

Application des capteurs à fibre optique Fabry-Pérot pour le suivi à long terme de structures en béton

Marco QUIRION
Chercheur Post doctorant

Gérard BALLIVY
Professeur titulaire

Centre de recherche interuniversitaire sur les bétons (CRIB)
Département de génie civil
Université de Sherbrooke
Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1

RÉSUMÉ

Les travaux de réhabilitation du stationnement Webster, construit dans les années 1960, et la construction de la passerelle piétonnière, tous deux à Sherbrooke au Québec, ont débuté respectivement au cours des années 1996 et 1997. À cette période, de tous nouveaux capteurs extensométriques à fibre optique de type Fabry-Pérot faisaient leur apparition dans le domaine de l'instrumentation. Dans cet article, on donne une description des deux projets ayant pour dénominateur commun l'application, en parallèle, de capteurs à fibre optique et à corde vibrante pour le suivi à long terme des déformations du béton. Les résultats du suivi, effectué sur une période de deux ans, montrent que les variations de déformation, mesurées avec les deux types de capteurs, s'accordent bien entre elles ainsi qu'avec la dilatation thermique des éléments structuraux. Aussi, l'instrumentation permet, dans le cas du stationnement Webster, de diagnostiquer certains désordres dans le comportement des matériaux de réhabilitation.

MOTS CLÉS : Capteur - Mesure - Béton projeté - Déformation - Extensomètre - Fibre optique - Recyclage (matér.) - Béton de poudres réactives.

Introduction

Depuis quelques années déjà, les capteurs à fibre optique sont disponibles pour l'instrumentation géotechnique ou structurale. Diverses technologies de capteurs à fibre optique ont été développées et plusieurs applications de cette nouvelle génération de capteurs sont maintenant répertoriées. Au Canada, les chercheurs des centres ISIS (Innovations en structures avec systèmes de détection intégrés) utilisent les capteurs à fibre optique Bragg dans divers projets (Neale et Labossière, 1998 ; Rizkalla, 1997). L'application de ces capteurs pour le suivi de tunnels et de divers ouvrages de génie civil a été réalisée en Europe (Ferdinand, 1997). Les capteurs de type microcourbures sont utilisés pour l'instrumentation des structures et notamment dans des appareils d'appui de pont instrumentés (Caussignac et al., 1992 ; Barbachi, 1994). Des capteurs polarimétriques ont été intégrés dans des chaussées et utilisés comme système de pesée en marche des véhicules (Boby et al., 1994). Les capteurs interférométriques Fabry-Pérot existent maintenant en plusieurs modèles, capteurs de température, déplacement, pression et déformation (Choquet et al., 1997). Cet article porte sur l'application du capteur Fabry-Pérot conçu pour la mesure des déformations internes du béton soit le capteur à fibre optique (CFO) de type noyé.

Divers projets d'instrumentation sur sites sont actuellement en cours et ils permettront d'évaluer la robustesse, la longévité et la réponse de ces capteurs. La réfection du stationnement Webster (fig. 1) et la construction de la passerelle piétonnière de Sherbrooke (fig. 2) ont débuté respectivement au cours des années 1996 et 1997. Le texte qui suit présente, dans l'ordre chronologique, ces projets ayant pour dénominateur commun l'application, en parallèle, de capteurs à fibre optique et à corde vibrante pour le suivi des déformations du béton. Il est présenté ici les résultats du suivi, sur une période d'environ deux ans, des extensomètres à corde vibrante et à fibre optique installés dans divers éléments structuraux. Pour chaque projet, l'installation d'instruments a un objectif spécifique mais, pour les deux projets, on s'intéresse à comparer la performance des deux types de capteurs utilisés à diverses applications : l'instrumentation d'une structure réhabilitée et d'une structure récente, toutes deux en béton. La mesure de déformations ponctuelles à des endroits précis de ces structures permettra, dans le cas de Webster, de vérifier l'adhérence des matériaux de réhabilitation et, pour la passerelle, de mieux connaître le comportement structural à plus long terme. Cette étude permettra aussi aux ingénieurs et chercheurs de mieux connaître la technologie des capteurs à fibre optique pour l'instrumentation de structures en béton.

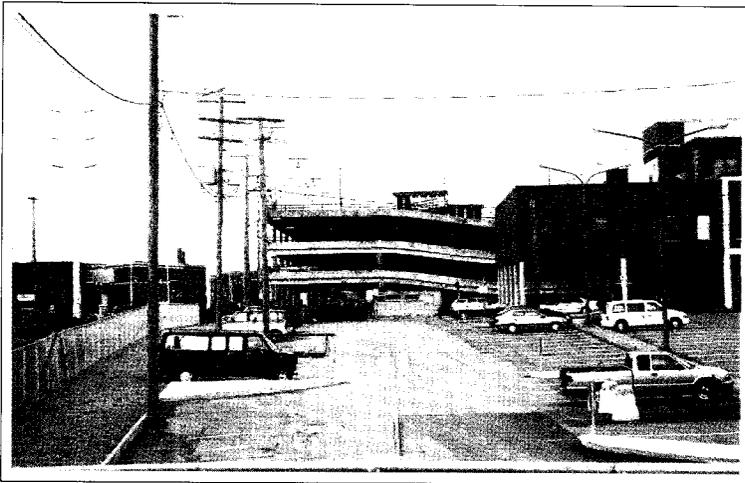
Capteurs de déformations considérés

Les projets d'instrumentation qui sont présentés dans cet article intègrent plusieurs instruments de mesures. On compte parmi ceux-ci le capteur à fibre optique (CFO) de type Fabry-Pérot et la corde vibrante conventionnelle noyée. D'autres instruments tels des fissuromètres, clinomètres, thermocouples, cordes vibrantes de surface et des jauges électriques pour câble d'acier ont aussi été utilisés (Adeline et al., 1998). Pour les deux projets, les instruments conventionnels sont tous reliés à un système d'acquisition en continu permettant le stockage des données. En ce qui a trait aux capteurs à fibre optique, toutes les données ont été relevées manuellement avec une unité de lecture portable et, dans la mesure du possible, un relevé était effectué toutes les deux semaines. Il n'était pas possible de relier les CFO à la centrale d'acquisition des divers capteurs conventionnels. Cependant, un système d'acquisition automatique pour fibre optique de 32 canaux est actuellement installé et soumis à des essais de performance. L'avantage du système à fibre optique est qu'il permet de relier différents types de capteurs Fabry-Pérot (température, déplacement, déformation) directement au système d'acquisition sans interfaçage préalable des capteurs.

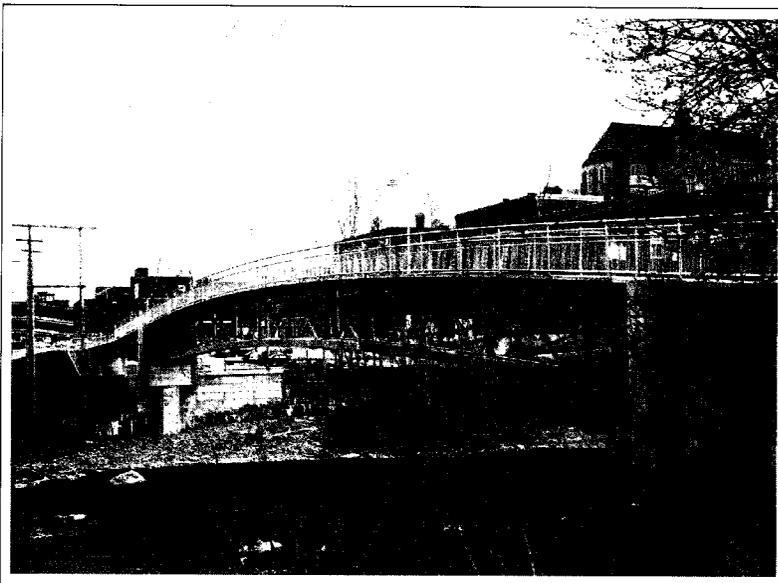
La dimension du capteur à fibre optique extrinsèque Fabry-Pérot est de 10 mm de longueur et 200 mm de diamètre. L'intégration d'un capteur de cette taille dans le béton nécessite de le protéger afin d'éviter de l'endommager et d'assurer son fonctionnement à long terme. Le capteur extrinsèque Fabry-Pérot est inséré et collé à l'intérieur d'une enveloppe en acier inoxydable. La figure 3 montre le capteur Fabry-Pérot conçu pour être noyé dans le béton. Il s'agit d'un capteur ponctuel basé sur l'interférométrie en lumière blanche. Le principe de son fonctionnement est décrit en détail par Belleville et Duplain (1993). Choquet et al. (1997) donnent une description des divers modèles de capteur Fabry-Pérot. Avec le CFO, le signal détecté est de la lumière blanche comparativement à la corde vibrante avec laquelle on mesure un signal en fréquence. Un faisceau lumineux est dirigé dans une fibre optique jusqu'à l'endroit du capteur Fabry-Pérot. La lumière est modulée, c'est-à-dire modifiée, en fonction de la déformation que subit le capteur. Elle revient ensuite à l'unité de lecture qui affiche la déformation instantanément. Parmi les avantages de ce type de capteur, on note la rapidité de lecture puisque la lumière se propage à très grande vitesse. La lecture est affichée directement en microdéformation. La lumière se propageant dans la fibre optique n'est pas sensible aux interférences créées par les ondes électromagnétiques et les radiofréquences.

Pour ce qui est des capteurs à corde vibrante, le modèle conventionnel pouvant être noyé dans le béton a été utilisé. La dimension de ces capteurs est de 90 mm de longueur comparativement à 70 mm pour le CFO. En termes d'encombrement, le capteur à corde vibrante nécessite un espace plus grand pour l'installation afin de s'assurer d'une mesure représentative de la déformation. La figure 3 montre les deux capteurs côte à côte.

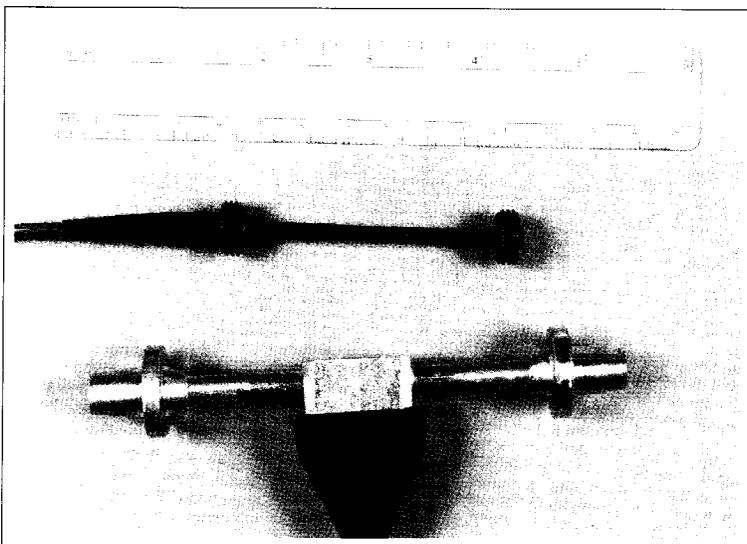
Pour les capteurs à corde vibrante, le fil d'acier tendu à l'intérieur est libre de se dilater. Il devient alors nécessaire d'effectuer une correction sur la lecture en déformation afin de tenir compte du différentiel de dilatation thermique entre l'acier de la corde et le béton. Le fil d'acier des capteurs à corde vibrante a un coefficient de dilatation thermique (CDT) de $11,5 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$. Quant au béton, le coefficient de dilatation se situe autour de $10 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$. Il existe donc une déformation parasite, reliée à la différence des divers CDT, et celle-ci est corrigée. Par ailleurs, pour les capteurs à fibre optique Fabry-Pérot noyés, une telle correction n'est pas appliquée puisque le capteur est fait de silice, ayant un coefficient de dilatation thermique de $0,54 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$, et il est collé dans l'enveloppe d'acier qui elle est solidaire du béton.



**Fig. 1 -
Stationnement
à étages Webster.**



**Fig. 2 -
Passerelle piétonnière
de Sherbrooke.**



**Fig. 3 -
En haut :
Capteur à fibre optique.
En bas :
Capteur à corde vibrante.**

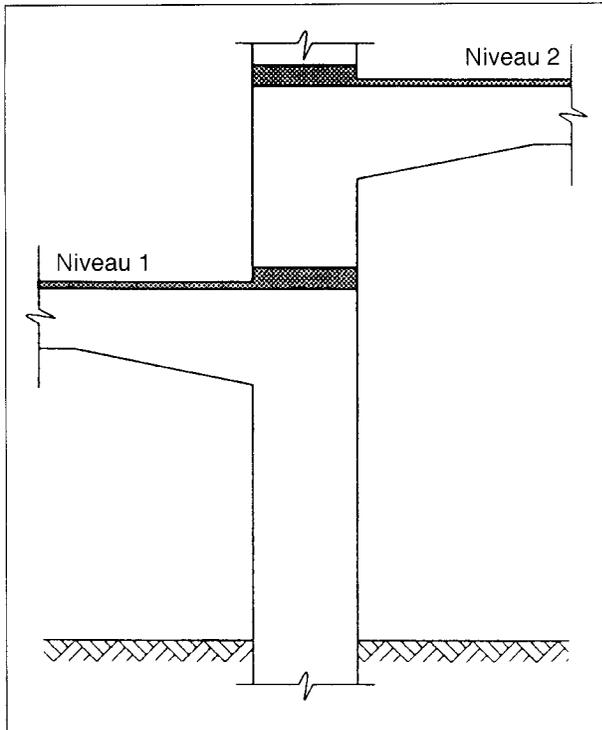


Fig. 4 - Profil type des deux premiers niveaux du stationnement Webster.

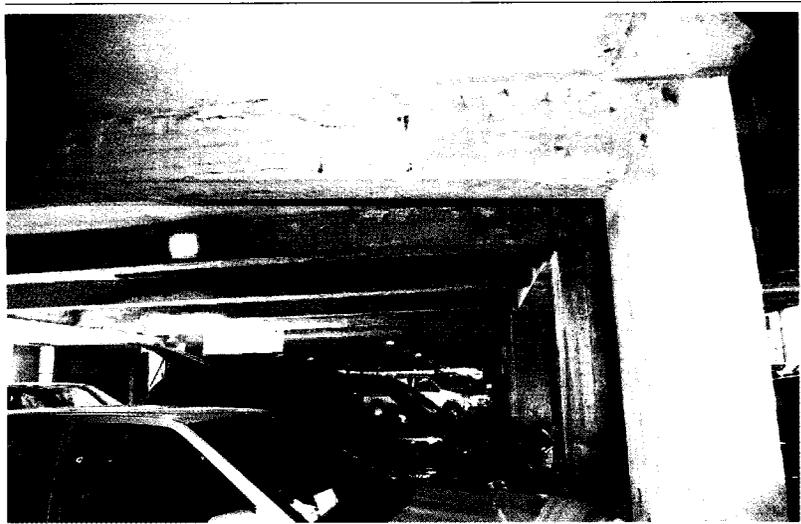


Fig. 5 - Fissures relevées dans la poutre 24 avant la réhabilitation.

TABLEAU I
Matériaux de réhabilitation utilisés
dans les poutres du stationnement Webster

Poutre	Matériau de réhabilitation
20	Béton armé conventionnel
22	Béton projeté par voie humide avec support de grillage métallique
24	Béton avec fibres d'acier projeté par voie humide
25	Béton avec fibres de polyoléfine projeté

Stationnement à étages Webster

Le stationnement à étages Webster est situé au centre-ville de Sherbrooke. Ces dernières années, des signes importants de dégradation étaient visibles sur de nombreuses poutres et poteaux ainsi que sur les dalles de béton. À la suite d'une entente entre la Ville de Sherbrooke, les chercheurs de l'université de Sherbrooke et un consultant local, la réhabilitation de ce stationnement fut effectuée. Outre la remise en état de la structure, l'utilisation de techniques innovatrices figurait parmi les objectifs de cette réhabilitation. En effet, sur une partie du stationnement, diverses technologies de pointe pour le diagnostic et la réfection ont été utilisées : des méthodes non destructives pour l'évaluation de la dégradation de certaines poutres et colonnes, des mélanges spéciaux de béton projeté, des matériaux composites et la mise en place d'instruments. Des capteurs de déformation à fibre optique et à corde vibrante ont été installés pour le suivi à long terme des éléments réhabilités. Ce dernier point constitue d'ailleurs l'essentiel des paragraphes qui suivent puisque l'on compare les résultats obtenus avec ces divers instruments.

Structures et matériaux de réhabilitation

Le stationnement Webster comporte six étages s'élevant au-dessus du niveau du sol (fig. 1) ; les quatre premiers étages sont construits en béton tandis qu'une ossature métallique constitue les deux derniers niveaux. La figure 4 montre le profil type des deux premiers niveaux ; l'instrumentation fut, par ailleurs, installée dans certaines poutres du premier niveau.

Une évaluation de la structure en béton a été réalisée et de nombreuses fissures ont été relevées sur les poutres et les poteaux. Les conclusions de cette évaluation indiquaient que la structure était encore viable mais une réfection s'avérait nécessaire. Ce niveau de dégradation avancée ne pourrait que s'aggraver avec le temps à cause des cycles de gel/dégel et de l'infiltration de l'eau dans les nombreuses fissures relevées. La figure 5 montre une fissure importante observée dans la poutre 24 supportant le premier niveau.

Lors de la réfection, une partie du stationnement fut réservée à l'expérimentation de divers mélanges de béton pour la réparation des poutres. Cette partie, comportant six poutres encastées, a ainsi été réhabilitée avec divers types de béton. Aussi, différents instruments ont été installés dans quatre de ces poutres lors de la réfection afin de suivre l'efficacité à long terme des diverses techniques de réhabilitation et, plus précisément, l'adhérence du nouveau béton aux poutres existantes. Les matériaux utilisés pour la réfection comprennent du béton conventionnel ainsi que du béton projeté contenant divers ajouts. Le tableau 1 présente les matériaux utilisés seulement pour les poutres instrumentées.

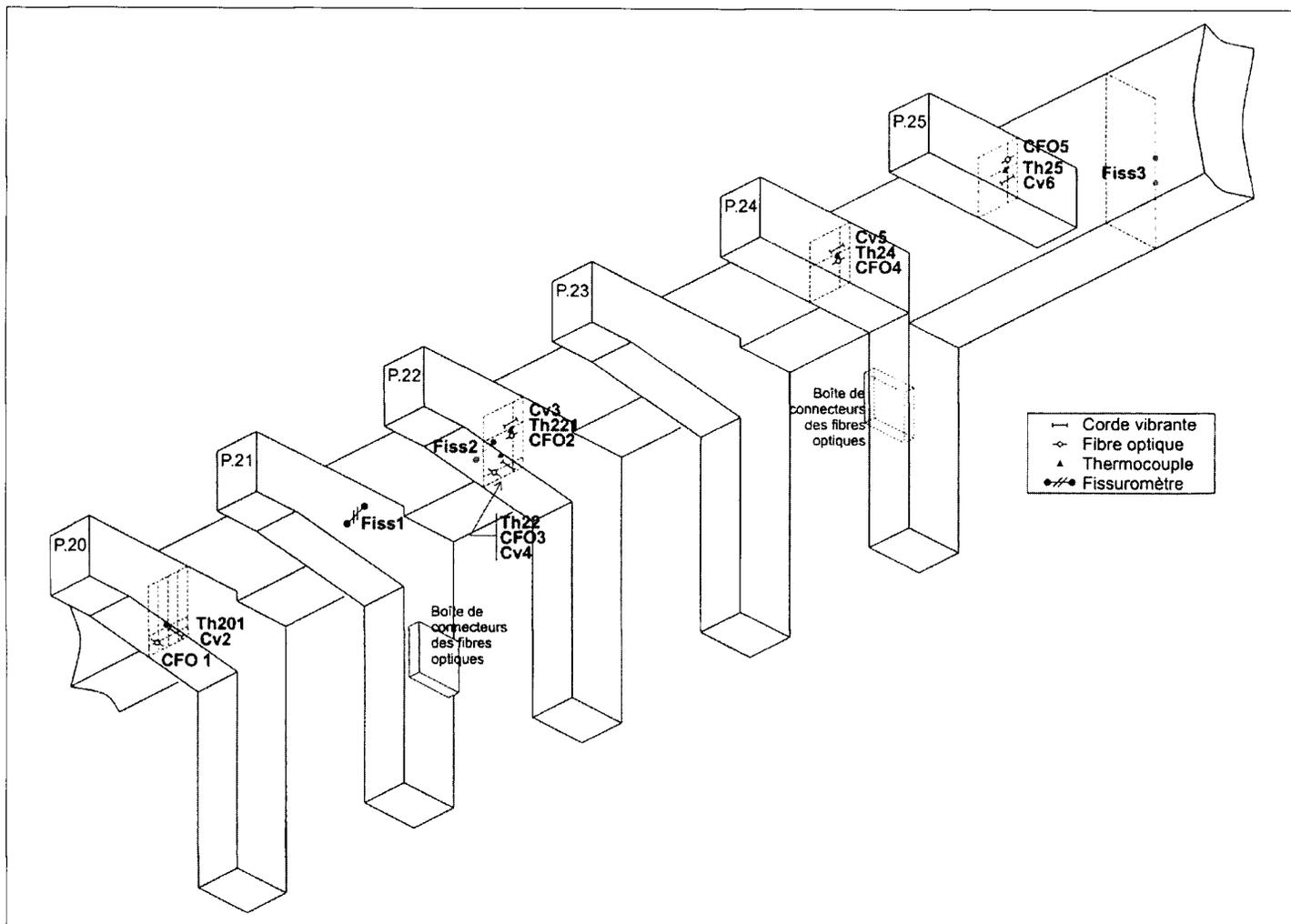


Fig. 6 - Schéma montrant la position des instruments dans les poutres réhabilitées.

Instrumentation

La figure 6 présente un schéma montrant la jonction des poutres transversales 20 à 25 avec la poutre longitudinale. La localisation des extensomètres à corde vibrante et à fibre optique, des thermocouples et des fissuromètres est montrée sur cette figure. Lors de l'installation, on a pris soin de placer un capteur à fibre optique et un à corde vibrante à proximité l'un de l'autre afin d'établir les comparaisons qui suivent.

La réhabilitation de ces poutres a été, en majeure partie, effectuée à l'aide de béton projeté ; les capteurs ont donc été préalablement noyés dans une petite briquette constituée du même béton. Cette dernière a ensuite été fixée le lendemain sur la surface à réparer, ce qui évite d'endommager les capteurs lors de la projection du béton. Les briquettes ont été coulées dans des moules rainurés afin d'assurer la liaison avec le béton projeté. Par ailleurs, trois fissuromètres de type potentiométrique ont été installés (fig. 6) dans le but de suivre des fis-

sures importantes détectées dans les poutres. On s'intéresse aux données enregistrées avec le fissuromètre FISS 2, ancré dans la poutre 22, car il permet de suivre une fissure oblique active localisée à proximité des divers CFO et CV de cette poutre.

Résultats

Les figures 7 à 11 montrent les variations de déformation des diverses poutres mesurées à partir du 28 novembre 1996 avec les capteurs à corde vibrante et à fibre optique. Sur les graphiques, il est possible d'observer les variations saisonnières ainsi que les variations journalières représentées par la série de petites crêtes sur les diverses courbes. Dans un premier temps, on compare, à titre indicatif, les données des CFO avec la dilatation thermique supposée des divers éléments de béton (fig. 7a, fig. 8a, fig. 9a, fig. 10a et fig. 11a). Plusieurs matériaux ont été utilisés pour la réhabilitation des poutres et le coefficient de dilatation thermique exacte de chacun

de ceux-ci n'est pas connu. Cependant, les bétons présentent un coefficient se situant généralement entre 6 et $12 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ (Neville, 1996). Afin de calculer la dilatation thermique des divers éléments structuraux réhabilités, on suppose un coefficient de dilatation thermique moyen de $10 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ pour tous les matériaux. Quant à la variation de température, celle-ci est calculée à partir des données de température des divers thermocouples qui sont montrées sur les divers graphiques. Ceci permet donc d'obtenir la dilatation thermique supposée des divers éléments et celles-ci est reportée sur les graphiques. Bien entendu, il s'agit d'une estimation permettant simplement de vérifier le niveau approximatif de la déformation thermique de la structure et de comparer celle-ci aux valeurs de déformation obtenues avec les divers capteurs.

Les données des extensomètres à corde vibrante sont ensuite comparées avec celles obtenues avec les capteurs à fibre optique (fig. 7b, fig. 8b, fig. 9b, fig. 10b et fig. 11b). L'analyse des résultats montre que les données des CFO s'approchent de la dilatation thermique supposée des éléments structuraux ainsi qu'aux données des cordes vibrantes.

Les instruments de la poutre 20, noyés directement dans un béton conventionnel, enregistrent des déformations variant de -100 à $+200 \mu\epsilon$ et cela, pour deux années consécutives ; le comportement est donc stable après la réhabilitation. Les résultats du CFO s'écartent de la dilatation thermique supposée mais rappelons que le coefficient de dilatation thermique (CDT) supposé de $10 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ne sert que d'indication pour obtenir l'ordre de grandeur des variations de déformation (fig. 7a et b).

Quant aux instruments CV 4 et CFO 3, fixés dans des briquettes et installés à la base de la poutre 22, ils présentent un écart notable entre eux ainsi qu'avec la dilatation thermique supposée (fig. 8a et b). Avant la réfection, une fissure importante, située à la base de la poutre, a été relevée. Aussi, compte-tenu de l'importance de cette fissure, un fissuromètre (FISS 2) a été installé dans le but de vérifier le mouvement éventuel de cette fissure après la réfection. La figure 8c, montre que les déplacements enregistrés avec le FISS 2 sont certainement liés aussi à l'évolution de la fissure. Par ailleurs, l'écart existant entre les déformations enregistrées avec les instruments CFO 3 et CV 4 est certainement relié au fait que les capteurs ne sont pas situés exactement au même endroit à la base de la poutre mais ils sont séparés de 250 mm (fig. 6).

Les capteurs CFO 2 et CV 3 sont aussi montés dans des briquettes et placés dans la partie latérale de la poutre 22. L'analyse de la figure 9a

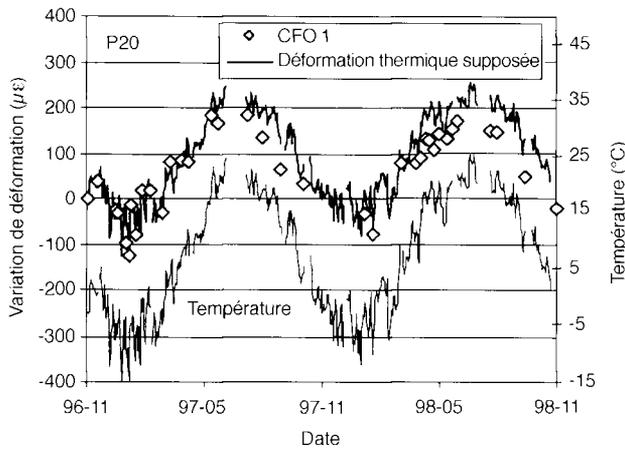
montre que les déformations correspondent à la dilatation thermique supposée. Par contre, la figure 9b montre que le niveau de déformation enregistré correspondant à une traction est plus élevé autour du mois de juillet 1998 comparativement à celui de juillet 1997. Il est probable qu'un décollement du matériau de réfection se soit produit. L'absence de données des instruments pour la période de mars à juillet 1997 s'explique simplement par l'impossibilité de relever les lectures car l'un des connecteurs n'était pas accessible et ceci a été corrigé par l'ajout d'une rallonge.

Les instruments CFO 4 et CV 5 sont montés dans des briquettes et installés dans la poutre 24. Les données de ces instruments s'écartent de la dilatation thermique supposée (fig. 10a). Le béton projeté de la poutre 24 est constitué de fibres métalliques et la valeur du coefficient de dilatation thermique supposé (CDT) de $10 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ est probablement trop faible. Par contre, une valeur du CDT de $12 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ fournit une bonne corrélation avec les données des instruments. Ces derniers sont aussi dédiés à la détection d'un éventuel décollement du parement de béton projeté et on observe un comportement similaire à la poutre 22. En effet, les déformations enregistrées avec les capteurs CFO et CV 5 sont plus élevées au mois de juillet 1998 comparativement à celles obtenues un an plus tôt (fig. 10b).

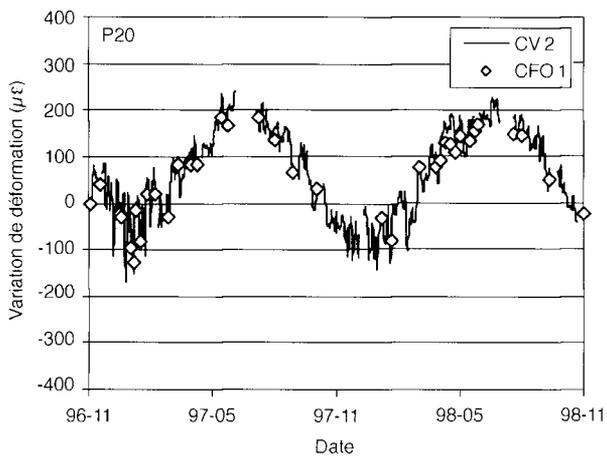
Pour la poutre 25, les instruments CFO 5 et CV 6 sont aussi montés dans des briquettes de béton. Dans ce cas, les lectures de déformation ne montrent pas de signe clair de décollement puisqu'elles sont à peu près du même niveau, variant de -100 à près de $300 \mu\epsilon$ après deux ans (fig. 11a et b).

Ces résultats montrent que l'application des capteurs à corde vibrante et à fibre optique dans des projets de réfection, où l'épaisseur de la réparation est relativement mince, de l'ordre de 15 cm, comparativement à l'élément structural, est possible. Aussi, les déformations mesurées avec les deux types d'instruments sont similaires. L'installation au préalable des instruments dans des briquettes de béton, de même composition que le béton utilisé pour la réhabilitation, ne perturbe pas les mesures de déformation. Enfin, avec les deux types d'instruments, on détecte bien les anomalies de déformation probablement liées à des décollements dans le cas des poutres 22 et 24 ou à l'évolution d'une fissure comme pour la base de la poutre 22. Par ailleurs, le comportement des poutres 20 et 25 est stable depuis la réhabilitation.

Fig. 7 - Poutre 20

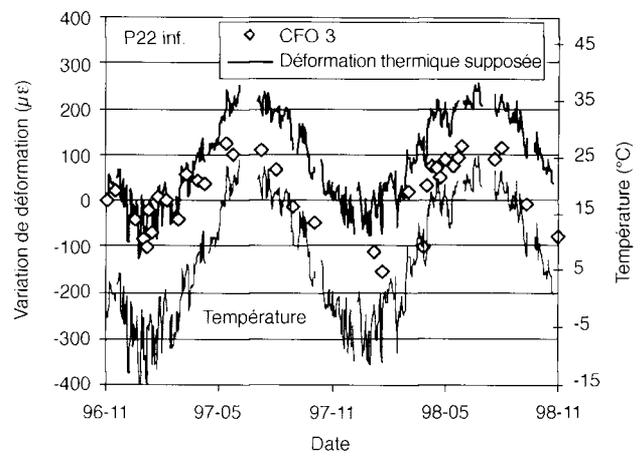


a. Variations de déformation thermique supposée et mesures du capteur CFO 1.

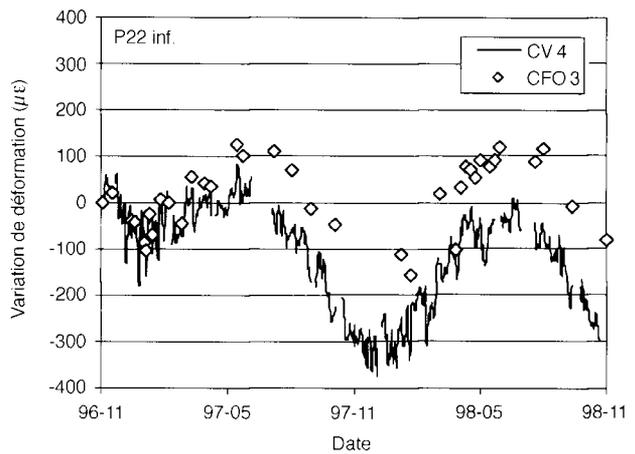


b. Mesures du capteur CFO 1 et de la CV 2.

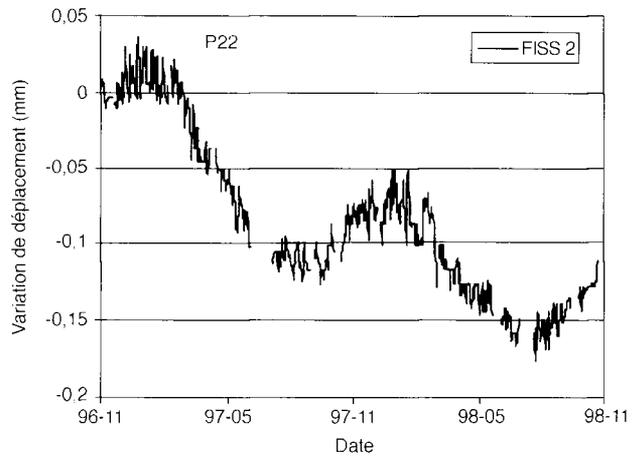
Fig. 8 - Poutre 22



a. Variations de déformation thermique supposée et mesures du capteur CFO 3.

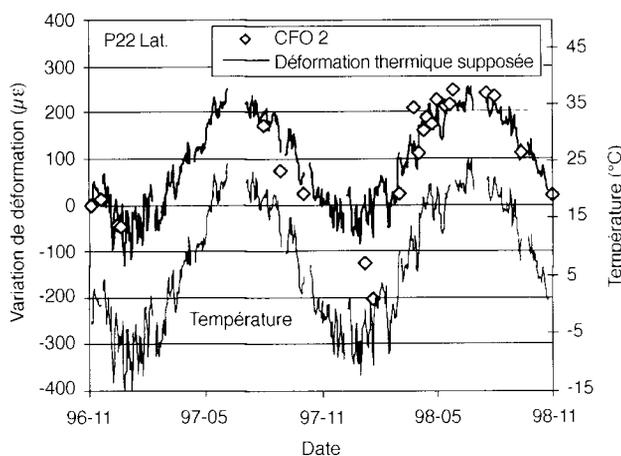


b. Mesures du capteur CFO 3 et de la CV 4.

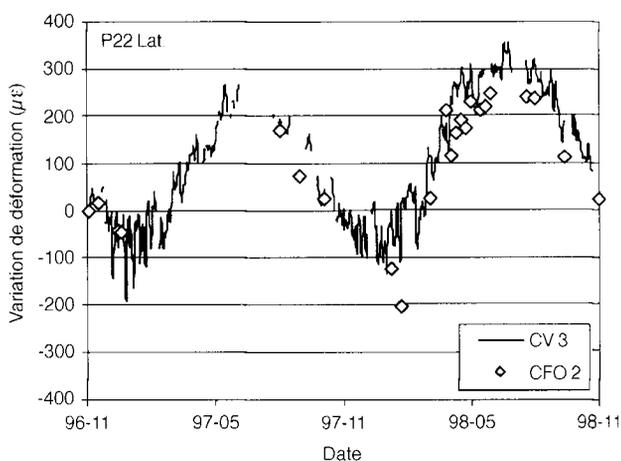


c. Variations de déplacement mesurées avec le FISS 2.

Fig. 9 - Poutre 22

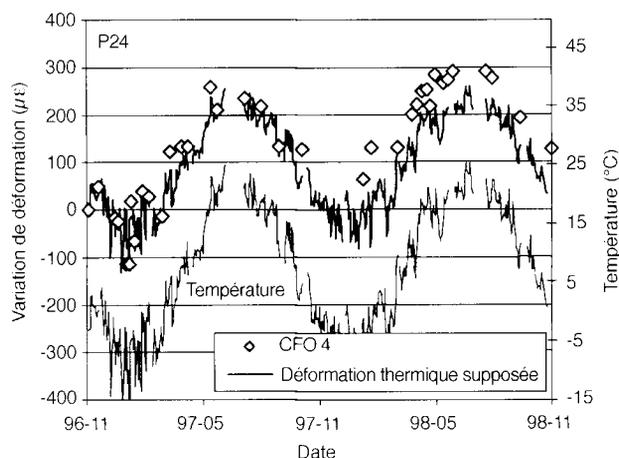


a. Variations de déformation thermique supposée et mesures du capteur CFO 2.

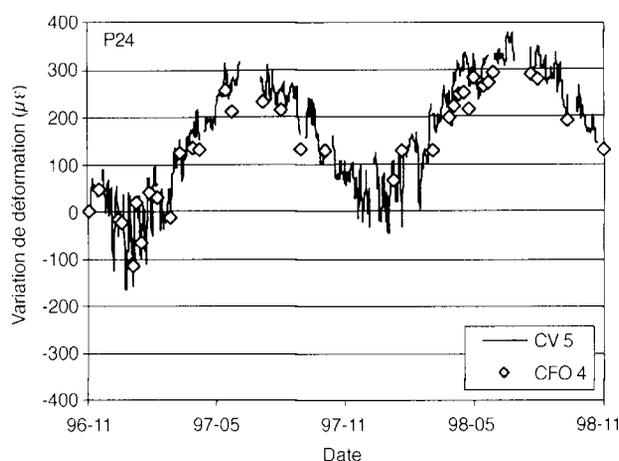


b. Mesures du capteur CFO 2 et de la CV 3.

Fig. 10 - Poutre 24



a. Variations de déformation thermique supposée et mesures du capteur CFO 4.



b. Mesures du capteur CFO 4 et de la CV 5.

Passerelle piétonnière de Sherbrooke

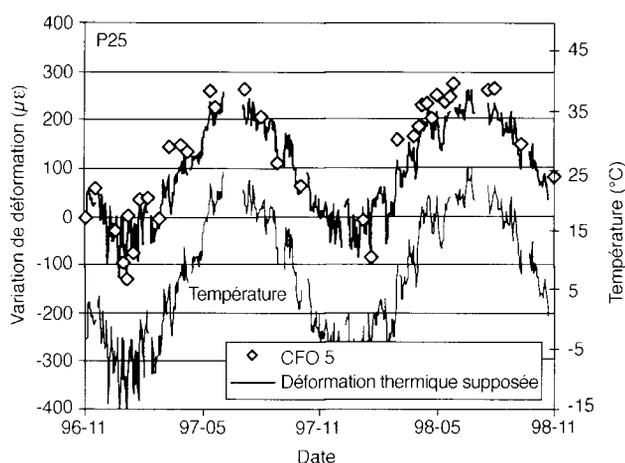
La passerelle piétonnière de Sherbrooke, qui franchit la rivière Magog, est en béton de poudre réactive (BPR) et les accès, situés de chaque côté, sont en béton à haute performance (BHP). L'utilisation de BPR pour la construction d'une structure de ce type constitue une première mondiale. La conception et la réalisation de cette structure sont le fruit d'une collaboration franco-québécoise regroupant plusieurs intervenants, dont l'entreprise Bouygues en France et les chercheurs de l'université de Sherbrooke. L'un des objectifs de ce projet est l'instrumentation de plusieurs éléments structuraux de la passerelle, qui permettront de mieux comprendre son com-

portement à long terme. Ces résultats serviront ultérieurement au dimensionnement de structures construites avec ce nouveau béton. On s'intéresse là aussi à l'installation et à la réponse des capteurs à fibre optique et à corde vibrante noyés dans le béton.

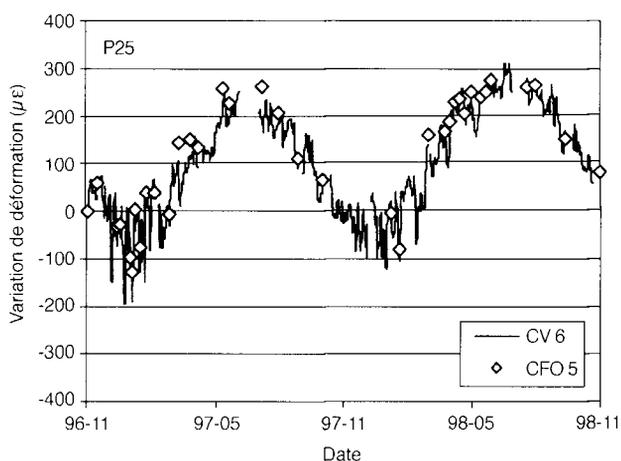
Béton de poudre réactive (BPR)

Les bétons ordinaires offrent une résistance en compression maximale se situant autour de 40 MPa tandis que les BHP atteignent facilement 90 à 100 MPa. Selon les proportions des constituants, les ajouts utilisés et le procédé de fabrication, le BPR peut atteindre une résistance de

Fig. 11 - Poutre 25



a. Variations de déformation thermique supposée et mesures du capteur CFO 5.



b. Mesures du capteur CFO 5 et de la CV 6.

350 MPa. La microstructure particulière du BPR permet d'atteindre une telle résistance ; la matrice du BPR est beaucoup plus homogène que celle des autres types de béton car le diamètre maximal des particules entrant dans sa composition est de 300 µm. Typiquement, le BPR est constitué de ciment, fumée de silice, quartz broyé, sable, eau, superplastifiant et de fibres d'acier. En effet, ce type de béton intègre des fibres d'acier afin d'en augmenter la ductilité. La résistance et la ductilité du BPR peuvent aussi être augmentées en effectuant un confinement du béton en cours de mûrissement et aussi en améliorant la microstructure par un traitement

thermique. Dugat et al. (1995) présentent une étude détaillée du comportement mécanique de tels bétons.

La résistance en compression et le module élastique du BPR de la passerelle de Sherbrooke sont respectivement de 200 MPa et 50 GPa (Dallaire et al., 1998). Les membrures diagonales ont, quant à elles, subi un confinement lors du mûrissement et toute la structure a été soumise à un traitement thermique. En effet, après l'assemblage complet d'un voussoir, celui-ci était acheminé dans une zone de l'usine où la température atteignait 90 °C.

Dans le cas de cette structure, la source majeure des déformations est liée aux variations de la température extérieure allant généralement de -20 à +30 °C au Québec. Dans le but de faire une comparaison entre les variations de déformation mesurées avec les divers capteurs et la déformation thermique de la structure, un essai de dilatation thermique a été effectué sur deux éprouvettes du BPR. Le coefficient de dilatation thermique obtenu à partir d'un essai dans une enceinte à thermorégulateur est de 17,1 µε/°C contre 9 µε/°C pour un béton usuel.

Description de la structure

L'utilisation du BPR vise à obtenir un ouvrage léger et d'assemblage facile. La passerelle, d'une longueur de 60 m et d'une largeur de 3,3 m, est constituée de six voussoirs de 10 m de longueur préfabriqués et assemblés sur le site. Le hourdis supérieur et la poutre inférieure sont, tout comme les membrures diagonales (fig. 12 et fig. 15), fabriquées en BPR, à la différence près que le béton des membrures est coulé dans un cylindre d'acier.

Pour la fabrication des membrures, le BPR est coulé dans un tube d'acier qui contient deux câbles d'acier précontraints, et qui permettra de fixer la membrure aux poutres supérieure et inférieure à l'aide d'ancrages monoton. Par ailleurs, après le coulage du BPR dans le tube d'acier, il est comprimé à l'aide d'un bâti spécial en usine afin de créer un confinement qui augmentera sa résistance et sa ductilité. La figure 13 montre deux membrures d'essais installées dans le bâti avec lequel est exercé le confinement. À la sortie située à la base du tube, des ancres permettent de maintenir la tension dans les câbles. Lors de cet essai préliminaire, la procédure d'installation des capteurs à corde vibrante et à fibre optique dans les membrures a été vérifiée. Quant aux poutres supérieure et inférieure, elles sont moulées et assemblées en usine avec les membrures pour former un voussoir.

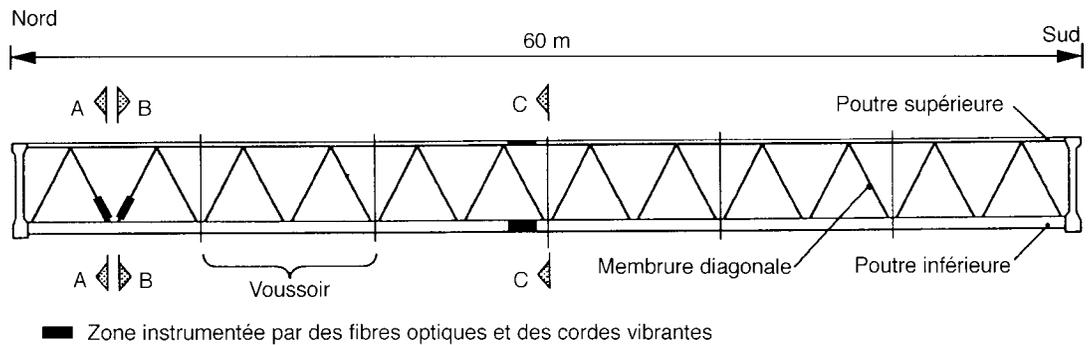


Fig. 12 - Schéma des voussoirs en BPR constituant la passerelle piétonnière et position des zones instrumentées.

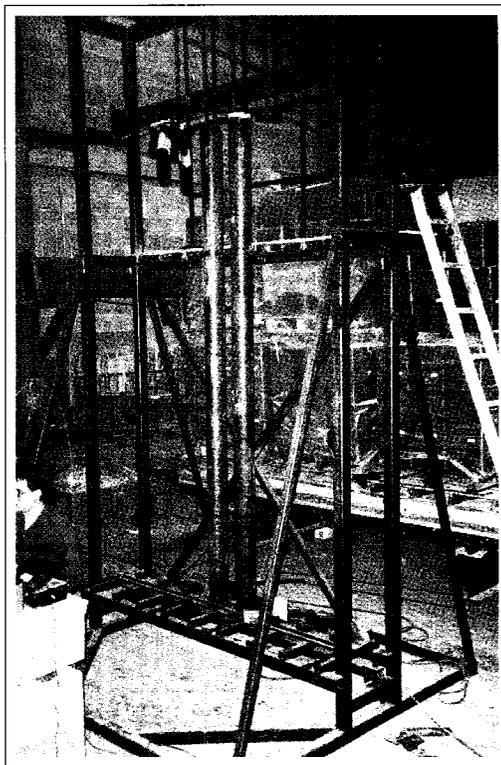


Fig. 13 - Tubes métalliques servant de membrures installés dans le bâti permettant de comprimer le BPR lors du mûrissement.

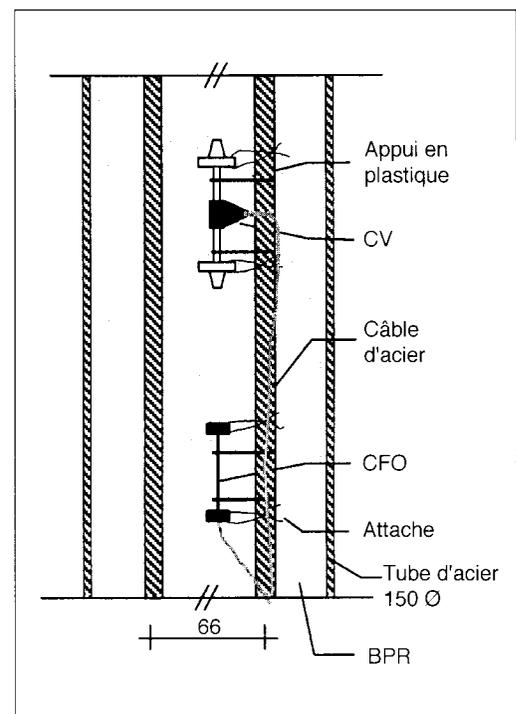


Fig. 14 - Schéma de fixation des cordes vibrantes et des capteurs à fibre optique Fabry-Pérot dans les membrures.

Instrumentation

Afin de suivre le comportement à long terme de cet ouvrage ainsi que ses performances lors d'essais de chargement, des extensomètres à corde vibrante (CV) et à fibre optique (CFO) ont été noyés dans la structure en plus de nombreux thermocouples. Les instruments dans les membrures sont fixés à différents niveaux sur l'un des câbles d'acier traversant ces dernières. Des fixations en plastique ont permis de centrer l'instrument par rapport au diamètre de la membrure (fig. 14). Pour cette étape, la taille réduite des

CFO par rapport aux capteurs à corde vibrante rendait leur installation beaucoup plus facile puisque la sortie des fils n'est pas encombrante comme pour les capteurs à corde vibrante.

Pour ce qui est des capteurs noyés dans les poutres, ceux-ci ont été installés dans les moules à l'usine avant le coulage du béton. Le câblage et le branchement des instruments aux systèmes d'acquisition ont été réalisés une fois les voussoirs arrivés sur le site.

Étant donné la complexité de la structure et les nombreuses étapes de montage, certains instru-

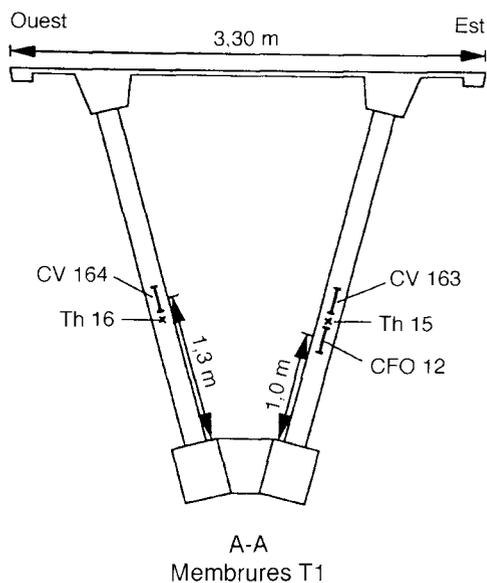


Fig. 15 - Positionnement des instruments enfouis dans les membrures en tension T1.

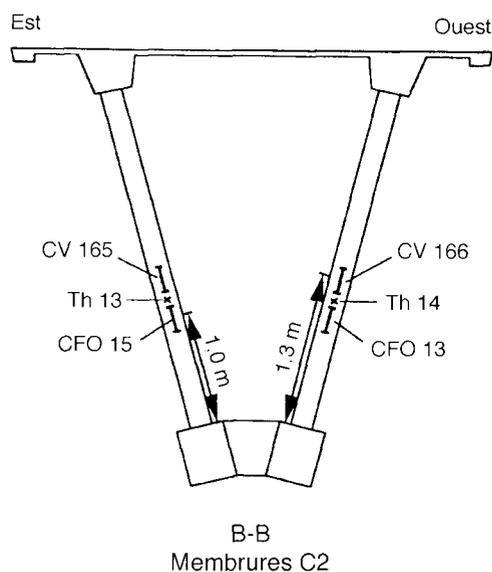


Fig. 16 - Position des instruments dans les membrures en compression C2.

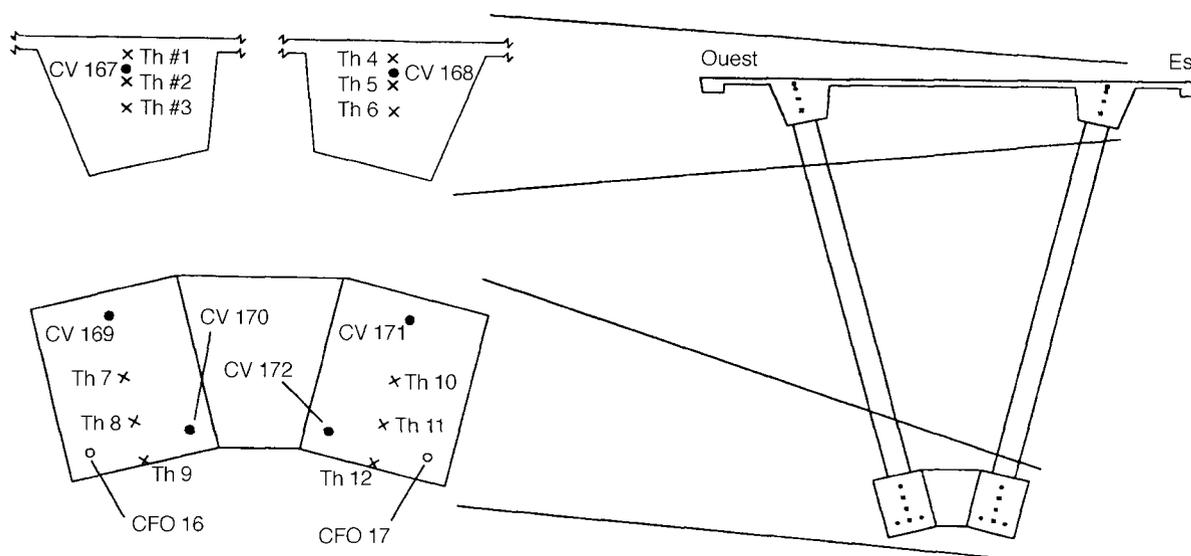


Fig. 17 - Position des instruments dans les poutres inférieure et supérieure.

ments ne sont plus fonctionnels, autant ceux à corde vibrante qu'à fibre optique. Le nombre d'instruments dans les membrures et les poutres avait, du reste, été doublé afin de s'assurer qu'un suivi à long terme de la structure demeure possible. La position précise des instruments est montrée aux figures 15, 16 et 17. Au total, trois capteurs à corde vibrante ont été perdus complètement (CV 163, 164 et 169) tandis que certains fonctionnent sporadiquement (CV 170 et 171). Pour ce qui est des fibres optiques, deux capteurs ont été perdus (CFO 13 et 17)

sur un totale de cinq. Mentionnons que les capteurs n'étaient pas fonctionnels à l'arrivée des voussoirs sur le chantier; les câbles ou les instruments ont peut-être été endommagés, soit lors du coulage du BPR, de la compression du BPR dans les membrures, de l'assemblage en usine ou encore lors de la manutention et cela, malgré la multitude de précautions prises. Néanmoins, un nombre suffisant d'instruments permet d'effectuer le suivi et d'établir certaines comparaisons.

Résultats

Les résultats obtenus avec les capteurs à fibre optique et à corde vibrante couvrent la fin de 1997 jusqu'au début du mois de juin 1999. Les graphiques des figures 18, 19a et 20a montrent les variations de déformation relevées avec les capteurs à fibre optique en comparaison avec la dilatation thermique du BPR. Le coefficient de $17,1 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ déterminé préalablement est utilisé et la variation de température est obtenue avec les thermocouples localisés à proximité.

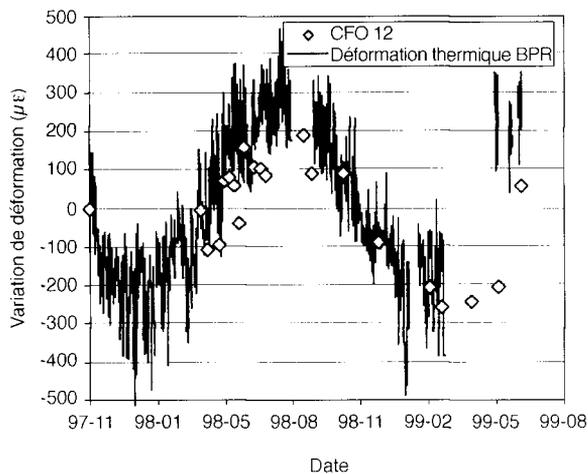


Fig. 18 - Variations de déformation thermique et mesures du capteur CFO 12 installé dans la membrure T1-Est.

Les figures 19b et 20b montrent les résultats obtenus respectivement pour les couples de capteurs CFO 15-CV 165 et CFO 16-CV 170. Comme mentionné auparavant, le capteur CV 170 fonctionne sporadiquement. Le capteur CFO 12, localisé dans une membrure, permet de mesurer les variations de déformation (fig. 18).

L'examen des figures 19a et 19b indique qu'il y a correspondance entre les variations de déformation mesurées par le capteur CFO 15, variant entre $-200 \mu\epsilon$ et $+300 \mu\epsilon$, la dilatation thermique du béton et les valeurs de la CV 165. Par ailleurs, les déformations enregistrées avec le CFO sont légèrement inférieures aux déformations thermiques. Cela dit, la valeur de $17,1 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ne tient pas compte du fait que le béton de la membrure est encaissé dans un tube d'acier (CDT d'environ $10 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$) et ni de la présence des deux câbles d'acier pouvant modifier le comportement thermique de la membrure. La même observation est faite pour le capteur CFO 12. Ainsi, la corde vibrante et la fibre optique n'étant pas tout à fait au même endroit dans la membrure, ceci amène quelques différences dans les résultats des deux instruments. Par ailleurs, les déformations enregistrées par le capteur CFO 16, localisé dans la poutre infé-

rieure, suivent mieux la dilatation thermique de la poutre qui, elle, n'est pas confinée dans l'acier (fig. 20a). On voit aussi que les résultats du CFO 16 correspondent avec ceux du capteur CV 170 sur la courte période de lecture de celui-ci (fig. 20b). Les déformations thermique calculées varient de $\pm 200 \mu\epsilon$; ces mesures ne sont pas prises de façon continue, aussi, elles ne représentent pas l'étendue complète des déformations.

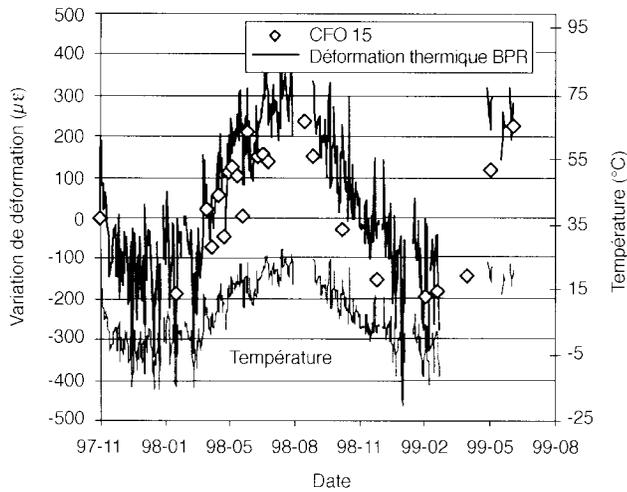
À partir des divers calculs et mesures de dilatation thermique, on peut affirmer que la déformation des éléments structuraux de la passerelle est essentiellement liée aux variations de température. Les variations de déformation sont de l'ordre de $\pm 300 \mu\epsilon$ dans les membrures et dans la poutre inférieure. Aussi, la valeur du CDT de $17,1 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ pour le BPR est confirmée par les diverses mesures de déformation.

Conclusion

Les projets de la passerelle piétonnière de Sherbrooke et de la réhabilitation du stationnement Webster ont permis de valider le comportement des capteurs à fibre optique Fabry-Pérot sur site. Les capteurs à fibre optique, tout comme les cordes vibrantes, ont été soumis lors de l'installation à des conditions sévères en usine et en chantier; certains ont même été soumis à une cure de température allant jusqu'à 90°C . Au terme de deux ans de suivi, il apparaît que la robustesse et la longévité des deux types de capteur sont comparables bien qu'il faille tout de même porter un minimum d'attention au câble à fibre optique sur le chantier. Par ailleurs, la réponse en déformation des capteurs à fibre optique et à corde vibrante sont du même ordre. Toutefois, les CFO présentent l'avantage pratique de ne pas exiger de correction liée au différentiel de dilatation thermique entre l'acier et le béton comme pour les capteurs à corde vibrante. Aussi, la faible dimension représente un avantage qui a été mis à profit notamment lors de l'installation dans les membrures de la passerelle piétonnière dans lesquelles l'espace était limité.

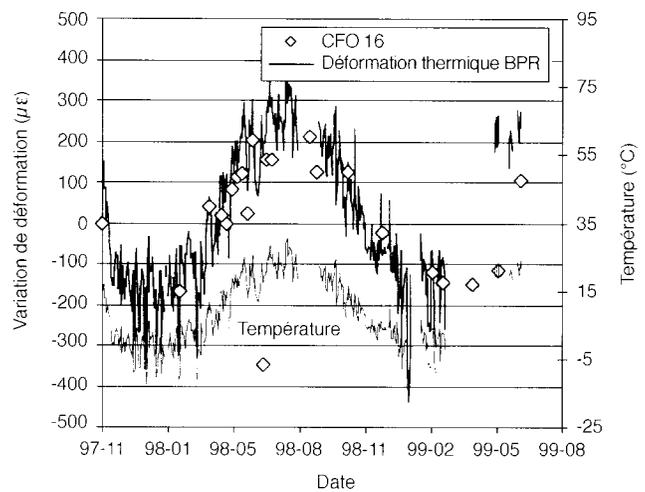
Le suivi se poursuit actuellement, dans le but de vérifier le comportement de la passerelle piétonnière et des travaux de réhabilitation du stationnement Webster. Pour ce dernier cas, les données futures des capteurs contribueront à connaître la performance des techniques de réhabilitation utilisées et une attention particulière devrait être portée aux poutres 22 et 24. Quant à la passerelle en BPR, l'essentiel de la déformation est lié aux variations de température étant donné le coefficient de dilatation thermique élevé. Ce type de déformation n'est

Fig. 19

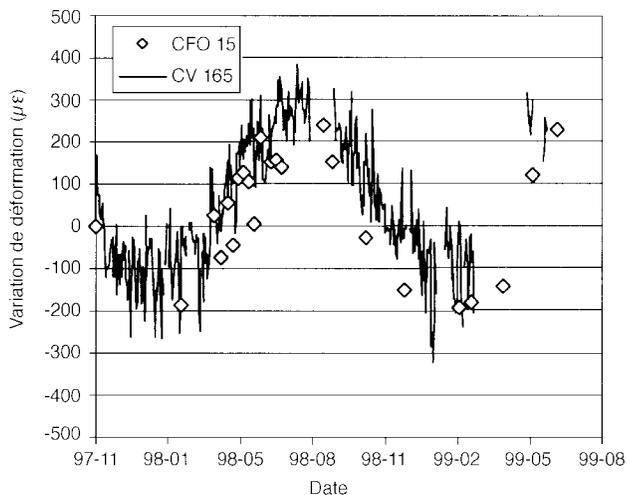


a. Variations de déformation thermique et mesures du capteur CFO 15.

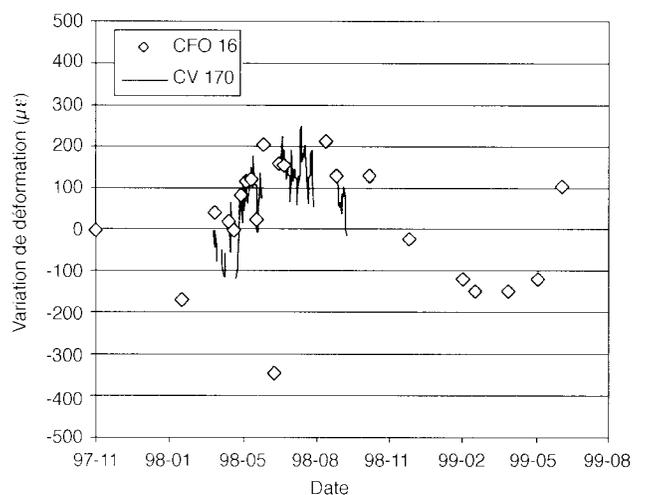
Fig. 20



a. Variations de déformation thermique et mesures du capteur CFO 16.



b. Mesures des capteurs CFO 15 et CV 165 installés dans la membrure C2-Est.



b. Mesures des capteurs CFO 16 et CV 170 installés dans la poutre inférieure.

pas gênant dans le cas des structures étudiées puisqu'elles sont libres de se dilater. Pour ce qui est de la passerelle piétonnière, des essais de chargement statique et dynamique contribueront à mieux comprendre le comportement de cette structure et, lors des essais dynamiques, le taux de lecture élevé des CFO (jusqu'à 1 000 Hz) est un avantage qui sera alors mis à profit.

Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada pour le financement d'une partie des recherches via ses programmes de bourses à incidence industrielle et de subvention d'activités coopératives université-industrie. La participation de la ville de Sherbrooke et des gouvernements canadien et québécois, grâce au programme d'infrastructure Canada-Québec, fut essentielle. Enfin, on souligne les nombreux échanges avec Mohamed Lachemi et Éric Dallaire du Centre d'excellence Béton Canada et on remercie vivement Martin Lizotte, Claude Aubé et Danick Charbonneau qui ont travaillé à l'installation des instruments.

- ADELIN R., LACHEMI M., BLAIS P. (1998), *Design and behaviour of the Sherbrooke footbridge*, International Symposium on High Performance and Reactive Powder Concretes, Sherbrooke, Québec, Canada, August 1998, **vol. 3**, pp. 89-97.
- BARBACHI M., GHIONE C., CHABERT A. (1995), *Développement d'une instrumentation basée sur les capteurs à fibre optique appliquée aux appareils d'appui*, Journées des sciences de l'ingénieur du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 4 au 7 octobre, Paris, pp. 1333-1341.
- BELLEVILLE C., DUPLAIN G. (1993), *White-light interferometric multimode fiber strain sensor*, Optic Letters, **18(1)**, pp. 78-80.
- BOBY J., TÉRAL S., CAUSSIGNAC J.-M., SIFFERT M. (1994), *Weighing of vehicles in motion using fiber optic sensors*, Electrical Communications, 1st Quarter 1994, pp. 75-77.
- CAUSSIGNAC J.-M., CHABERT A., MOREL G., ROGER P., SEANTIER J. (1992), *Bearings of a bridge fitted with load measuring devices based on optical fiber technology*, First European Conference on Smart Structures and Materials, SPIE, Glasgow, pp. 207-210.
- CHOQUET P., LEROUX R., JUNEAU F. (1997), *New Fabry-Perot fiber optic sensors for structural and geotechnical monitoring applications*, Transportation Research Record, **1596**, pp. 39-44.
- DALLAIRE E., AÏTCIN P.-C., LACHEMI M. (1998), *High performance powder*, Civil Engineering, **68(1)**, pp. 48-51.
- DUGAT J., ROUX N., BERNIER G. (1995), *Étude expérimentale de la déformation sous contrainte et du comportement à la rupture du béton de poudres réactives (BPR)*, Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, **532**, pp. 112-121.
- NEALE K., LABOSSIÈRE P. (1998), *Fiber composite sheets in cold climate rehab*, ACI Concrete International, **20(6)**, pp. 22-24.
- NEVILLE A.-M. (1996), *Properties of concrete*, 4th ed., John-Wiley and Sons, New-York, 844 p.
- RIZKALLA S.H. (1997), *A new generation of civil engineering structures and bridges*, Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP), Reinforcement of Concrete Structures, **vol. 1**, pp. 113-128.

ABSTRACT

An application of Fabry-Pérot fibre-optic sensors to long-term monitoring of concrete structures

M. QUIRION, G. BALLIVY

Rehabilitation works on the Webster car park constructed in the 1960s and construction of a footbridge in Sherbrooke (Quebec), began respectively in 1996 and 1997. At that time Fabry-Pérot fibre-optic strain gauges had just become available for instrumentation purposes. This paper describes the two projects, which have as a common feature simultaneous use of fibre-optic and vibrating wire sensors to conduct long-term monitoring of concrete deformation. Monitoring has been performed for two years and the results show that variations in deformation, measured with the two types of sensor, are in agreement and are also compatible with the thermal expansion of structural members. This instrumentation has also, in the case of the Webster car park, resulted in the diagnosis of some defects in the performance of the rehabilitation materials.

Application des capteurs à fibre optique Fabry-Pérot pour le suivi à long terme de structures en béton