unis et en Europe du Nord [4] pour répondre à ces problèmes. Ils se sont orientés vers l'utilisation de techniques de mesure sans contact à base de laser ponctuel qui sont perturbés par la rugosité de la chaussée par exemple [1].

Nous avons voulu nous orienter vers des techniques alternatives de mesure sans contact à faible coût qui permettent une mesure plein champ de la déformation de surface de la chaussée. Les techniques d'imagerie répondent à ces contraintes. Pour choisir la bonne technique, des études préliminaires sur les variations du bassin de déflexion en présence de défauts locaux ont permis de définir les exigences en terme de sensibilité de la mesure. L'ensemble des considérations a conduit à choisir la technique de lumière structurée qui doit permettre d'atteindre les performances métrologiques dans les conditions exigeantes de mise en œuvre sous trafic à un coût raisonnable.

L'utilisation d'une mesure plein champ permettra également d'envisager d'autres analyses de la mesure comme l'exploitation des dérivées premières ou seconde qui peuvent s'avérer plus sensibles à la présence de certains défauts [5 & 6].

## 2 Principe de mesure

### 2.1 Principe de la lumière structurée

La technique de la lumière structurée est une méthode basée sur la triangulation qui consiste à projeter un motif (ligne, grille, franges) sur un objet. Cet objet est observé avec une caméra dont la direction d'observation fait un angle avec la direction de projection. Dans ces conditions d'éclairage et d'observation, la déformation du motif projeté est liée à la forme de l'objet (cf. Figure 1).

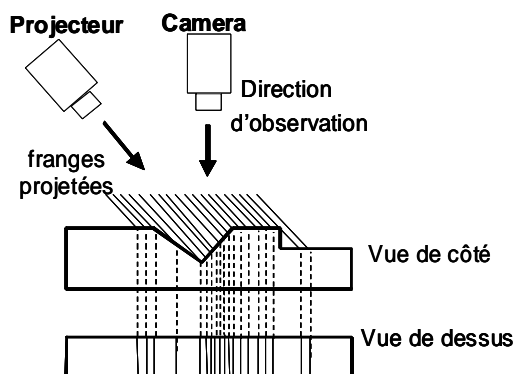


Fig. 1 – Schémas présentant le principe de la méthode de projection de frange.

La méthode fonctionne par comparaison de 2 images, avant et après déformation. Si nous nous plaçons dans le cas de déformation de surfaces, il est important de noter que la grandeur pertinente n'est pas la position en elle-même des franges projetées, mais la façon dont elles s'écartent ou se rapprochent. C'est donc la variation géométrique du motif qui est à analyser.

### 2.2 Application à la mesure de déflexion

Comme nous cherchons à mesurer l'influence d'une charge sur la chaussée (cf. Figure 2) : on projette un motif composé de franges parallèles orientées perpendiculairement à l'axe charge-captteur. Nous privilégions ainsi un axe de déformation dans l'image par rapport à l'autre.

Deux images de la même surface sont prises successivement. La première en dehors de la zone d'influence de la charge et la deuxième le plus près possible de cette dernière (cf. Figure 2). La comparaison de ces deux images permet d'évaluer la déflexion de la chaussée au passage de la charge.

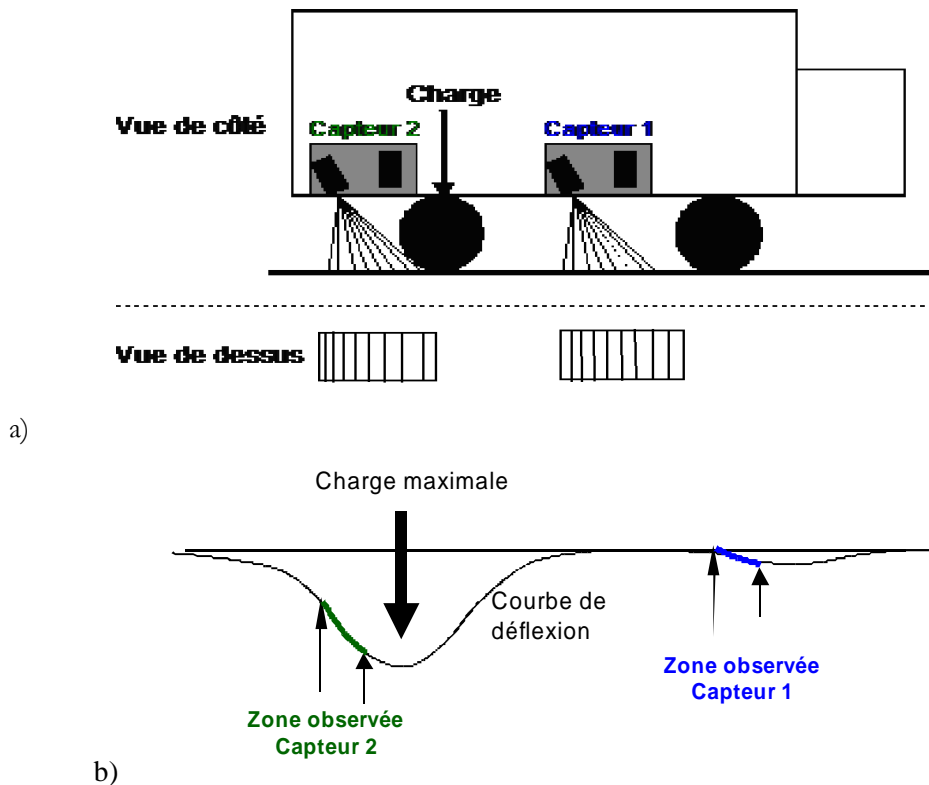


FIG. 2 – a) Principe d'implantation sur un poids lourd, b) Représentation des zones observées par les capteurs 1 et 2.

### 2.3 La transformation en ondelettes

Dans une application en dynamique, il est indispensable de mettre en œuvre une méthode ne nécessitant qu'une image par état de déformation. La méthode classique consiste à filtrer dans l'espace de Fourier les fréquences spatiales autour de la fréquence du réseau projeté sur l'objet [7]. Cependant, cette fréquence spatiale des franges projetées est amenée à varier avec la déformation de la surface. Afin de tenir compte de cette variation, la méthode que nous avons implémentée [8] utilise une transformée en ondelettes [9] ce qui permet d'extraire les informations importantes du signal tout en s'adaptant à sa fréquence apparente.

Si on se place sur une ligne d'une image, la modification des distances entre deux points  $x$  et  $x + \delta x$  peut être rapporté à la variation du profil de la surface, noté  $\Phi$ , comme la valeur d'une hauteur  $\delta z$ . On a donc :

$$\delta z = \Phi(x + \delta x) - \Phi(x) \approx \Phi'(x) \delta x \quad (1)$$

La détermination de  $\Phi'(x)$  est réalisée par une transformation en ondelettes qui consiste en une décomposition temporelle d'un signal par une fonction analysante, l'ondelette, que l'on translate et que l'on dilate. Afin de réaliser cette décomposition, il faut choisir une ondelette. Pour notre application, nous utilisons l'ondelette de Morlet selon un axe (celui perpendiculaire aux franges) et une gaussienne selon l'autre axe (cf. FIG. 3a et b).

Le principe de la transformée en ondelette est d'appliquer cette ondelette à toute l'image en la déplaçant, en la dilatant. Ainsi chaque analyse en ondelettes d'une ligne produit une image dont il est nécessaire d'extraire l'information qui nous intéresse. La méthode d'extraction consiste à localiser le maximum du module de la transformée du signal sur les échelles en tout point de la ligne (cf. FIG. 3c). Le vecteur des fréquences associées à ces maxima représente la fréquence instantanée (locales) des franges projetées sur la surface.. On calcule l'argument correspondant (appelé aussi phase) du signal par la formule :

$$\phi = \arctan\left(\frac{\text{imag}(Wf)}{\text{réelle}(Wf)}\right), \quad (2)$$

avec  $Wf$  la transformée en ondelette du signal aux fréquences instantanées.

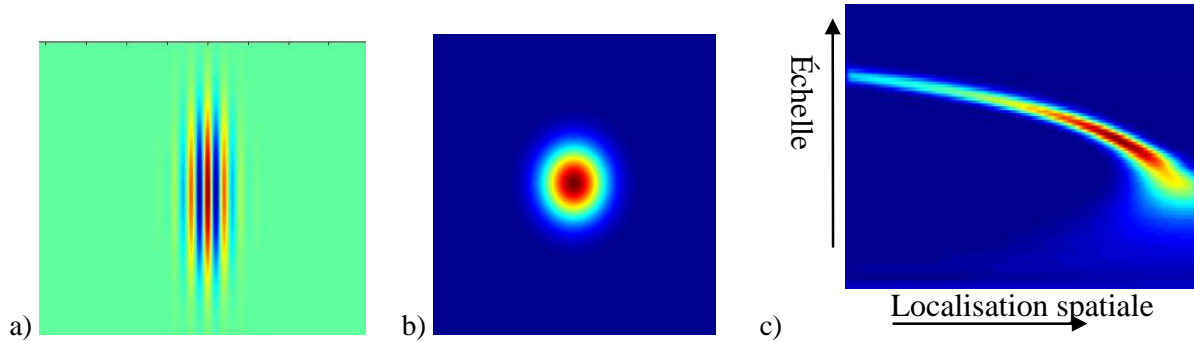


FIG. 3 – Représentation temporelle du module de l'ondelette utilisée (a), représentation spectrale (b), et module de la transformée en ondelette d'une ligne de l'image (aussi appelé scalogramme) (c).

L'hypothèse principale dans cette analyse est la continuité de la surface (même en présence de défauts). L'analyse en ondelettes est pertinente sur ce point dans le sens où elle opère une analyse locale extrêmement précise en chaque point d'une ligne de l'image. Ainsi la donnée du profil  $\Phi$  étant modulé par une série de franges, l'ensemble des points de la ligne est utilisé pour trouver  $\Phi$ , ce qui explique la précision escomptée d'une telle analyse d'image (800 lignes, 1350 pixels par ligne).

## 2.4 Etalonnage de la mesure

Pour remonter à la physique, il est nécessaire d'étalonner par rapport à une série de surfaces planes de référence en chaque pixel de l'image afin de déterminer une relation entre  $\Delta z(x)$  et  $\Delta\Phi(x)$ . Un calibrage rigoureux est nécessaire. Il donnera les correspondances où  $N_i$  et  $N_j$  sont les positions en pixel dans le plan du capteur CCD de la caméra et  $(X,Y,Z)$  les coordonnées du point à mesurer en unité métrique.

## 3 Expérimentations

### 3.1 Etude de sensibilité en laboratoire

Une étude en laboratoire, réalisée en imposant des déplacements connus à une surface plane, a montré que l'erreur entre le déplacement obtenu avec notre méthode et celui imposé était toujours inférieur à  $20\mu\text{m}$ , et ce, sur une amplitude de 4 cm [6].

L'influence sur les capteurs optiques des différents mouvements du porteur lors de sa circulation, c'est-à-dire le tangage, le roulis et le lacet, doit être connue. Pour ce faire, des études de sensibilité ont été effectuées en statique en laboratoire à la fois en translation et en rotation. Ces expérimentations ont montré que le système de mesure mis en œuvre est sensible aux déplacements selon l'axe Z (i.e. la déflexion) avec une résolution de  $5\mu\text{m}$ . Par contre, les translations latérales d'une surface plane ne sont pas détectées. Pour les rotations de type tangage et roulis, la sensibilité est de  $3.10^{-4}$  rad soit  $0.015^\circ$ . Afin de bien prendre en compte ces phénomènes qui se combineront à la déflexion sur le porteur, il est nécessaire de les mesurer puis de les corriger. Des centrales inertielles seront installées sur les deux capteurs optiques. Elles permettront de mesurer les rotations et les translations et ainsi de corriger ces mouvements parasites.

### 3.2 Expérimentation sur un manège de fatigue des structures

Une expérimentation a été effectuée sur le manège de fatigue des structures de l'IFSTTAR à Nantes (cf. figure 4 à gauche). Ce manège est un dispositif permettant de générer en accéléré un trafic de poids lourds et ainsi d'étudier expérimentalement l'évolution des structures soumises à un trafic.

Le capteur était placé sur une potence avec un bras de 2,5m afin d'avoir une fixation indépendante de la zone d'influence de la charge. Le capteur optique utilisé est présenté au centre de la figure 4. Un exemple d'image enregistré par la caméra sur lequel on peut voir le réseau projeté sur la chaussée est présenté figure 4 à droite.

Une image de référence a été enregistrée dans un état non chargé. La taille des images était de  $20 \times 27 \text{cm}^2$  et la forme du bassin de déflexion a été étudiée entre 60 et 90cm de la charge maximale. Les images ont été enregistrées à 10Hz avec une vitesse d'avancement du manège de 4.3km/h. Pour chaque acquisition, le déplacement de la zone observée est comparé à l'image de référence et le déplacement moyen est calculé.

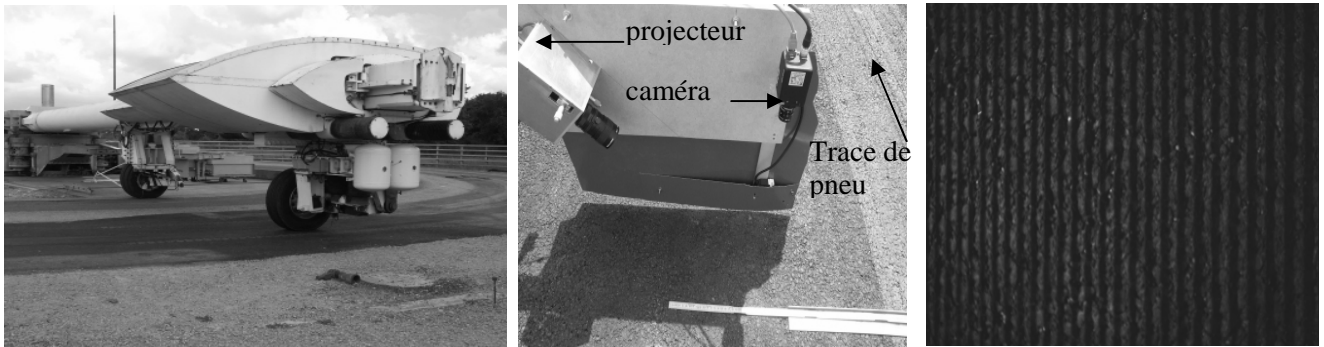


FIG. 4 – gauche : photographie du manège de fatigue des structures de l’IFSTTAR à Nantes, centre : photographie du capteur optique, droite : exemple d’image obtenue.

Une carte de déplacement correspondant à la déflexion maximale (lorsque la roue chargée est au plus près du capteur) est représentée sur la droite de la figure 5. La forme des résultats obtenus peut sembler surprenante mais est due au positionnement de la zone observée qui est à plus de 60 cm de la charge (cf. figure 2b). Une mesure ponctuelle a été effectuée à 65cm de l’axe de la roue avec une poutre Benkelman. La mesure obtenue (120µm) est en accord avec nos résultats.

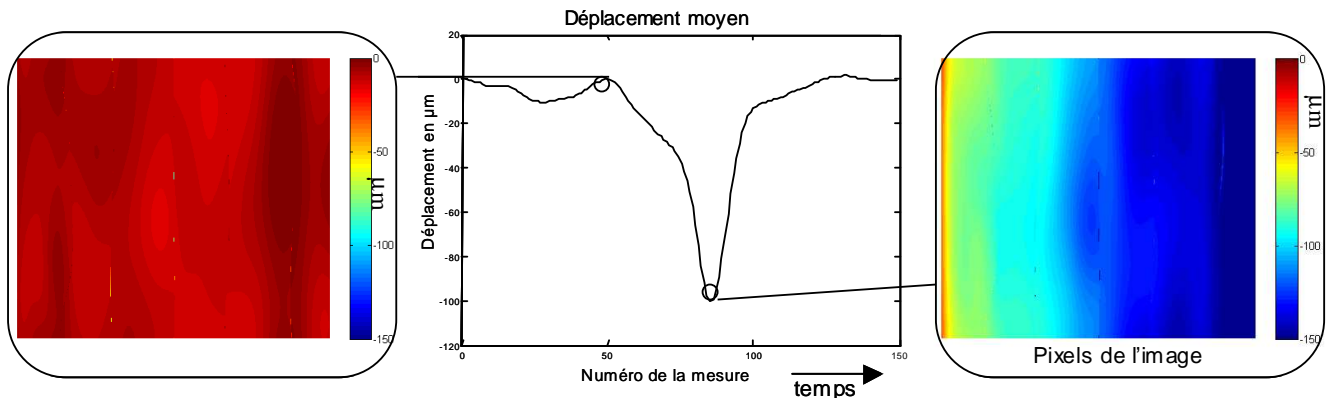


FIG. 5 – Centre : Déplacement moyen en µm correspondant au passage d’un bras du manège. A gauche : carte de déplacement avant l’application de la charge, à droite : carte de déplacement correspondant à l’enfoncement maximal. L’échelle en couleur représente la déflexion en µm. La charge est appliquée sur le coté droit des images.

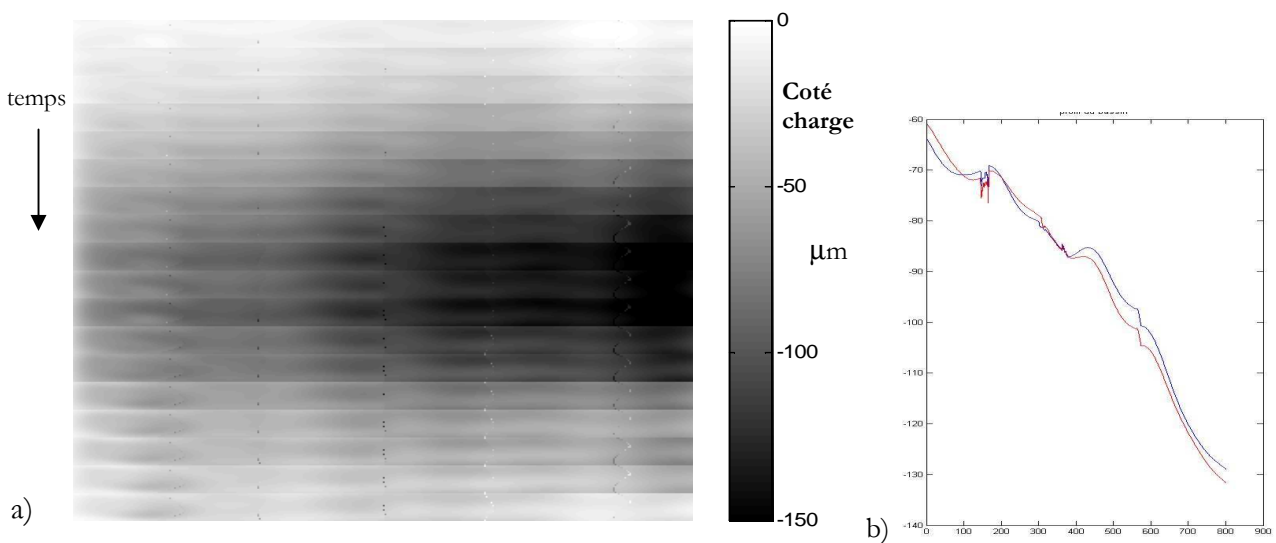


FIG. 6 – a) Évolution des cartes de déplacements obtenus par le traitement des images successives au cours du temps lors du passage de la charge (caméra n°1). Les niveaux de gris représentent l’enfoncement : maximum en noir et minimal en blanc. b) Profils de déplacement maximal pour deux passages de la charge (passage 1 en bleu et passage 2 en rouge).

Cette expérience a montré la capacité des capteurs à mesurer la déflexion moyenne (cf. Figure 5 centre) et par zone, la forme des bassins transversaux et longitudinaux (cf. Figure 6a).

Les reproductibilités spatiales et temporelles ont été mises en évidence lors des différentes expérimentations sur le manège (cf. Figure 6b). Ces reproductibilités sont très importantes dans le cadre de la mesure de déflexion. Ainsi, lors de l'auscultation d'un itinéraire homogène en structure, les variations de niveau de mesure permettront d'identifier les zones de portance les plus faibles.

#### 4. Conclusions et perspectives

La déflexion est une mesure de base pour estimer la durabilité des structures de chaussées. Les appareils actuels effectuent une mesure discontinue à faible vitesse, ce qui pose des problèmes de sécurité et de rentabilité. Nous avons proposé une méthode de mesure alternative basée sur la lumière structurée. Cette méthode de projection de franges est une méthode optique sans contact et plein champ qui permet une approche en continu du bassin de déflexion. La faisabilité de cette méthode a été démontrée en statique, d'abord en laboratoire puis, sur site réel.

La sensibilité de la méthode à la mesure de pentes et de déplacements a été étudiée sur une amplitude de déplacement importante. L'expérimentation sur le manège de fatigue des structures a montré la pertinence de cette méthode pour mesurer le bassin de déflexion. Les images de déflexion recueillies permettent d'en déduire les pentes ou le rayon de courbure qui sont des paramètres plus sensibles à la présence de certains défauts [5,6].

Afin de réaliser une expérimentation en dynamique, une maquette a été conçue et réalisée par le CECP (Centre d'Etudes et de Construction de Prototype) d'Angers. Cette maquette permettra de limiter les mouvements et vibrations des capteurs optiques dues au porteur. Elle est équipée de 2 systèmes optiques auxquels sont associés un ensemble de capteur inertiel et accéléromètres. Ces capteurs doivent permettre de mesurer et corriger les mouvements parasites créés lors d'expérimentation en dynamique. Une première série d'expérimentations est prévue en 2011 sur le manège de fatigue des structures de l'IFSTTAR.

Ces expérimentations permettront de valider en dynamique le concept de mesure envisagé, mais aussi d'optimiser le positionnement du système dans le mode embarqué par rapport à la charge lourde. Des études complémentaires pourront ensuite être engagées sur les différentes phases d'exploitation des images comme le traitement des images, l'optimisation du temps de calcul, la définition de paramètres sensibles à l'endommagement des chaussées, l'extraction de ces paramètres à partir des images, enfin leur intégration dans les systèmes de gestion des routes.

#### References

- [1] Lepert Ph, Simonin J-M, Kobisch, Le FWD : performances, utilisation en France et en Europe, Bulletin de Liaison des Laboratoires des ponts et Chaussées n°209, Mai 1997, pp 19-28
- [2] Simonin J-M, Riouall A, Evaluation des deflectographes, Bulletin de Liaison des Laboratoires des ponts et Chaussées n°208, Avril 1997, pp 39-47
- [3] Lepert Ph, Aussedat G, Simonin J-M, Evaluation du curviamètre MT 15, Bulletin de Liaison des Laboratoires des ponts et Chaussées n°209, Mai 1997, pp 3-11
- [4] Simonin J.-M., Rasmussen S. & Hildebrand H., Assessment of the Danish High Speed Deflectograph in France, Proc. 7th international conference on the bearing capacity of roads, railways and airfields, Trondheim Norway, 10, June 2005.
- [5] Savuth, C., Contribution à l'auscultation structurelle des chaussées mixtes : détection des défauts d'interface à l'aide de la déflexion, Thèse de doctorat, INSA de Rennes, France, 2007.
- [6] J.M. Simonin, L-M. Cottineau, V. Muzet, C. Heinkele & Y. Guillard, "Deflection measurement: the need of a continuous and full view approach", BC2RA 09 : Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Champaign USA, 29/06/09-02/07/09.
- [7] Takeda, M. & Mutoh, K., Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes, Applied optic, 22 (24), 3977-3982, 1983.
- [8] Malek, M., Muzet, V. & Guillard, Y., Utilisation de la transformation en Ondelettes pour la mesure de déplacements par projection de lumière structurée. Communication aux Journées Scientifiques de l'Ingénieur, Marne la Vallée, 5-6 dec 2006.
- [9] Dursun, A., Ozder, S. & Ecevit, F.N., Continuous wavelet transform analysis of projected fringe Patterns, Measurement Science and Technology, 15, 1768-1772, 2004.