

# ANALYSE PAR INTERCORRÉLATION D'IMAGES DU COMPORTEMENT D'UNE FISSURE DANS UNE POUTRE DE BÉTON ARMÉ AU COURS D'UN ESSAI DE CHARGEMENT SUR LE PONT SAINT-MARCEL (QUÉBEC)

**Michel Küntz**  
Professionnel de recherche

**Marc Jolin**  
Attaché de recherche

**Josée Bastien**  
Professeur titulaire

CRIB, Département de Génie Civil  
Université Laval  
Québec (Québec) G1K 7P4

**Résumé :** Une technique d'analyse de la déformation basée sur le principe d'intercorrélation d'images a été utilisée pour étudier le comportement *in situ* d'une fissure de cisaillement dans une poutre de béton armé endommagée au cours d'une essai de chargement statique. Cette méthode nous a permis de reconstituer l'évolution du champ de déplacement associé à la fissure sur une surface de 11 x 13 cm avec une précision de l'ordre de 10 micromètres pour différents trajets de chargement. Les résultats de l'analyse indiquent que la façon dont la fissure est sollicitée varie de façon significative d'un trajet à l'autre et dépend notamment de la position et du sens de la circulation de la charge sur le tablier. Ces informations devraient contribuer à améliorer notre compréhension du comportement en fatigue des structures de béton armé dans les conditions de service.

## INTRODUCTION

Le pont de Saint-Marcel est une structure en béton armé à une travée, comportant deux voies de circulation permettant à la route 216 de franchir la rivière Ratsault dans la région Chaudières-Appalaches. Il s'agit d'un ouvrage de portée simple, constituée de deux poutres en T coulées en place. L'ouvrage mesure environ 23 mètres de long et 7 mètres de large et présente un biais de 56° (figure 1). Une inspection visuelle du pont, effectuée en juin 1997, a permis de constater l'endommagement de plusieurs éléments de la structure susceptible de menacer à court ou à moyen terme l'aptitude au service et la sécurité structurale de l'ouvrage. L'inspection a notamment révélé la présence de plusieurs fissures de cisaillement dont les plus importantes ( $\approx 1\text{mm}$ ) sont situées à proximité de la culée est du pont. Compte tenu de l'état général de l'ouvrage, son remplacement a été décidé par Ministère des Transports du Québec (MTQ). Son état ne laissant toutefois pas présager une rupture imminente (Savard, 2002) et compte tenu de l'importance locale du lien routier, le pont est maintenu en service sans restriction de charge jusqu'à son remplacement. Une voie de circulation a cependant été fermée à la circulation. Afin de garantir la sécurité des usagers et préserver dans la mesure du possible l'intégrité structurale de l'ouvrage, un programme de télésurveillance destiné à mesurer la progression de l'endommagement a été mis sur pied par le MTQ. L'instrumentation et les principaux objectifs de la télésurveillance ont récemment été décrits par Savard (2002).

La rupture en fatigue d'une des poutres constituant un des mécanismes de ruine probables sur cet ouvrage, des potentiomètres ont été installés sur cinq des principales fissures de cisaillement afin d'être en mesure de repérer les signes précurseurs de la rupture. Les potentiomètres ne fournissent cependant qu'une mesure ponctuelle de la variation de l'ouverture (ou souffle) des fissures et ne donnent aucune information sur les modes de sollicitation des fissures dans les conditions de service. Il n'est en effet pas possible de déterminer les composantes normale et longitudinale vraies du déplacement le long d'une fissure avec la seule

mesure du souffle (figure 2). Il est important de rappeler ici que le glissement le long de la fissure (cisaillement) ne peut en aucune façon contribuer à faire varier le souffle. Les potentiomètres n'enregistrent en fait que la résultante en traction ou en flexion des sollicitations réelles et sous-estiment en règle générale la valeur du déplacement total. La nature des sollicitations à l'origine de l'endommagement en fatigue des poutres du pont de Saint-Marcel demeurent donc pour une large part inconnues. Des mesures complémentaires sont nécessaires pour déterminer le mode de fonctionnement des fissures sous charge réelle.

Pour palier les limitations de l'instrumentation mise en place, nous avons utilisé une nouvelle méthode d'analyse de la déformation basée sur le principe de l'intercorrélation d'images (Hild et al., 1999), pour réaliser des mesures du champ de déplacement associé à une des principales fissures de cisaillement de la structure au cours d'un essai de chargement statique. L'expérience réalisée sur le pont Saint-Marcel constituait une première application de la méthode d'intercorrélation d'images sur un ouvrage dans des conditions de service. Cette technique n'avait en effet jusqu'ici été utilisée que dans l'environnement contrôlé des laboratoires (cf. Astudillo et al., 2001). Dans cette étude, nous validons l'application de cette technique pour la mesure *in situ* de la déformation sur une structure de béton en condition de service et résumons les principales informations obtenues sur la nature des sollicitations et la cinématique de la déformation associée à une zone endommagée.

## CARACTÉRISTIQUES DE L'ESSAI DE CHARGEMENT

L'essai, réalisé par le MTQ au mois d'octobre 2003, a été effectué selon quatre trajets longitudinaux comportant neuf positions d'arrêt prédéterminées régulièrement espacées d'une longueur de 2,3 m sur le tablier (figure 1). Deux camions 10 roues à benne basculante pesant respectivement 25250 et 26200 kilogrammes ont été utilisés au cours de l'essai. Pour le cheminement A, les camions parcourent la structure d'ouest en est et sollicitent préférentiellement la poutre sud du pont. Le cheminement C, réalisé d'est en ouest est situé à la verticale de la poutre nord. Les cheminements B et B' ont été réalisés au centre du tablier, dans le sens ouest-est pour le trajet B et dans le sens est-ouest pour le trajet B'. Chaque cheminement a d'abord été effectué avec un seul camion, puis répété avec les deux camions placés l'un à la suite de l'autre. Les positions d'arrêt sont définies par rapport au dernier essieu arrière du véhicule. Le centre de gravité du véhicule (CDG) se trouve donc décalé d'environ trois mètres vers l'avant du véhicule par rapport à la position d'arrêt. A chaque arrêt, les déplacements et déformations mesurés par les différents capteurs installés sur la structure sont enregistrés pour permettre l'évaluation de l'état de l'ouvrage.

Un premier essai de chargement a été réalisé sur la structure à l'automne 2001 par le MTQ suivant les mêmes trajets. Les données recueillies au cours de cet essai ont fait l'objet d'une première analyse par J.P. Perron (2004). La comparaison des données fournies par les potentiomètres au cours de cet essai (figure 3) montre que les déplacements les plus importants sont enregistrés sur la fissure #5 et ce, quels que soient les trajets effectués. Les données recueillies au cours de l'essai réalisé en 2003 confirment ces premières observations (figure 3). Cette fissure est située à l'extrémité est de la poutre nord de l'ouvrage, à proximité de la culée. Elle est visible sur les deux faces de la poutre et présente une largeur moyenne de l'ordre de 1 mm pour une pente variant de 55 à 65°. Le décalage vertical des lignes laissées par les planches de coffrage de part et d'autre de la fissure indique que le compartiment ouest est légèrement affaissé. Le potentiomètre placé sur la fissure est installé sur la face intérieure de la poutre, à une

hauteur de 80 centimètres. Il est orienté perpendiculairement à la fissure à une inclinaison de 35 degrés par rapport à l'horizontale.

## **ANALYSE DE LA DÉFORMATION : MÉTHODOLOGIE**

L'analyse de la déformation par intercorrélation d'images numériques consiste très schématiquement à comparer deux clichés de la zone d'étude, acquis à deux étapes différentes du chargement. Les déplacements locaux sont déterminés en tout point de la région d'étude par corrélation de petits ensembles de pixels caractérisés par leur niveaux de gris et leur arrangement relatif entre l'image de référence et l'image de l'état déformé. Pour faciliter l'identification des sous-ensembles de pixels d'une image à l'autre, la zone d'étude doit présenter des contrastes de teintes suffisamment importants à petite échelle.

Nous avons utilisé une caméra CCD de résolution 1024 x 1280 pixels et  $2^{12}$  (4096) niveaux de gris, reliée à un micro-ordinateur portable au cours de l'expérience de Saint-Marcel. La caméra numérique a été amarrée au tablier de la structure au droit de la fissure par un système de potence vissée sous le porte-à-faux (figure 4). La déformation du porte-à-faux résultant de la charge appliquée sur le tablier peut éventuellement induire un déplacement relatif entre la caméra et la région d'étude. Cependant, puisqu'il s'agit essentiellement d'une translation rigide, ce déplacement ne devrait avoir aucune conséquence sur les résultats de l'analyse. La caméra a été placée à environ un mètre de la surface de la poutre de façon à délimiter une zone d'étude rectangulaire de 24.5 x 19 cm, située à 50 cm de la base de la poutre. Compte tenu de la résolution de la caméra, chaque pixel représente un carré d'environ 0.19 x 0.19 mm de côté. Pour éviter toute distorsion qui pourrait éventuellement nuire à la qualité des mesures, l'axe optique de la caméra a été orienté perpendiculairement à la surface d'étude et la caméra mise de niveau. Une image de la zone d'étude a été enregistrée à chaque arrêt du ou des camions pour les différents trajets effectués au cours de l'essai de chargement.

Le dépouillement des images a été réalisé à l'aide d'un logiciel développé par Hild et collaborateur (1999). La procédure de calcul d'intercorrélation, basée sur l'utilisation de la transformée de Fourier rapide (FFT) est décrite en détail par Hild et al. (1999) et ne sera pas rappelée ici. Un algorithme d'interpolation, exécuté à la suite de l'intercorrélation par FFT permet d'augmenter la résolution de la méthode à environ  $1/10^{\text{ème}}$  de pixel (Hild et al., 1999 ; Astudillo et al., 2001). La précision de la mesure du déplacement est donc de l'ordre de 10 à 20  $\mu\text{m}$ , compte tenu de la taille du pixel pour l'expérience réalisée sur le pont de Saint-Marcel, ce qui est compatible avec les déplacements anticipés sur la fissure au cours de l'essai. Les composantes horizontales  $dh$  et verticales  $dv$  du déplacement dans la zone d'étude ont été calculées sur des sous-ensembles de 32 pixels avec un pas de décalage de 32 pixels entre sous-ensembles de manière à paver l'ensemble de l'image sans recouvrement ni discontinuité.

## **ANALYSE DU CHAMP DE DÉPLACEMENT**

Une image de la zone d'étude prise à partir de la caméra CCD est représentée sur la figure 5. Nous avons cependant dû limiter notre analyse à la partie supérieure droite de l'image, délimitée par un liseré blanc sur la figure, qui représente environ 1/3 de l'image originale. La bande de peinture blanche au centre de l'image n'offrait pas suffisamment de contraste pour permettre le calcul des déplacements dans cette zone. Pour éviter ce problème, il aurait préalablement fallu préparer la surface, en projetant de fines gouttelettes de peinture par exemple, afin d'augmenter le grain et améliorer la texture au centre de l'image. Nous avons représenté sur

la figure 6 les cartes successives de la composante verticale  $dv$  du champ de déplacement calculée pour chaque arrêt du cheminement C de l'essai de chargement. L'image de l'état non déformé a été choisie comme référence. Cette représentation permet une visualisation immédiate du déplacement relatif des deux segments de poutre délimités par la fissure en fonction de la position du camion à la surface du tablier. L'incrément de déplacement entre deux lignes d'isocontour est de 0.04 pixels, soit environ 10  $\mu\text{m}$ . L'absence de gradient de déplacement de part et d'autre de la fissure indique que le mouvement est entièrement localisé sur la fissure : il s'agit donc essentiellement d'une translation rigide. Le déplacement le long de la fissure présente visiblement une forte composante cisailante, le compartiment ouest situé du côté du centre de la poutre se déplaçant vers le bas au passage du camion.

Nous avons quantifié le mouvement relatif des deux blocs à partir des composantes  $dh$  et  $dv$  du déplacement de deux points sélectionnés dans chacun des compartiments délimités par la fissure (figure 6). Nous avons dans un premier temps reconstitué le souffle de la fissure en déterminant à partir de ces informations le mouvement qu'aurait enregistré un potentiomètre placé perpendiculairement à la fissure afin de vérifier la validité des estimations fournies par le logiciel d'intercorrélation d'images. Le résultat est confronté aux données réelles recueillies par le potentiomètre #5 sur la figure 7. Les deux courbes de souffle mesuré et calculé ne présentent en général que des différences minimales (inférieures à la limite de résolution de la méthode pour cette expérience) pour les différentes positions d'arrêt. L'amplitude maximale du déplacement calculé est cependant inférieure à l'amplitude maximale mesurée. Il faut toutefois rappeler que le potentiomètre est placé sur l'autre face de la poutre sur un segment de la fissure situé au dessus de la zone d'étude. Il est donc possible qu'une partie au moins de l'écart entre les amplitudes calculées et mesurées soit attribuable aux variations locales du souffle le long de la fissure. Le calcul d'intercorrélation d'images fournit donc une information quantitative fiable, avec une résolution de l'ordre de 10 micromètres pour cette expérience. Les trajectoires relatives suivant les directions horizontale et verticale des deux points sélectionnés sont représentées sur la figure 8. Le déplacement s'effectue initialement suivant les directions normales et tangentielles à la fissure lorsque le camion est situé à la verticale de la zone endommagée (positions d'arrêt 7 et 8). La fissure se referme ensuite au delà de sa position d'équilibre au fur et à mesure que la charge s'éloigne vers l'extrémité ouest de la structure (positions 6 à 2). Ce mouvement de fermeture empêche tout glissement le long du plan de fracture et les deux blocs demeurent en position cisailée pendant une grande partie du cheminement du camion. Lorsque le camion s'approche de l'extrémité ouest du pont, l'effet de la charge diminue et les lèvres de la fissure s'écartent de nouveau. L'ouverture de la fissure s'accompagne de la remontée progressive du bloc ouest. Le diagramme suggère que la fissure ne retrouve pas exactement sa position initiale lorsque le camion a quitté la surface du tablier. Les déplacements enregistrés pour les dernières positions d'arrêt sont cependant à la limite de la résolution de la méthode: nous considérerons donc que le mouvement sur la fissure est complètement réversible en première approximation.

Nous avons synthétisé l'ensemble de ces informations à la figure 9 sur laquelle la direction et la valeur du déplacement relatif des deux blocs séparés par la fissure ont été reportées pour chaque position d'arrêt. Chaque vecteur représente le déplacement du bloc ouest par rapport à l'état initial non déformé, le bloc est étant supposé immobile. La direction et l'intensité du déplacement varient de façon continue au fur et à mesure que le camion se déplace. Le mouvement du bloc ouest que l'on peut schématiquement reconstituer à partir de la figure 9 dessine un trajectoire grossièrement circulaire dans le sens horaire par rapport au bloc est au cours de laquelle les sollicitations en tension, cisaillement et compression se combinent en proportion variable. Les déplacements enregistrés entre les arrêts 5 et 2 indiquent que la fissure

se referme: ce mouvement suggère qu'une force axiale en compression se développe dans la poutre au passage du camion. La même analyse a été répétée à partir des images acquises lors des trajets B et B' effectués respectivement d'ouest en est et d'est en ouest au centre du tablier (figure 10). Les déplacements calculés pour le trajet A, qui passe au dessus de la poutre Sud, se situent en dessous de la limite de résolution pour cette expérience et n'ont donc pas été présentés. Rappelons que c'est pour ce trajet que la poutre nord sur laquelle se situe la fissure est la moins sollicitée. Pour le trajet B' (figure 10), le passage du camion provoque un mouvement simultané d'ouverture et de cisaillement le long de la fissure qui atteint son amplitude maximale lorsque le camion est approximativement à la verticale de la zone endommagée. La fissure se referme ensuite progressivement et retrouve rapidement sa position d'équilibre à la position d'arrêt 6. Les sollicitations auxquelles est soumise la fissure au cours de ce trajet sont donc beaucoup plus simples et sont comparables à ce qu'on pourrait obtenir si une charge fixe animée d'un mouvement cyclique vertical était appliquée sur la poutre. Au cours du cheminement B, le camion sollicite initialement la partie de la poutre la plus éloignée de la fissure. Pour ce trajet, les sollicitations en traction et en cisaillement apparaissent nettement découplées. L'extrémité est du segment ouest de la poutre oscille initialement dans le plan vertical le long de la fissure (position d'arrêt 1, 2). La fissure se referme ensuite au cours des trois arrêts suivants. Lorsque le véhicule arrive à proximité de la fissure, la charge qui s'applique entièrement sur l'extrémité est du segment de poutre ouest induit un déplacement vertical de grande amplitude, qui sollicite la fissure en cisaillement. Lorsque le camion a franchi la zone endommagée, l'extrémité du bloc Ouest remonte et la fissure s'ouvre (positions 8, 9) puis retrouve sa position initiale lorsque le camion quitte le tablier (arrêt 10).

## DISCUSSION

L'analyse du champ de déplacement présentée dans la section précédente confirme que la poutre nord du Pont de Saint-Marcel est soumise à une sollicitation présentant une forte composante cisailante au niveau de la fissure. La façon dont la fissure est sollicitée varie cependant de façon significative d'un trajet à l'autre et dépend notamment de la position et du sens de la circulation de la charge sur le tablier. Pour tous les trajets analysés, le déplacement mesuré sur la fissure combine traction, compression et cisaillement qui peuvent intervenir simultanément ou se succéder et dont les proportions relatives varient pour une même position d'arrêt selon le trajet effectué. L'analyse des trajectoires relatives des deux segments de poutre délimités par la fissure a notamment permis de mettre en évidence l'existence d'un déplacement horizontal qui entraîne la fermeture épisodique de la fissure pour certaines positions d'arrêt. L'ordre dans lequel les segments de poutres situés de part et d'autre de la zone endommagée sont sollicités intervient aussi, comme l'indiquent les différences de comportement observées entre les trajets B et B'. En tout état de cause, l'endommagement par fatigue de la poutre nord au niveau de la fissure ne peut être attribuée à la répétition monotone d'un cycle de chargement unique, comme c'est généralement le cas au cours des essais réalisés en laboratoire (Mor et al., 1992 ; Hefferman et al., 2004). A ce stade, il est cependant impossible d'évaluer les conséquences de ces modes de sollicitation multiples sur les limites de résistance en fatigue de la poutre. L'étude des mécanismes d'endommagement par fatigue des éléments de béton armé devrait tenir compte de la variabilité des modes de sollicitation dans les conditions de service afin de parvenir à une meilleure évaluation du risque de rupture et de la durée de vie des structures. L'introduction d'une sollicitation axiale au cours des essais de chargement cyclique devrait notamment

permettre de tenir compte du fait que la charge appliquée n'est pas fixe mais se déplace sur la structure dans les conditions d'utilisation.

Ces résultats soulignent aussi clairement les limites de l'utilisation de potentiomètres pour la surveillance à distance du comportement des fissures dans un élément de béton armé endommagé, notamment lorsqu'il s'agit de fissures en cisaillement. En effet, les mesures de souffle fournies par un potentiomètre unique ne permettent pas d'accéder à la composante tangentielle du déplacement le long de la fissure. Pour déterminer les sollicitations auxquelles sont soumises les fissures, il est indispensable d'utiliser deux potentiomètres orientés à  $90^\circ$  l'un de l'autre. En l'état actuel, il demeure difficile d'évaluer le risque de rupture en cisaillement du pont de Saint-Marcel. Ce problème devra être corrigé lors de l'instrumentation de nouvelles structures.

Les résultats de l'expérience réalisée sur le pont Saint-Marcel démontrent l'intérêt de la méthode d'intercorrélation d'images pour l'analyse de la déformation sur des structures en conditions de service. L'acquisition d'images ne requiert que peu de matériel (essentiellement une caméra numérique) et l'expérience elle-même ne demande que peu de préparation. Certaines améliorations qui concernent essentiellement l'étape de l'acquisition des images pourraient permettre une augmentation significative de la qualité des mesures. Les algorithmes développés dans le logiciel d'interprétation utilisé dans cette étude sont en effet très efficaces et la qualité du résultat final dépend en grande partie du soin apporté à l'étape de la saisie des images. Des marqueurs devront par exemple systématiquement être mise en place sur la surface de béton (par projection de gouttelettes de peinture par exemple) afin d'améliorer le contraste des images sur l'ensemble de la zone d'étude et la caméra devrait être dans la mesure du possible fixée sur un support extérieur à la structure pour prévenir toute distorsion liée au déplacement relatif entre la zone d'étude et le point d'ancrage. Avec l'amélioration continue des capacités des caméras CCD disponibles sur le marché, on peut envisager dans un proche avenir la possibilité d'analyser, à résolution égale, de plus grandes surfaces, comportant par exemple plusieurs fissures. Il devrait être possible à moyen terme d'établir des cartes de la distribution de l'endommagement à l'échelle d'un élément structural complet. Ces informations devraient contribuer à améliorer notre compréhension du comportement en fatigue des structures de béton armé dans les conditions de service.

## CONCLUSION

L'étude du comportement *in situ* d'une fissure de cisaillement dans une poutre de béton armé endommagée a permis de montrer que les modes de sollicitation auxquelles est soumise la fissure varient de façon significative d'un trajet à l'autre. L'évolution du déplacement sur la fissure dépend notamment de la position transversale et du sens de circulation de la charge sur le tablier. Les déplacements mesurés sur la fissure combinent traction, compression et cisaillement en proportion variable pour une même position d'arrêt selon le trajet effectué. L'endommagement en fatigue des structures de béton armée en condition de service est donc vraisemblablement le résultat de sollicitations cycliques complexes dont cette étude préliminaire fournit un premier aperçu. Ces informations devraient contribuer à améliorer notre compréhension du comportement en fatigue des structures de béton armé dans les conditions de service et suggèrent de nouveaux protocoles expérimentaux pour l'étude en laboratoire de ces processus.

**Remerciements :** M.K. remercie Fabien Perez pour l'avoir patiemment initié au maniement de la caméra numérique et à l'utilisation du logiciel d'intercorrélation, Hakim Oudslimane pour son aide précieuse sur

le terrain et Messieurs Marc Savard, Jean François Laflamme du Ministère des Transports du Québec pour lui avoir donné l'occasion de participer au chargement d'essai sur le pont Saint-Marcel.

## BIBLIOGRAPHIE

P.J. Hefferman, M-A Erki et D.L. Duquesnay: *Stress redistribution in cyclically loaded reinforced concrete beams*, ACI Structural Journal, **101**, 261-268, 2004.

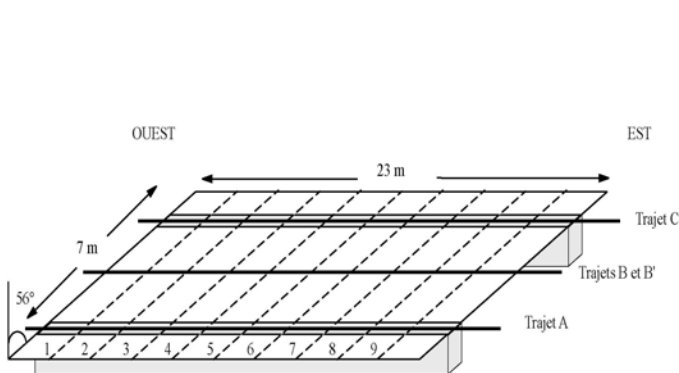
F. Hild, J.N. Périé et M. Coret : *Mesure de champ de déplacements 2-D par corrélation d'images numériques : CORRELI 2D*, Rapport interne LMT no 230, décembre 1999.

E Astudillo, S. Calloch, F. Hild, G. Bernier et B. Raka: *Etude du comportement biaxial d'un microbéton armé de fibres par intercorrélation d'images*, Actes du congrès "Photomécanique 2001", Poitiers, France, 24-26 avril 2001.

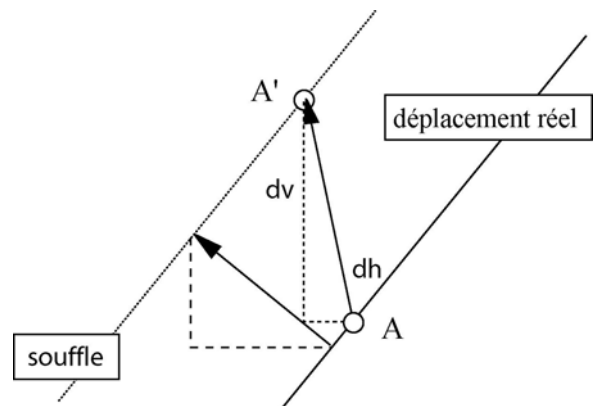
A. Mor, B.C. Gerwick et W.T. Hester : *Fatigue of high-strength reinforced concrete*, ACI Materials Journal, **89**, 197-207, 1992.

J.P. Perron: *Essai de chargement et télésurveillance sur un pont en béton armé*, mémoire de maîtrise, département de génie civil, Université Laval, 2004.

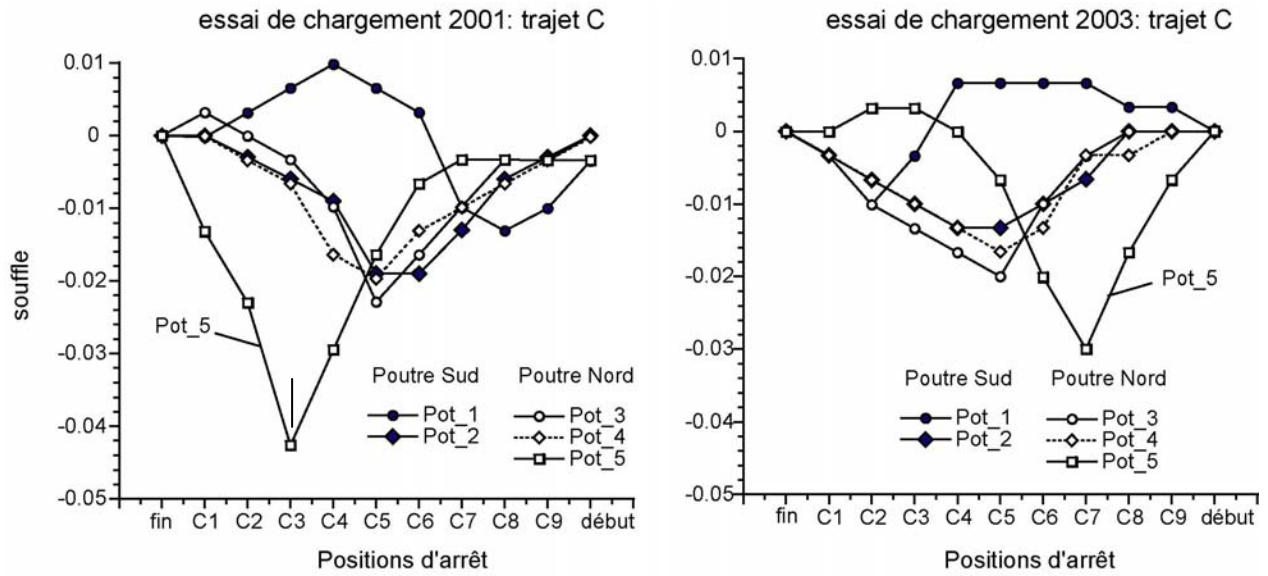
M. Savard: *Surveillance électronique du comportement en service d'un pont routier en béton armé*, Innovation Transport, **13**, 3-10, 2002.



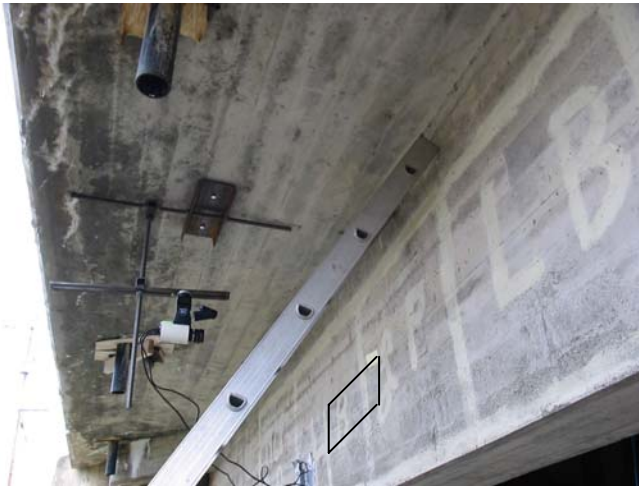
**Figure 1:** Caractéristiques géométriques du pont de Saint-Marcel et localisation des trajets et des positions d'arrêts utilisés au cours de l'essai de chargement.



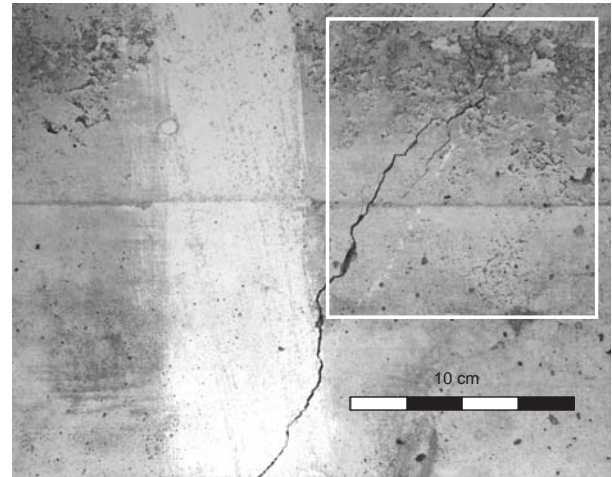
**Figure 2:** Illustration des limitations du potentiomètre pour l'évaluation des déplacements le long d'une fissure sollicitée en cisaillement.



**Figure 3:** Comparaison de l'évolution du souffle des différentes fissures instrumentées du pont de Saint-Marcel mesuré sur le trajet C au cours des deux essais de chargement. L'amplitude des déplacements la plus grande est enregistrée au niveau de la fissure #5, située à l'extrémité Est de la poutre Nord.

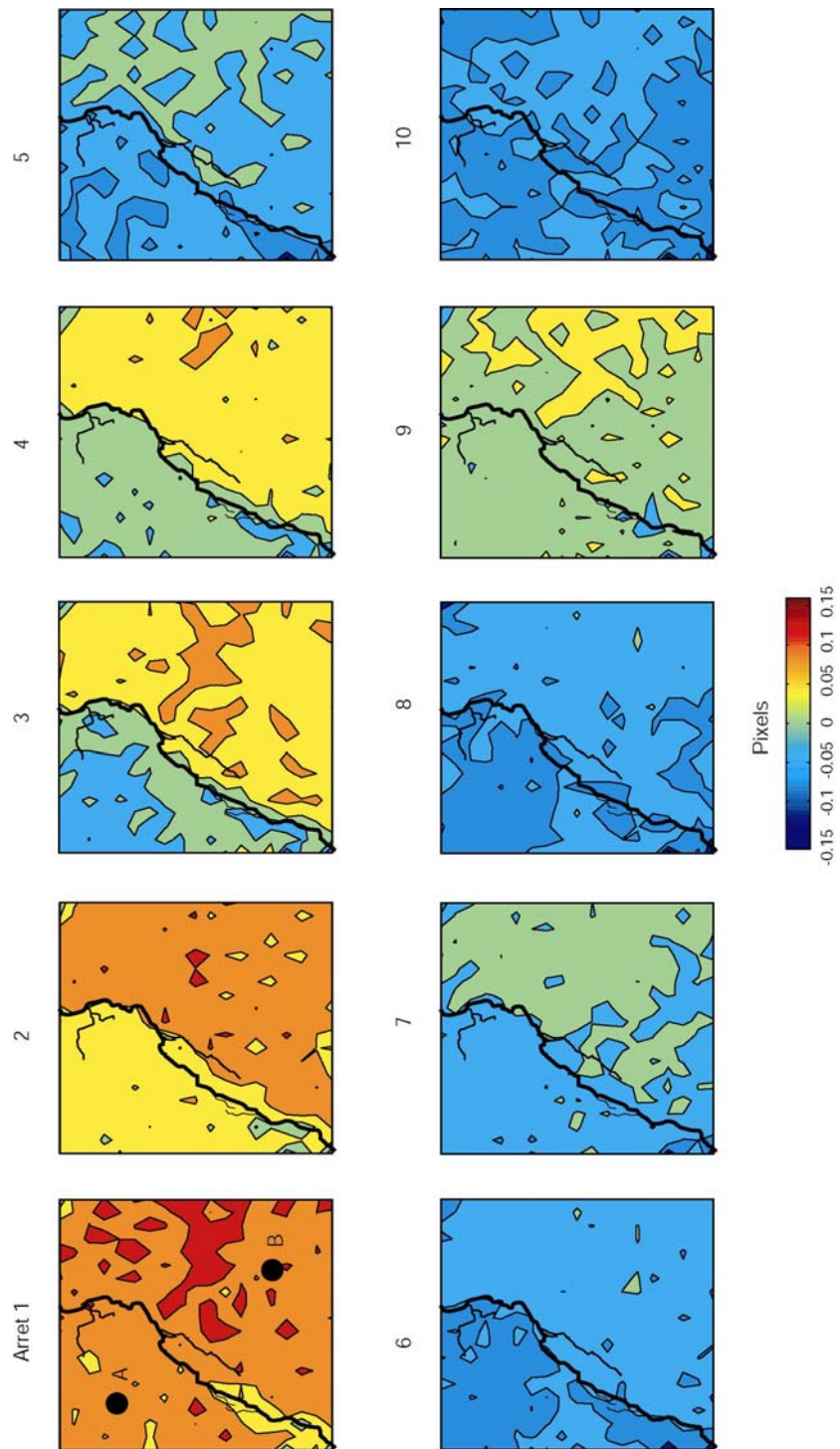


**Figure 4:** Une vue de la caméra CCD amarrée sur le porte-à-faux du pont. Le cadre noir permet de localiser approximativement la zone d'étude sur laquelle l'analyse de la déformation a été effectuée.

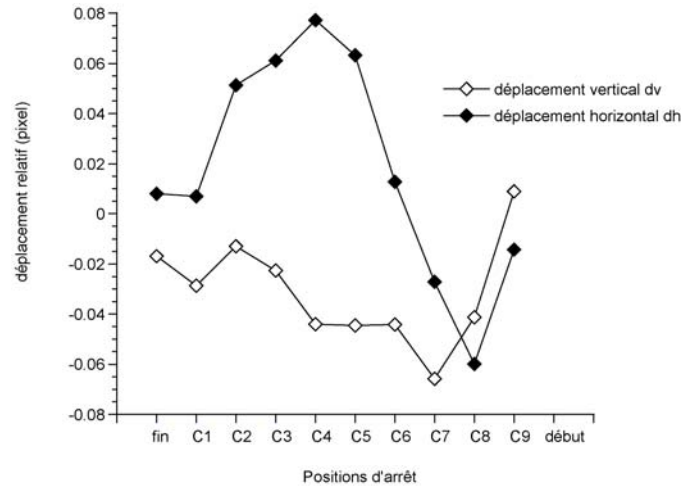
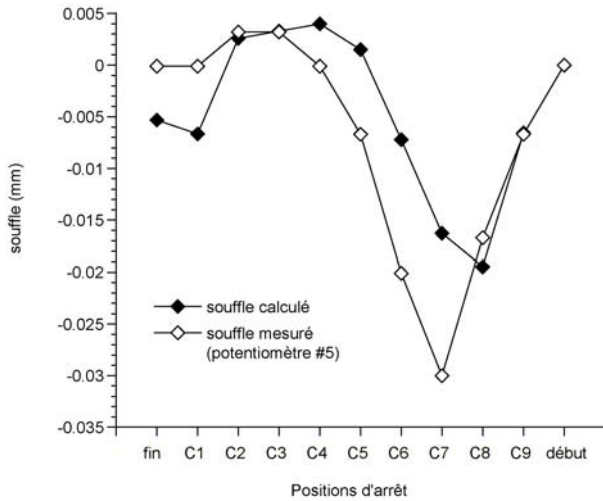


**Figure 5:** Une image de la zone d'étude enregistrée à partir de la caméra CCD en place



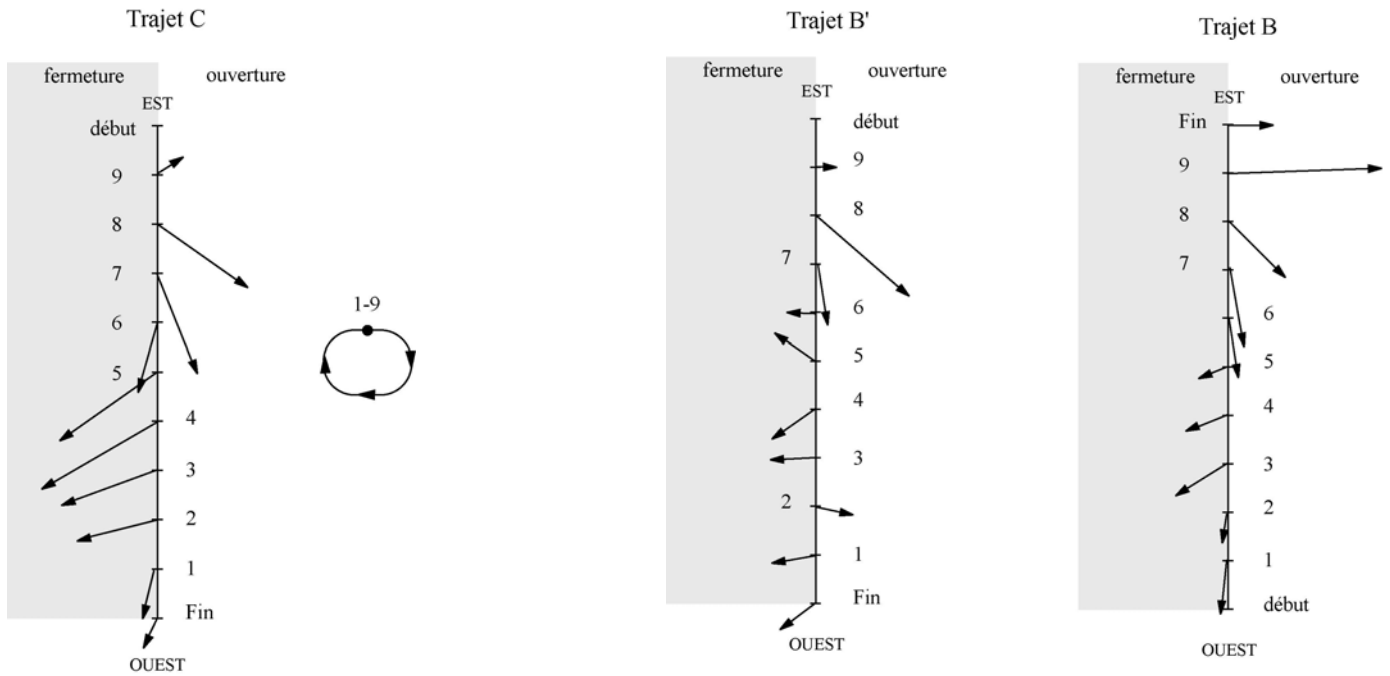


**Figure 6:** Représentation des cartes successives de la composante verticale du déplacement  $dv$  pour les différentes positions d'arrêt du trajet C. Les deux points sélectionnés pour l'analyse quantitative du déplacement relatif entre les deux segments de poutre délimités par la fissure ont été identifiés sur la première image.



**Figure 7:** comparaison entre le souffle mesuré par le potentiomètre #5 et le souffle reconstitué à partir des composantes horizontales dh et verticales dv de deux points situés de part et d’autre de la fissure.

**Figure 8:** Illustration des trajectoires relatives selon x et y entre des deux segments de poutre séparés par la fissure au cours du trajet C.



**Figure 9:** Synthèse des déplacements calculés par intercorrélation d’images le long de la fissure pour les différentes positions d’arrêt du trajet C. Chaque vecteur représente le déplacement de la portion de poutre située à l’ouest de la fissure, la portion Est étant supposée immobile.

**Figure10:** Synthèse des déplacements calculés par intercorrélation d’images le long de la fissure pour les différentes positions d’arrêt des trajets B et B’.