



HAL
open science

Application de la shearographie à la détection de fissures sur ouvrages d'art

Valérie Muzet, Pascal Blain, Yannick Guillard

► **To cite this version:**

Valérie Muzet, Pascal Blain, Yannick Guillard. Application de la shearographie à la détection de fissures sur ouvrages d'art. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2008, 273, pp 81-91. hal-00376801

HAL Id: hal-00376801

<https://hal.science/hal-00376801>

Submitted on 20 Apr 2009

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.

Application de la *shearographie* à la détection de fissures sur ouvrages d'art

Valérie MUZET*

Pascal BLAIN

Yannick GUILLARD

LRPC de Strasbourg, CETE de l'Est
Équipe de Recherche Associée au LCPC n°27
Imagerie-Méthodes Optiques

■ RÉSUMÉ

Afin d'optimiser la gestion des infrastructures et des ouvrages d'art existants en vue de prolonger leur durée de vie, il est nécessaire de connaître leur état et de détecter leurs défauts. Les méthodes optiques sont des moyens de contrôle et de mesure non destructifs. La shearographie, aussi appelée interférométrie de speckle à dédoublement latéral ou interférométrie différentielle, est particulièrement adaptée à la détection de défauts grâce à sa capacité à visualiser préférentiellement les zones de concentration de contraintes et à sa robustesse. Nous présentons ici une étude expérimentale visant à évaluer les potentialités de son utilisation pour la détection de fissures sur des ouvrages d'art en béton. Cette étude a montré que la shearographie permet de détecter des fissures mécaniquement actives, y compris dans le cas où elles ne sont pas débouchantes. Cette technique s'avère bien adaptée à une utilisation opérationnelle et permet de détecter des fissures sur des ouvrages d'art sollicités par le trafic.

Application of *shearography* to crack detection on civil engineering structures

■ ABSTRACT

In an effort to optimize the management of existing infrastructure and civil engineering facilities for the purpose of extending structural life cycle, it is now necessary to know their state of repair and detect their flaws. Optical methods constitute a non-destructive means of control and measurement. The method of shearography, also called speckle pattern shearing interferometry or differential interferometry, is especially well adapted to detecting defects thanks to both its capacity to distinctly visualize stress concentration zones and its robustness. We will be presenting in this article an experimental study aimed at evaluating the potential advantages associated with use of this method for detecting cracks on concrete structures. Our study has demonstrated that shearography serves to detect mechanically-active cracks, even when they are not through-cracks. This technique proves well suited to operational implementation and enables detecting cracks on structures subjected to traffic loading.

* AUTEUR À CONTACTER :

Valérie MUZET

valerie.muzet@developpement-durable.gouv.fr

INTRODUCTION

Dans les ouvrages d'art, les fissures sont un signe de fragilisation de la structure. Leur détection et leur caractérisation préventives permettent de réduire les coûts ultérieurs d'intervention. L'introduction d'armatures métalliques au sein du matériau permet de reprendre les efforts de traction et a pour but d'éviter sa fissuration en maintenant le béton dans sa zone de fonctionnement en compression. Les méthodes traditionnelles de détection de dégradations, fondées sur l'emploi de jauges de déformation et d'extensomètres, satisfont aux exigences requises pour des mesures ponctuelles, mais ne donnent que partiellement accès à un champ de déplacement. Les auscultations

visuelles nécessitent d'être en contact avec l'ouvrage, ce qui soulève le problème de la sécurité de l'opérateur. Il est souvent difficile de distinguer visuellement ou au toucher les défauts actifs d'origine mécanique, seuls dangereux pour les structures, des défauts passifs. L'intérêt des méthodes optiques est qu'elles sont non destructives, ne nécessitent pas l'intervention humaine au plus près de l'ouvrage et offrent une visualisation globale du champ de déformation.

Lorsqu'une structure en béton est stimulée, une fissure se manifeste au travers des discontinuités qu'elle crée sur le réseau de franges obtenu par interférométrie optique. Compte tenu de la sensibilité des méthodes optiques, le phénomène peut apparaître pour des ouvertures de fissures très inférieures à 0,1 mm. Des études de faisabilité ont montré la pertinence de l'utilisation de différentes techniques interférométriques (holographie, holographie digitale et *shearographie*) pour la détection de fissures sur des ouvrages d'art [1-7]. La shearographie, aussi appelée interférométrie différentielle ou interférométrie de *speckle* à décalage, est une méthode à chemins optiques quasi confondus. Elle possède de ce fait de nombreux avantages si on la compare à l'holographie : une sensibilité à la dérivée de la déformation qui permet une visualisation directe des zones de fortes contraintes, une certaine tolérance aux mouvements d'ensemble de la structure inspectée, une sensibilité ajustable en fonction de l'amplitude du décalage appliqué, enfin une robustesse aux perturbations [8].

Après un rappel du principe de la shearographie et une présentation du matériel mis en œuvre, nous décrivons dans cet article l'application de cette technique à la détection de fissures sur des structures en béton réalisée en laboratoire sur des éprouvettes et *in situ* sur un ouvrage supportant un trafic automobile.

PRINCIPE DE L'INTERFÉROMÉTRIE DIFFÉRENTIELLE DE SPECKLE OU SHEAROGRAPHIE

■ Principe de l'interférométrie de speckle [7-9]

Le speckle (ou grain de lumière), également dénommé tavelure, est un phénomène d'apparence aléatoire résultant de l'éclairement d'une surface optiquement rugueuse par une lumière cohérente¹. Lorsqu'on réalise des interférences avec deux ondes dont l'une au moins contient du speckle, on parle d'interférométrie de speckle. En holographie digitale, une onde, contenant du speckle car réfléchi par l'objet, interfère avec une onde plane de référence et l'étape de reconstruction 3D de l'onde objet, analogique par diffraction numérique, est évitée. La plaque photographique de l'holographie classique est remplacée dans ce cas par une caméra CCD.

Lors de l'étude d'une déformation ou sollicitation, deux états sont comparés, l'état initial de l'objet et l'état sollicité [5]. La première image d'interférence caractérise l'objet dans son état initial. L'intensité enregistrée sur chaque pixel s'écrit :

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) \cdot (1 + m(x, y) \cdot \cos \varphi(x, y)) \quad (1)$$

I_0 représentant l'éclairement moyen, m la modulation des franges aussi appelée contraste, φ étant un terme de phase aléatoire entre l'onde objet et l'onde de référence.

Pour simplifier les notations, les coordonnées (x, y) seront omises dans la suite du document.

Si l'on suppose que la déformation subie par l'objet est suffisamment légère pour que la figure de speckle se déplace sans être modifiée, la nouvelle image d'éclairement I_2 correspondant à l'état sollicité s'écrit pour chaque pixel :

$$I_2 = I_0 \cdot (1 + m \cdot \cos(\varphi + \Delta)) \quad (2)$$

¹ Un faisceau laser est dit cohérent spatialement et temporellement. La cohérence spatiale du faisceau signifie que deux points de la section sont capables de fournir une figure d'interférence de contraste élevé. La cohérence temporelle exprime la durée du train d'ondes.

Δ représentant la différence de phase entre les deux états.

Comme la valeur du terme de phase φ est aléatoire, la soustraction des deux images ainsi obtenues génère des pseudo-franges représentatives de la déformation de la surface :

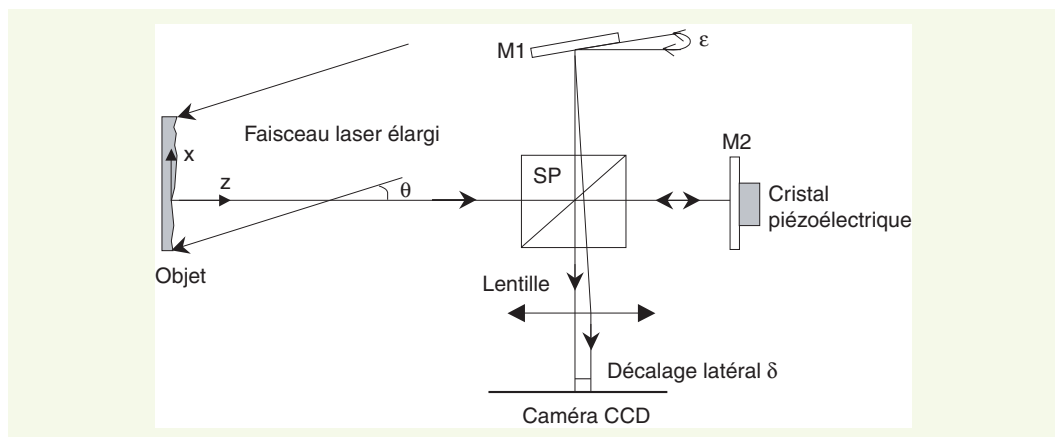
$$|I_1 - I_2| = 2I_0 \cdot m \cdot \underbrace{\left[\sin\left(\varphi + \frac{\Delta}{2}\right) \right]}_{\text{haute fréquence}} \cdot \underbrace{\left[\sin\left(\frac{\Delta}{2}\right) \right]}_{\text{basse fréquence}} \quad (3)$$

L'éclairement de l'image résultante est le produit d'un facteur de haute fréquence spatiale par un facteur de basse fréquence, ce qui se traduit par une modulation du premier facteur par le second. La différence des deux images d'intensité fait donc apparaître des franges, appelées pseudo-franges car elles sont issues d'une différence d'éclairement et non d'interférences constructives. Les pseudo-franges noires correspondent aux lieux où la différence de phase relative Δ due à la déformation est égale à $2k\pi$.

■ Principe de la shearographie

La shearographie a été développée initialement par Leendertz en 1973 pour l'observation plein champ de défauts de surface [10]. Un faisceau laser élargi éclaire l'objet étudié, ce qui produit une figure de speckle. Contrairement à l'interférométrie de speckle classique qui comporte un faisceau de référence, c'est la lumière réfléchie par l'objet qui est dédoublée. Ces deux faisceaux, légèrement décalés² d'une quantité δ , interfèrent sur le capteur CCD d'une caméra. Ce décalage peut être généré par un interféromètre de Michelson (Figure 1) ou un biprisme. Un cristal piézoélectrique est placé derrière un miroir M2 afin d'ajouter si nécessaire un terme de phase connu au signal.

figure 1
Dispositif
d'interférométrie
différentielle utilisant
un interféromètre de
Michelson.



Les équations (1) à (3) s'appliquent également à la shearographie. Dans ce cas, la phase φ représente le déphasage entre les deux points de l'objet décalés de la quantité δ et Δ représente la variation de phase, avant et après déformation de l'objet, entre les deux points de l'objet espacés de δ .

Soit un déplacement $\vec{d} = (u, v, w)$; la déformation de l'objet génère une différence de phase entre deux points voisins. Dans le cas d'un montage de shearographie pour lequel le décalage appliqué δx est faible, on montre que [10, 11] :

$$\Delta = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left[(1 + \cos\theta) \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + \sin\theta \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right] \cdot \delta x \quad (4)$$

où λ est la longueur d'onde du laser et θ l'angle entre la direction d'observation et d'éclairage.

² Décalées ou cisailées d'où le terme anglais shear.

Dans le cas particulier d'une illumination normale à la surface de l'objet et parallèle à la direction d'observation (soit $\theta \approx 0^\circ$), l'équation (4) peut être simplifiée, la différence de phase étant dans ce cas proportionnelle à la dérivée spatiale de la seule déformation w intervenant dans la direction perpendiculaire au décalage, soit :

$$\Delta \approx \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \delta x \quad (5)$$

La différence de phase entre les deux images est représentative des contraintes de la structure. Les chemins optiques étant presque confondus et la méthode étant différentielle, la plupart des perturbations devraient affecter de façon quasi identique les deux images décalées. Ceci rend cette technique compatible avec un environnement industriel ou une utilisation en extérieur.

Selon que le phénomène étudié est statique, périodique, etc. différentes méthodes existent pour visualiser une déformation [8]. Seules celles que nous avons utilisées dans notre étude sont présentées dans cet article.

› Shearographie temps réel

La soustraction de deux images successives permet la visualisation de pseudo-franges qui représentent des lignes de même pente (cf. équations (3) et (5)). Cette technique, directe, permet une auscultation rapide de l'objet étudié et une première visualisation d'éventuels défauts.

› Shearographie par décalage de phase

De nombreuses méthodes peuvent être employées [12] pour calculer les cartes de phase φ_1 et φ_2 . Dans le cas de l'algorithme de détermination de la phase à partir de quatre images, on applique un décalage de phase de $\pi/2$ entre deux images en déplaçant le miroir M2 (cf. Figure 1). La phase est alors calculée pour chaque pixel en combinant les quatre images de la façon suivante :

$$\varphi = \arctan \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (6)$$

où $\varphi \in [0, 2\pi]$

Les franges obtenues suite à la soustraction des cartes de phases enregistrées avant et après la sollicitation correspondent aux *isolignes* de la dérivée première de la déformation perpendiculaire à la surface de l'objet. La présence de franges correspond aux zones de défauts car la contrainte y est la plus élevée.

› Shearographie par temps moyenné

L'une des techniques classiquement utilisée pour l'étude des phénomènes vibratoires est la shearographie par temps moyenné [13-15], aussi appelée soustraction temps réel avec un état de référence remis à jour.

Dans le cas d'une excitation sinusoïdale de fréquence angulaire a , le changement de phase s'écrit :

$$\Delta = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \delta x \right) \cdot \sin(a \cdot t) = \Omega \cdot \sin(a \cdot t) \quad \text{avec} \quad \Omega = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \delta x \quad (7)$$

Les franges d'interférence sont générées par la sommation temporelle sur le capteur CCD des interférogrammes instantanés. Comme la période de vibration est courte comparée au temps d'acquisition de la caméra, l'intensité moyenne enregistrée par le capteur est de la forme :

$$\bar{I} = 2I_0 + 2m \cdot I_0 \cdot J_0(\Omega) \cdot \cos \varphi \quad (8)$$

J_0 étant l'ordre zéro de la fonction de Bessel de première espèce.

Pour éliminer la constante additive $2I_0$, on applique un décalage de phase π entre deux acquisitions successives en translatant le miroir M2. La différence entre les deux figures d'interférences est égale à :

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\text{diff}} &= \bar{I}_1 - \bar{I}_2 = 2I_0 [1 + m \cdot J_0(\Omega) \cdot \cos \varphi] - 2I_0 \cdot [1 + m \cdot J_0(\Omega) \cdot \cos(\varphi + \pi)] \\ &= 4I_0 \cdot m \cdot J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \cdot \delta x\right) \cdot \cos \varphi \end{aligned} \quad (9)$$

Cette méthode est rapide et ne nécessite aucun traitement supplémentaire. On peut observer les franges d'interférence en temps réel en visualisant la valeur absolue de \bar{I}_{diff} . Elles représentent la fonction de Bessel de la dérivée des déplacements [1, 7, 15].

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

La tête shearographique et le logiciel FA (Fringe Analysis) utilisés pour piloter la tête shearographique et gérer l'acquisition et le traitement des images ont été réalisés par le CRITT-HOLO3. La caméra est une SONY CCD 1 280 × 960 pixels. Le laser utilisé est un laser YAG doublé TEM00 monomode longitudinal d'une puissance de 400 mW et de longueur d'onde 532 nm. Le décalage latéral est généré par le miroir M1 d'un interféromètre de Michelson (cf. Figure 1). L'ensemble du dispositif est installé sur un pied vidéo (Figure 2a). Pour les expérimentations sur site, le même matériel peut être installé dans une camionnette (Figure 2b).



figure 2
Photographies du
dispositif d'interférométrie
shearographique
a : en laboratoire
b : sur site.

RÉSULTATS OBTENUS EN LABORATOIRE

Les objets étudiés en laboratoire sont des plaques de béton armé de 400 × 600 × 70 mm qui ont été fissurées par chocs. Plusieurs expériences ont été réalisées pour différentes sollicitations et distances d'auscultation.

■ À courte distance (moins de 2 m)

➤ Utilisation d'une sollicitation vibratoire

La plaque utilisée dans cette expérimentation est fortement fissurée sur sa face arrière (Figure 3a), alors que, sur la face avant, la fissure n'est visuellement pas débouchante (Figure 3b). Afin de faire vibrer la plaque, une stimulation acoustique est réalisée avec un haut-parleur placé à proximité de la plaque, à côté de la fissure (Figure 3c).

La fréquence et l'amplitude du signal sont pilotées par un générateur de basse fréquence. On a identifié par un rapide balayage fréquentiel les fréquences correspondant à des modes propres de vibration de la structure qui mettent particulièrement en évidence le défaut [16]. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 4. Le cisaillement appliqué était relativement important (de l'ordre de 200 pixels).

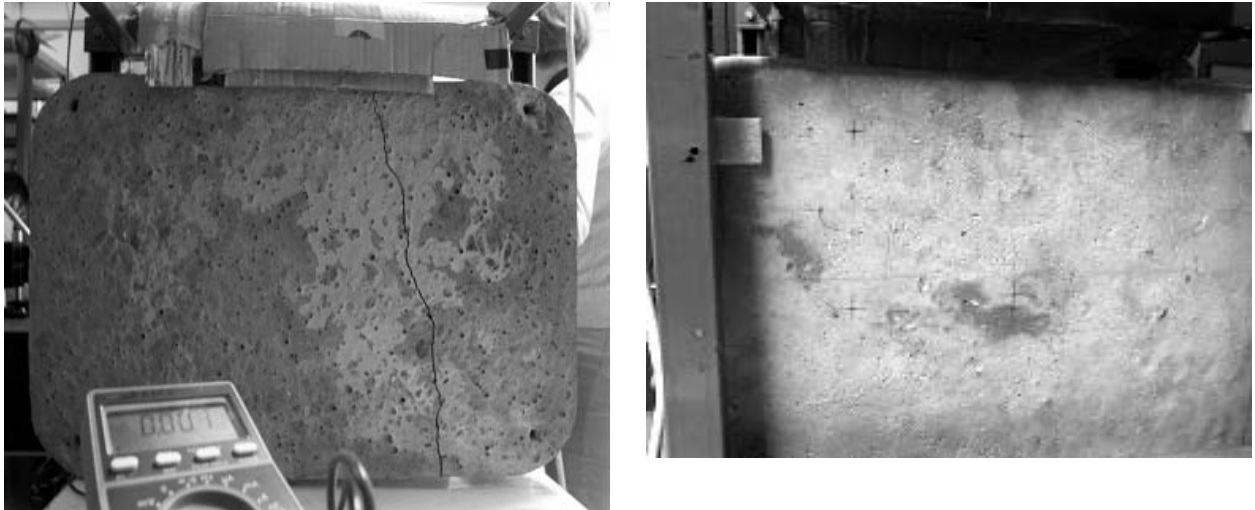


figure 3

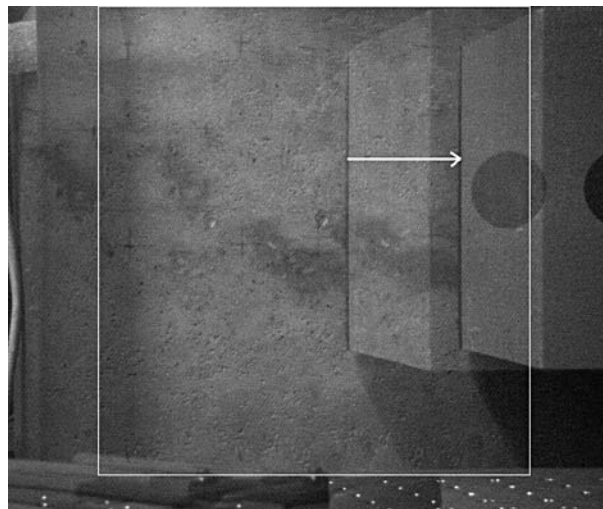
Photographies de l'échantillon de béton armé

a : fissure importante sur la face arrière

b : fissure non débouchante sur la face avant

c : image cisailée visualisée en lumière blanche (cisaillement horizontal représenté par la flèche de 200 pixels) ; la zone auscultée par shearographie est encadrée ; le haut-parleur utilisé est à droite.

a b
c



Si l'on met en œuvre la shearographie en temps moyenné (cf. supra), des franges d'interférence sont générées entre les deux lèvres de la fissure cisailée. Les franges noires correspondent au zéro de la fonction de Bessel J_0 . Le contraste diminue avec l'augmentation de l'ordre des franges, la frange la plus brillante correspondant au zéro du gradient de déplacement dans la direction du cisaillement. Le nombre de franges et leur orientation varient en fonction de la fréquence de stimulation, car des modes propres de vibration différents sont générés.

► Utilisation d'une sollicitation mécanique

La cible employée avec une sollicitation mécanique est une plaque de béton armé qui comporte à l'avant des fissures débouchantes selon une seule orientation et à l'arrière plusieurs fissures suivant différentes orientations (Figure 5a et 5b). Des déformations de la surface sont obtenues au moyen d'un système à trois points d'appui, répartis de part et d'autre de la fissure à l'arrière de l'échantillon. Le cisaillement appliqué est horizontal. La méthode de décalage de phase à quatre images est utilisée pour calculer les cartes de phases (cf. §0).

La carte de phase de référence est enregistrée avant la sollicitation et une seconde carte de phase est enregistrée après le serrage. En faisant la différence entre les deux, on met en évidence les défauts de la structure (Figure 5c). La shearographie permet de détecter la fissure visible aussi bien que les deux fissures non débouchantes, indétectables visuellement.

■ A longue distance (de 3 à 15 m)

Les résultats présentés précédemment ont été obtenus à des distances d'auscultation faibles (inférieures à 2 m) non compatibles avec une utilisation *in situ* pour la détection de fissures sur ouvrages

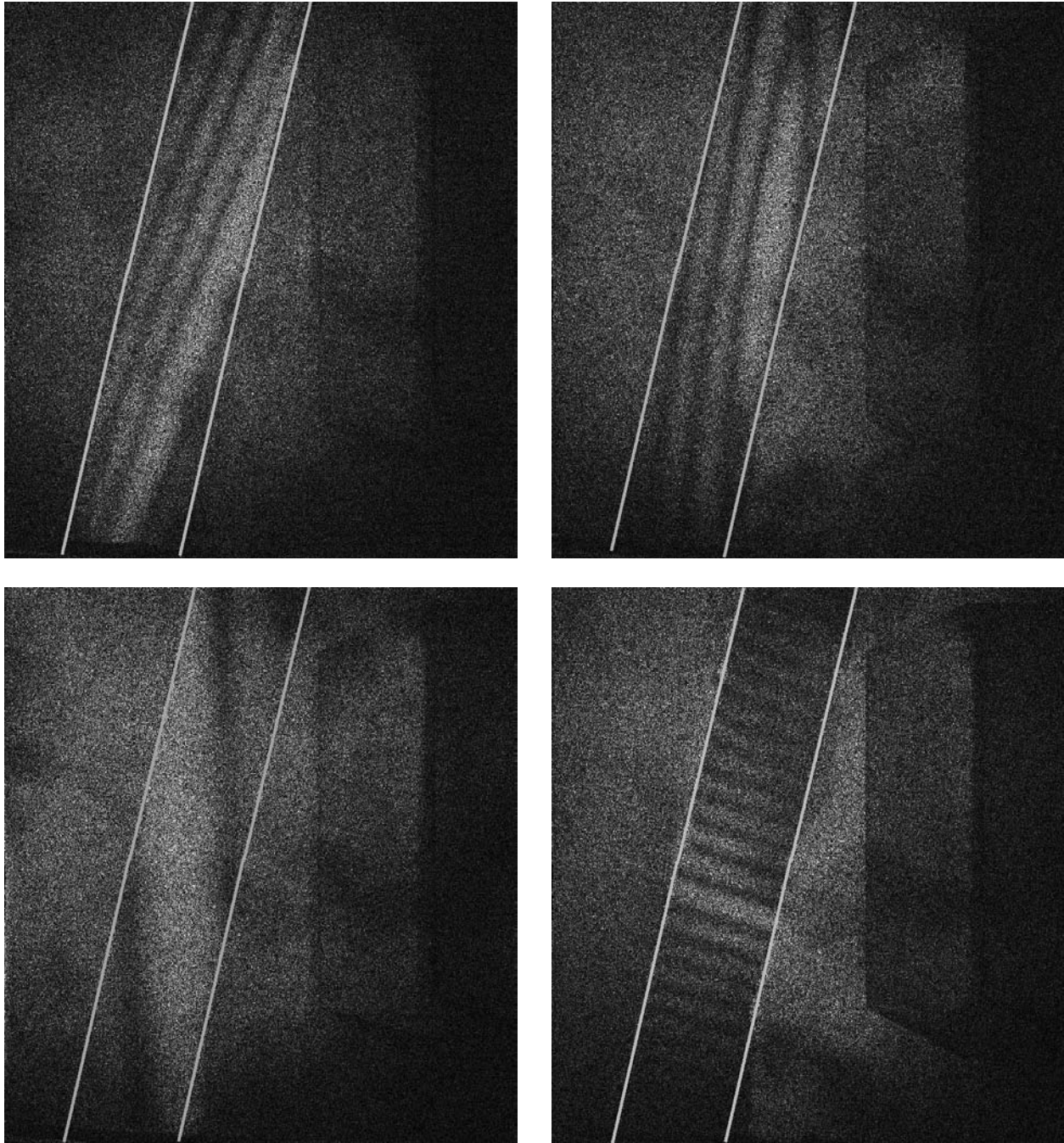
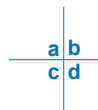


figure 4

Shearographie par temps moyenné pour des fréquences de stimulation acoustique de 102 Hz (a), 158 Hz (b), 186 Hz (c) et 220 Hz (d) respectivement. L'emplacement de la fissure cisailée est souligné par des traits.



d'art. C'est pourquoi des expériences complémentaires ont été réalisées pour des distances de visée plus importantes. L'objet étudié est une plaque de béton fissurée, stimulée mécaniquement comme précédemment. Des stimulations identiques sont appliquées avec des distances d'observation comprises entre 3 et 15 m. Le cisaillement appliqué est horizontal. L'objectif, de focale 70-300 mm, placé à l'extérieur de la tête shearographique, permet de visualiser la même zone à 3 m, 5 m et 7,50 m, soit une surface de $36 \times 21,5$ cm. La focale n'est plus suffisante à 15 m et la zone observée devient plus importante.

Tous les résultats présentés sur la **Figure 6** correspondent à la différence entre une carte de phase à l'état sollicité et une carte de phase à l'état de référence.

Pour les distances d'auscultation inférieures à 10 m (utilisation du zoom), la taille de la zone étudiée est quasi identique et la fissure est mise en évidence par l'apparition de franges contrastées

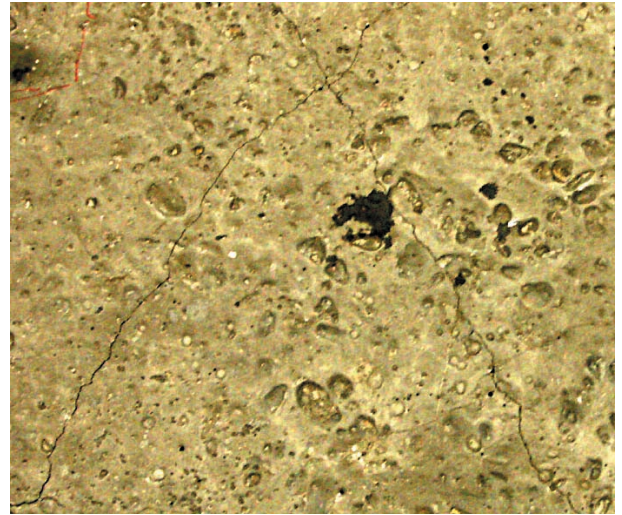
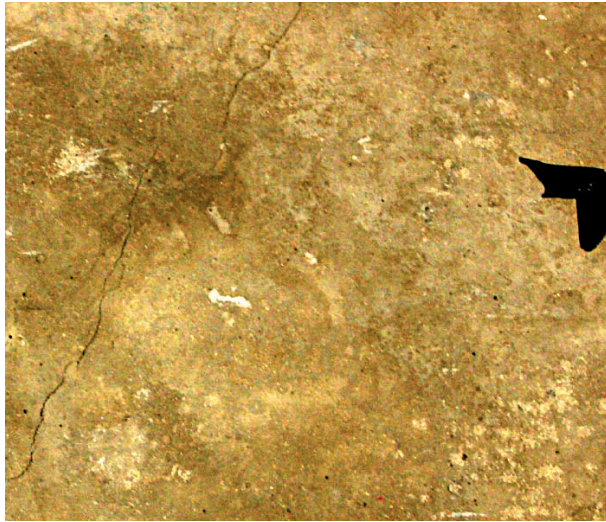


figure 5

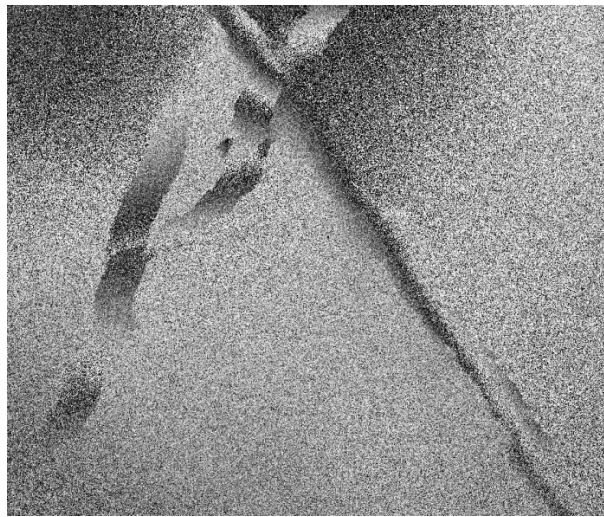
Photographies de la zone stimulée de taille 25 × 21 cm.

a : face avant comportant uniquement des fissures selon une orientation de 45° environ

b : face arrière comportant des fissures selon deux orientations principales (45° et 135°)

c : sur la face avant, carte de différence de phase entre un état sollicité et l'état de référence.

a
b
c



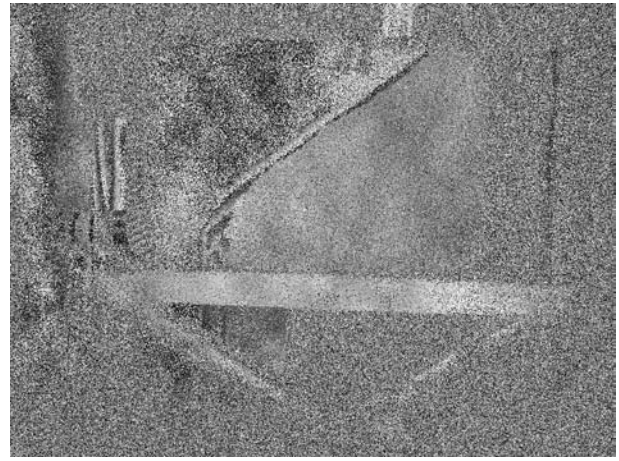
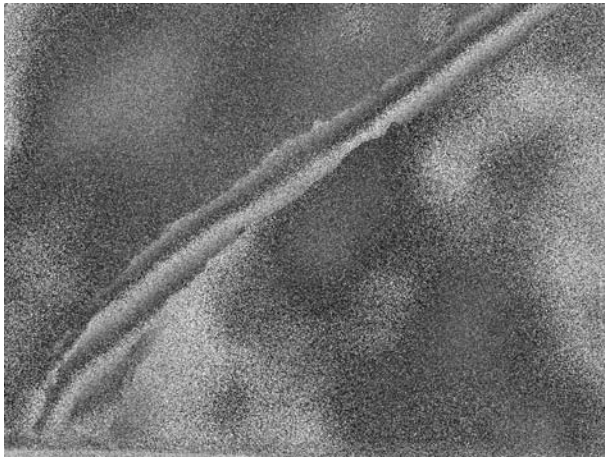
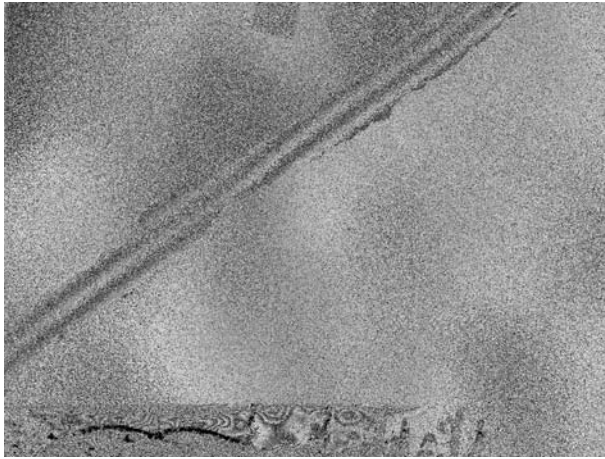
(Figure 6a à 6c). À 15 m, le champ observé est plus large et la taille des pixels augmente. Il n'a pas été possible de détecter la fissure pour le cisaillement appliqué précédemment. On a alors appliqué un cisaillement plus important qui, en augmentant la sensibilité de la tête shearographique, a finalement permis de détecter la fissure (Figure 6d). Les parties de la plaque ne comportant pas de défaut ont un mouvement d'ensemble continu qui ne génère pas de franges par shearographie.

RÉSULTATS OBTENUS *IN SITU*

Deux zones de la travée d'un pont autoroutier circulé (Figure 7a) ont été observées : une zone non fissurée mais sale, recouverte de poussières et de toiles d'araignée (Figure 7b) et une zone présentant une fissure débouchante (Figure 7c). La fissure, repérée à la craie bleue, a une ouverture de l'ordre de 0,1 mm. La sollicitation est générée ici par le seul trafic routier.

Sur la zone *saine*, aucune détection de fissure n'a été observée par shearographie. Ce test confirme la capacité de la shearographie à détecter uniquement les défauts d'origine mécanique. Les défauts d'aspect de surface ne provoquent pas de déformation.

Dans la zone comportant un défaut actif, la fissure a été détectée avec différentes techniques de shearographie. La fissure est détectée en temps réel, bien que l'image obtenue soit très bruitée (Figure 8b) à cause des fluctuations aléatoires de la phase des grains de speckle. La méthode par temps moyenné permet également de visualiser la différence de sollicitation de part et d'autre de la fissure et ainsi de détecter celle-ci (Figure 8c). L'image obtenue par temps moyenné présente un meilleur contraste et les bords de la fissure sont mieux délimités.



a
b
c
d

figure 6

Cartes de différence de phase entre un état sollicité et un état de référence obtenues par shearographie pour des distances de visée de 3 m (a), 5 m (b), 7,50 m (c) et 15 m (d) respectivement.



figure 7

Photographies du pont autoroutier ausculté par shearographie
 a : vue d'ensemble
 b : zone non fissurée recouverte de poussière et de toiles d'araignée
 c : zone comportant une fissure repérée à la craie bleue.

a
b
c



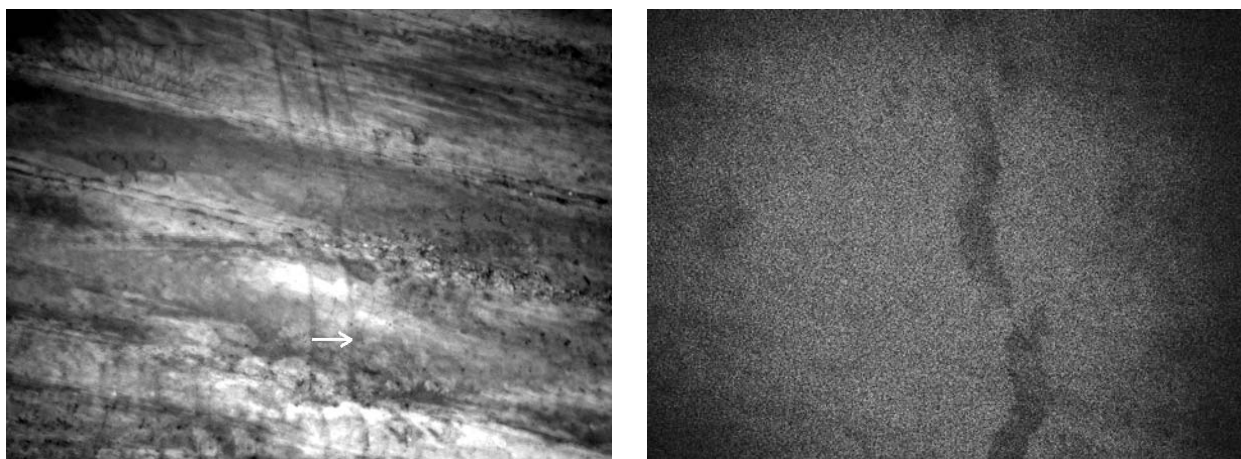


figure 8

Détection d'une fissure par shearographie temps réel et temps moyenné
a : photographie de la zone auscultée à laquelle est appliqué le cisaillement horizontal matérialisé par une flèche (c'est le marquage à la craie de la fissure qui est visible et non la fissure)
b : résultats obtenus par shearographie temps réel
c : résultats obtenus par shearographie temps moyenné.

a | b
 c



La sollicitation générée par le passage des véhicules sur le pont semble adéquate pour l'étude qui a été menée. Pour voir apparaître une fissure, il faut cependant que le trafic soit homogène. En effet, lors du passage de poids lourds, les vibrations de l'ouvrage sont trop importantes et il y a décorrélation des grains de speckle. Il est donc recommandé d'appliquer la méthode décrite pour la détection de fissures dans un contexte de trafic stable. Bien que non reproductible, une telle sollicitation permet de réaliser en conditions réelles une auscultation d'ouvrages par shearographie, sans qu'il soit nécessaire d'apporter de sollicitation mécanique ou vibratoire supplémentaire.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a montré la pertinence de la shearographie pour la détection de fissures sur ouvrages d'art. L'application d'une contrainte à la structure permet de mettre en évidence des défauts actifs par l'apparition de franges d'interférence au niveau du défaut cisailé. Le dispositif mis en œuvre est relativement compact, ce qui permet d'ausculter une surface étendue par simple déplacement de la tête holographique. Cette technique peut être utilisée même en cas d'observation à longue distance sous réserve de disposer d'un laser suffisamment puissant et d'un objectif approprié. En effet, l'application d'un décalage spatial permet d'augmenter la taille apparente du défaut, donc de s'affranchir de la distance, ce qui est un avantage non négligeable par rapport aux techniques d'holographie et de photogrammétrie classiques. En outre, la méthode étant différentielle, les turbulences de l'atmosphère et les déplacements parasites d'ensemble affectent de façon quasi similaire les deux images dédoublées et ont peu d'influence sur les résultats. Cette technique est donc particulièrement adaptée à une utilisation en extérieur. Les expérimentations réalisées sur site sont prometteuses. En effet, la sollicitation naturelle d'un ouvrage d'art que constitue un trafic qui y circule s'avère bien adaptée à la détection de fissures par shearographie, dès lors que ce trafic est suffisamment régulier. Nos recherches futures s'orienteront vers la quantification des défauts observés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **PRYPUTNIEWICZ R.J.**, Electronic shearography and electronic holography working side by side, *proc. SPIE*, vol. **1821**, **1992**, pp.27-37.
- 2 **SMIEGELSKI P.**, Holographie industrielle, *Teknea*, **1994**, 361 pages.
- 3 **JACQUOT P., LEHMANN M., COLONNA DE LEGA X., FACCHINI M.**, Speckle interferometry improvements for applications in civil engineering, *IUTAM Symposium on Advanced Optical Methods and Applications in Solid Mechanics*, **2000**, pp. 199-212.
- 4 **GOYAT Y., GUILLARD Y., CAUSSIGNAC J.M., CHRISTNACHER F., SMIGIELSKI P., FUSCO D.**, Détection de fissures par interférométrie holographique et par interférométrie de speckle, *rapport LCPC*, **2002**.
- 5 **PANET M., TAILLADE F.**, Simulation de la shearographie appliquée à l'évaluation de zones fissurées d'un aéroréfrigérant, *BLPC*, volume **239**, **2002**, 137-147.
- 6 **KIM K.S., KANG K.S., KANG Y.J., CHEONG S.K.**, Analysis of internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography., *Optics and Laser Technology*, volume **35**, **2003**, pp. 639-643.
- 7 **JACQUOT P., FACCHINI M.**, Interferometric imaging : Involvement in civil engineering, *Journal of computing in civil engineering*, volume **13**, **2**, **1999**, pp. 61-70.
- 8 **JACQUOT, P.**, Speckle Interferometry : A Review of the principal methods in use for experimental mechanics applications, *Strain*, volume **44**, **1**, **2008**, pp. 57-69.
- 9 **STEINCHEN W., YANG L.**, Digital shearography, theory and application of digital speckle pattern interferometry, *SPIE Press, USA*, **2004**, 310 pages.
- 10 **LEENDERS J., BUTTERS J.**, An image speckle-shearing pattern interferometer for measuring bending moments, *Journal of Physics E : Scientific Instruments*, volume **6**, **1973**, pp. 1107-1110.
- 11 **HUNG Y.Y.**, A speckle-shearing interferometer : a tool for measuring derivatives of surface displacements, *Optics Communications*, volume **11**, **2**, **1974**, pp. 132-135.
- 12 **CREATH K.**, Phase shifting speckle interferometry, *Applied Optics*, volume **24**, **18**, **1985**, pp. 3053-3058.
- 13 **PRYPUTNIEWICZ R.J.**, Time-average holography in vibration analysis, *Optical Engineering*, volume **24**, **1985**, pp.843-848.
- 14 **TOH S.L., TAY C.J., SHANG H.M., LIN Q.Y.**, Time-average shearography in vibration analysis, *Optics and Laser Technology*, volume **27**, **1**, **1995**, pp.51-55.
- 15 **BORZA Z.**, High-resolution time-average electronic holography for vibration measurement, *Optics and Lasers in Engineering*, volume **41**, **3**, **2004**, pp. 515-527.
- 16 **MUZET V., LACOT E., HUGON O., GUILLARD Y.**, Experimental comparison of shearography and laser optical feedback imaging for crack detection in concrete structures, *SPIE : Optical measurement systems for industrial inspection IV*, Munich, juin **2005**, volume **5856**, pp. 793-799.

