

SOFO: surveillance d'ouvrages par senseurs à fibres optiques

Autor(en): **Inaudi, Daniele / Vurpillot, Samuel**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **121 (1995)**

Heft 26

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78635>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

SOFO: Surveillance d'ouvrages par senseurs à fibres optiques

Par Daniele Inaudi
et Samuel Vurpillot
IMAC - DGC
Ecole polytechnique
fédérale
1015 Lausanne

1. Les structures intelligentes: objectifs et perspectives

La sécurité des ouvrages du génie civil nécessite un contrôle périodique des structures. Les méthodes actuellement utilisées (triangulation, niveau d'eau, cordes vibrantes ou extensomètres mécaniques) sont souvent d'application lourde et requièrent la présence d'un ou de plusieurs opérateurs spécialisés. La complexité de ces examens et les coûts élevés qui en découlent limitent la fréquence des mesures. De plus, la résolution spatiale obtenue est en général faible et seule la présence d'anomalies dans le comportement global d'un ouvrage incite à poursuivre l'analyse avec plus de détails et de précision. Il y a donc un besoin réel, manifesté à l'échelle internationale, d'un outil permettant une surveillance automatique et permanente à l'intérieur même de la structure et ce, avec une grande précision et une bonne résolution dans l'espace.

Les 60 ans du professeur Pflug

Fondateur et actuel directeur de l'IMAC, le professeur Léopold Pflug a célébré l'été dernier son 60^e anniversaire. La contribution que nous publions ici lui est dédiée par ses collaborateurs, qu'il sait si bien motiver et encourager. Elle illustre le travail de recherche et de développement fourni par l'IMAC pour offrir à l'ingénieur de la pratique, qu'il exerce son métier dans le domaine du génie civil ou dans l'industrie, des outils performants, non destructifs, pour mieux connaître et analyser avec précision déformations et contraintes dans les structures.

De ces connaissances approfondies résultent des structures plus efficaces, plus économiques et surtout plus sûres. A ce titre, la reconnaissance du monde professionnel est acquise au professeur Pflug. Nous y ajouterons nos félicitations et nos meilleurs voeux pour la suite de sa carrière.

Rédaction

Dans cette optique, le concept de *structure intelligente* (en anglais «smart structure») a déjà prouvé son efficacité dans plusieurs branches des sciences de l'ingénieur et en particulier dans les domaines de l'aéronautique et des matériaux composites. Ce type de structure est équipé d'un réseau interne de capteurs à fibres optiques, qui permet-

tent de surveiller différents paramètres critiques pour la sécurité (notamment les déformations, la température, la pression, la pénétration par des agents chimiques, etc.) et de planifier efficacement les interventions de maintenance.

Ces senseurs à fibres optiques présentent d'importants avantages par rapport aux méthodes

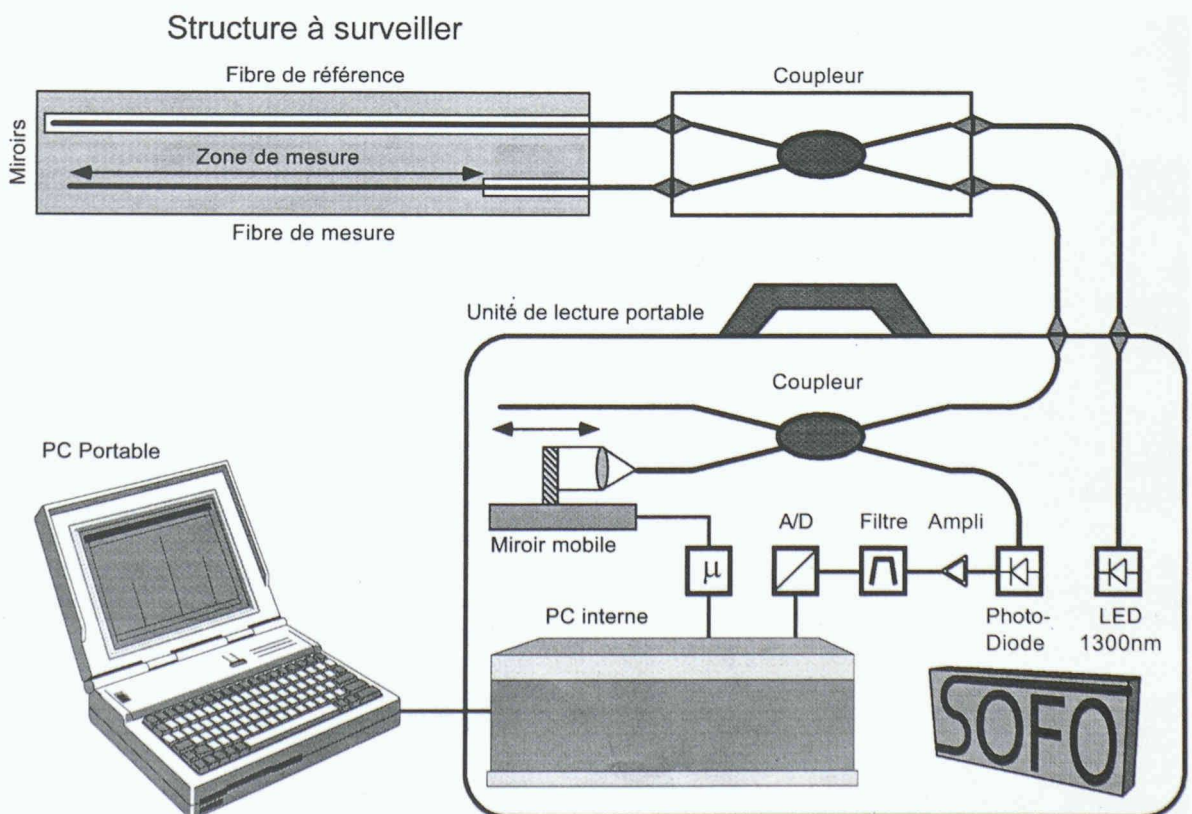


Fig.1. - Principe général de la méthode de mesure SOFO

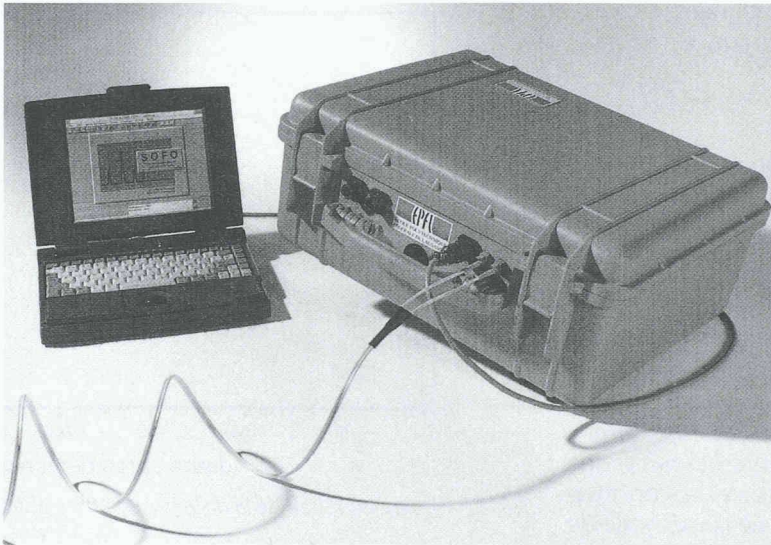


Fig. 2. - Valise de mesure et son PC portable. Le tout est étanche, résistant aux chocs et autonome.

de mesure plus traditionnelles. Citons leur faible coût, le grand nombre de paramètres mesurables, leur insensibilité aux champs électromagnétiques (lignes à haute tension, voies ferrées électrifiées, orages...) et à la corrosion, leur petite taille, leur souplesse d'utilisation et la densité d'information qu'ils peuvent véhiculer.

L'application du concept de *structure intelligente* aux problèmes spécifiques du génie civil ouvre de nouvelles voies tant pour la surveillance à long terme des ouvrages de quelque impor-

tance tels que les ponts, barrages, tunnels, pistes d'aéroport, couvertures de grande portée, que dans le domaine de la mécanique des roches et des sols, par exemple.

C'est dans cette optique que, depuis 1992, un institut de l'EPFL (l'IMAC¹, département de génie civil, professeur Pflug) a entrepris l'étude et le développement d'un système de surveillance des ouvrages du génie civil basé sur les propriétés des fibres optiques.

2. Description de la méthode

La méthode mise en oeuvre fait appel au principe de l'interférométrie en basse cohérence (fig. 1). L'émission infrarouge d'une diode électroluminescente (LED) est injectée dans une fibre monomode de type télécom puis envoyée, à l'aide d'un coupleur, dans deux fibres installées dans la structure à observer. La première, dite fibre de mesure, est liée mécaniquement à la structure et en épouse les déformations. La deuxième, appelée fibre de référence, est placée librement dans un tube installé parallèlement à la fibre de mesure. Un miroir placé à l'extrémité de chaque fibre renvoie la lu-

mière vers le coupleur qui recombine les deux faisceaux et les dirige vers l'analyseur. Celui-ci se compose également de deux fibres dont la différence de longueur est contrôlée avec précision à l'aide d'un miroir mobile. En déplaçant ce miroir on obtient une modulation du signal détecté sur la photodiode, lorsque la différence de longueur entre les fibres de l'analyseur compense celle des fibres installées dans la structure et ce, avec une erreur inférieure à la longueur de cohérence de la source (soit quelques centièmes de mm dans le cas qui nous occupe).

Chaque fois que l'on effectue une mesure, on obtient une nouvelle position de compensation qui traduit la déformation de la structure par rapport aux points de mesure précédents. L'appareil peut donc être débranché entre deux mesures et être utilisé pour la surveillance d'autres structures.

3. Description du système de mesure

Le système de mesure SOFO (Surveillance d'ouvrages par fibre optique), à été mis au point par l'IMAC¹ en collaboration avec le LMS² de l'EPFL, l'entreprise Passera + Pedretti SA et l'IMM³ à Lugano, dans le cadre d'un projet de recherche financé par la CERS⁴. Ce système se compose d'une unité de lecture portable (fig. 2), étanche et entièrement contrôlée par ordinateur, ainsi que d'une série de capteurs (fig. 3) destinés à l'installation dans différentes structures et matériaux tels que:

- structures en béton, métal, bois et mixtes;

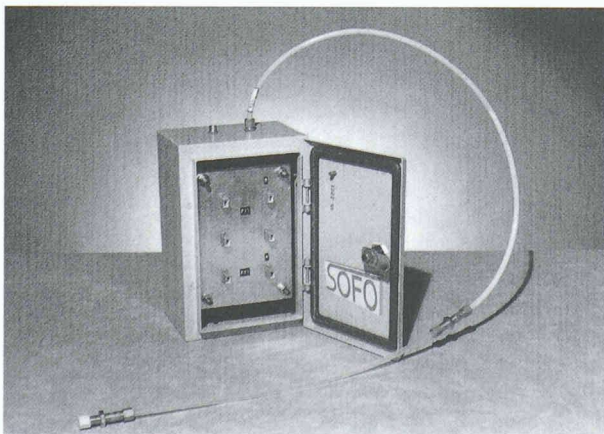


Fig. 3. - Vue générale d'un capteur à fibres optiques et de sa boîte de jonction permettant de stocker les connecteurs de plusieurs capteurs. La zone de mesure se situe entre les deux pièces mécaniques visibles sur le capteur.

¹IMAC: Institut de mesure et d'analyse des contraintes et des déformations

²LMS: Laboratoire de mécanique des sols

³IMM: Institut de mécanique des matériaux

⁴CERS: Commission pour l'encouragement de la recherche scientifique

- ouvrages souterrains;
- câbles d'ancrage et de précontrainte;
- nouveaux matériaux de construction.

En raison de son principe même, cet instrument est adapté à la mesure de faibles déformations sur des périodes pouvant atteindre plusieurs années.

4. Principaux essais réalisés dans le cadre du projet SOFO

Dalle en béton précontraint

Cet essai, d'intérêt historique pour le laboratoire, a constitué le premier test de la méthode de mesure SOFO sur une structure. Seize capteurs à fibres optiques, de réalisation sommaire mais robuste, ont été placés au sein d'une dalle entièrement libre en béton armé et précontraint de 20 x 5 x 0,5 m (fig. 4). Située dans les locaux de l'IMM (Lugano), cette dalle isolée du sol par un système pneumatique est destinée à recevoir ultérieurement des éprouvettes de plusieurs mètres, afin d'analyser leur comportement par divers moyens optiques tels que l'interférométrie holographique, l'interférométrie speckle ou des moirés de haute définition [4]⁵. Depuis son bétonnage, le 16 février 1993, les senseurs à fibres optiques contrôlent le retrait de cette dalle sur toute sa longueur. Le graphique (fig. 5) qui montre la déformation de la dalle mesurée par une fibre sur 20 m illustre clairement le retrait du béton sur les trois premiers mois. Le rapprochement des extrémités de la dalle atteint 0,3‰ (soit environ 6 mm sur 20 m), pour ensuite suivre les fluctuations de température du local dans lequel se trouve la structure.

Ce premier essai, encore en cours actuellement, a démontré qu'avec les très modestes moyens initialement engagés, il était possible de mesurer sérieusement et à long terme des

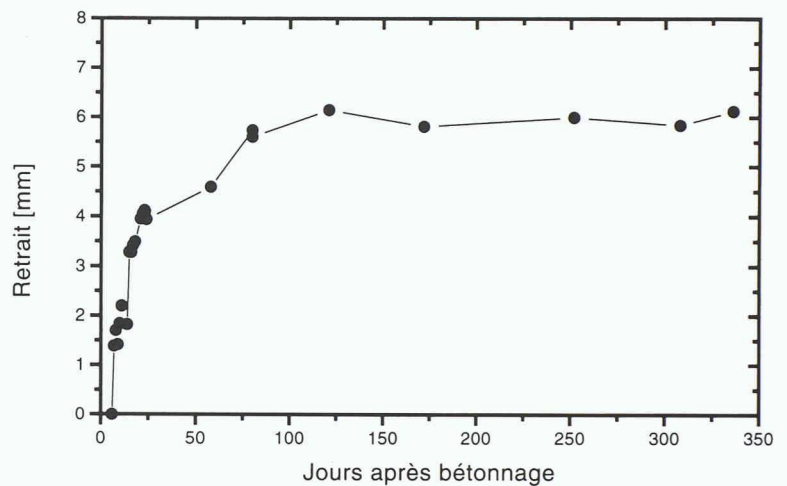


Fig. 5. - Mesure du retrait de la dalle par une fibre optique sur 20 m durant un an

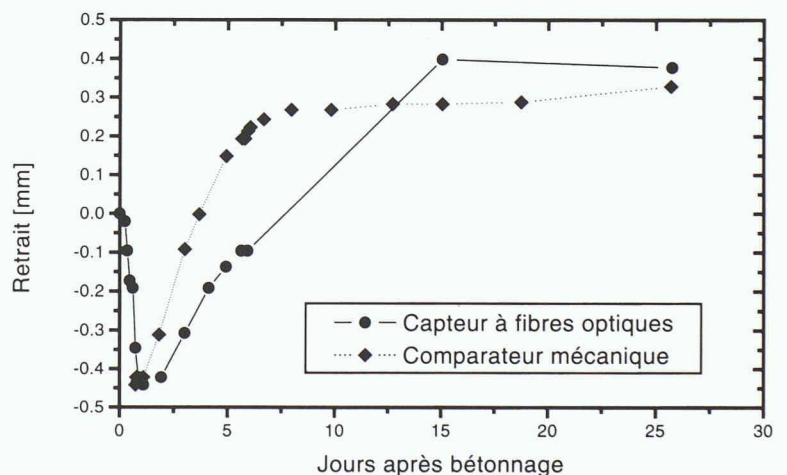


Fig. 7. - Mesure du retrait du tirant. Dès le bétonnage, le capteur interne à fibres optiques mesure le gonflement du béton dû à la chaleur d'hydratation, tandis que les comparateurs mécaniques n'entrent en fonction qu'après le durcissement du béton.

structures en béton à l'aide de capteurs à fibres optiques.

Tirant en béton à haute performance

Dans le but de valider la méthode de mesure (appareil de mesure et, surtout, capteurs) pour les structures en béton, un essai comparatif a été mené en collaboration avec l'IBAP⁶ sur des tirants en béton armé et précontraint de 5 x 1 x 0,5 m. Cet essai de traction, ayant pour but de

tester différents bétons étanches à haute performance, consistait à imposer aux tirants une déformation comprise entre 0‰ et 1,5‰, à l'aide d'un vérin hydraulique piloté par des jauges à induction placées sur les 3 m centraux (fig. 6). Plusieurs capteurs à fibres optiques mesurant le déplacement sur des distances allant de 14 cm à 3 m ont été placés au cœur du tirant. Le premier résultat fut la mesure du retrait du béton de la poutre reproduit à la figure 7. Ce retrait présente tout d'abord un gonflement dû à la chaleur d'hydratation, puis un retrait traditionnel

⁵Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

⁶IBAP: Institut de béton armé et précontraint

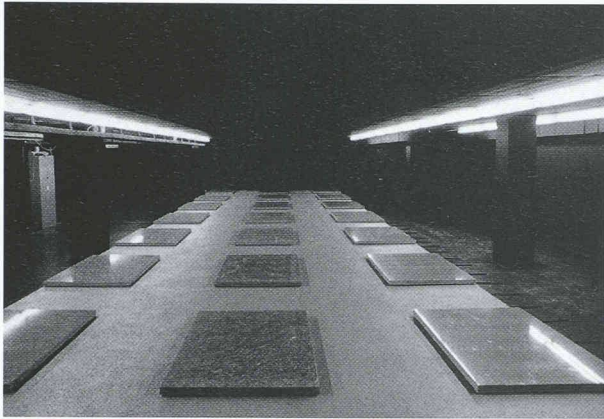


Fig. 4. - Table holographique en béton armé et précontraint de 20 x 5 x 0,5 m isolée du sol et équipée de senseurs à fibres optiques (IMM à Lugano)

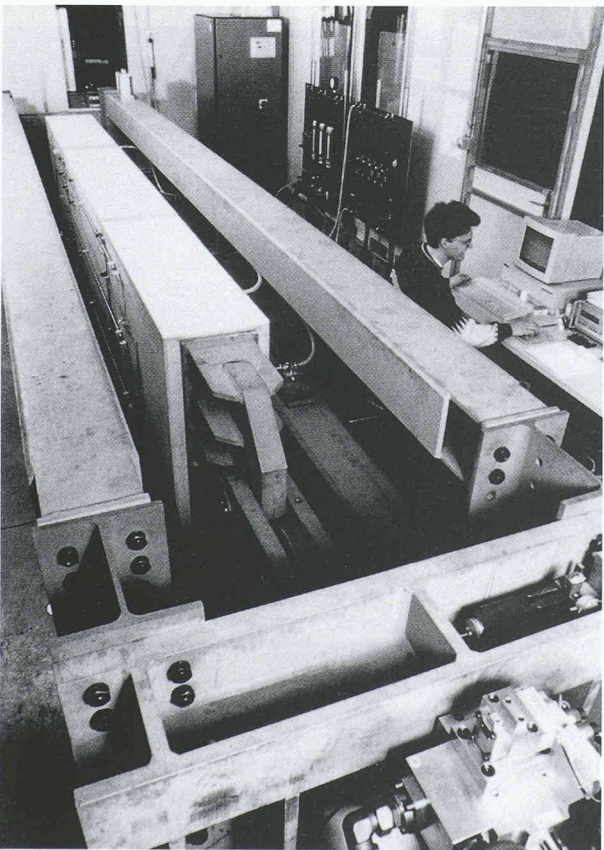


Fig. 6. - Test sur des tirants en béton armé et précontraint en collaboration avec l'IBAP. Les valeurs de déformation données par les capteurs à fibres optiques sont directement comparées à celles fournies par des jauges à induction pilotant l'essai en traction.

de dessiccation. La comparaison avec d'autres systèmes de mesure (ici des comparateurs mécaniques) n'a été possible qu'après le durcissement du béton (pour permettre la fixation des jauges mécaniques). La suite du retrait montre clairement un retard des valeurs de déformation, mesurées à l'intérieur de la poutre par fibres optiques, sur les valeurs externes mesurées par les comparateurs mécaniques, ce qui est normal puisque le retrait com-

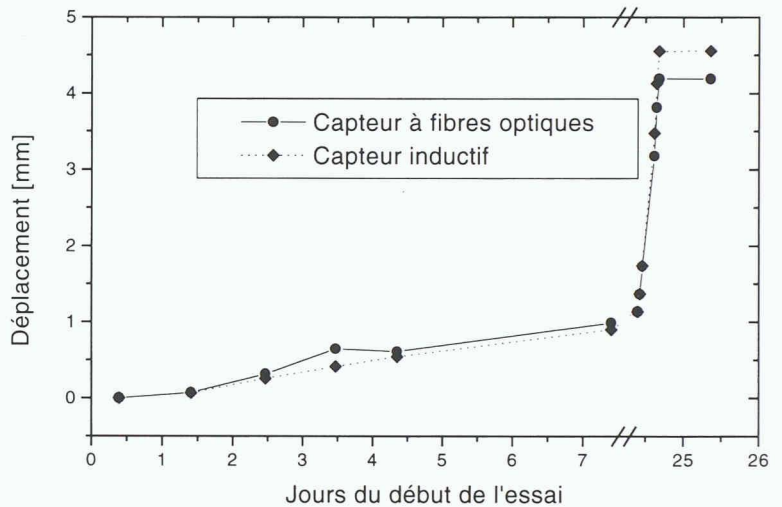


Fig. 8. - Essai de traction du tirant entre 0 % et 1,5 % de déformation. Les deux moyens de mesure de déplacement s'avèrent comparables. Les écarts proviennent de l'emplacement différent des capteurs ainsi que de la fissuration du tirant.

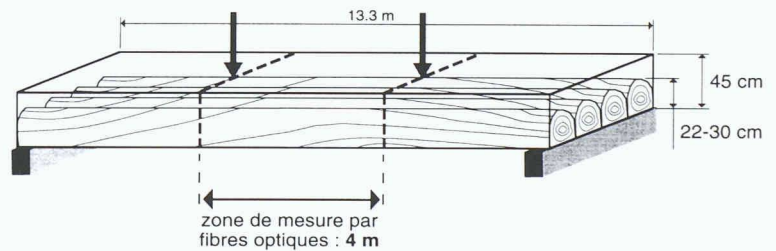


Fig. 9. - Test sur une dalle mixte bois-béton en collaboration avec l'IBOIS. La dalle est composée de quatre poutres en bois, d'une chape de béton de 15-20 cm et de connecteurs. Les fibres optiques mesurent le déplacement sur les 3 m centraux afin d'en déduire le diagramme des déformations.

mence par les faces externes de la poutre. La comparaison des déplacements mesurés par fibres optiques avec ceux mesurés par les capteurs inductifs dans la phase de traction imposée (fig. 8) valide définitivement notre système de mesure SOFO. Ce test, conduit sur trois poutres et plus de vingt capteurs, nous a permis de quantifier les déformations internes du tirant sur les 3 m centraux et de mesurer les ouvertures de fissures internes sur des bases de 14 cm.

Dalle mixte bois-béton

La diversification des structures en génie civil a encouragé le développement de capteurs pour d'autres matériaux que le béton. Ainsi, en collaboration avec l'IBOIS⁷, une dalle mixte bois-bé-

ton d'une portée de 13,5 m a été équipée du système de mesure SOFO (fig. 9). Les cinq capteurs de déplacement à fibre optique ont été placés à trois hauteurs différentes dans les poutres en bois et à deux hauteurs différentes dans la dalle en béton (fig. 10). L'intérêt de cet essai était d'examiner le véritable diagramme des déformations, afin d'en déduire le facteur de glissement des deux matériaux. Les capteurs mesurant le déplacement de fibres longitudinales ont été placés sur les 3 m centraux de la dalle, lieu de flexion constante. Le diagramme des déformations ainsi mesurées (fig. 11) a permis de déduire que cette solution de dalle mixte

⁷IBOIS: Institut de construction en bois

originale se caractérise par un facteur de glissement très faible. Cet essai dans le domaine du bois ayant montré que l'application de la méthode de mesure SOFO à différentes structures était possible, une dalle mixte acier-béton ainsi qu'un pont autoroutier mixte acier-béton ont alors été équipés, avec l'aide de l'ICOM⁸ cette fois.

Pont autoroutier sur la Venoge

Ce pont mixte acier-béton, instrumenté en collaboration avec l'ICOM⁸ et l'Etat de Vaud constitue la première expérience de notre système de mesure hors du laboratoire. Une trentaine de capteurs de déplacement à fibres optiques placés dans la dalle de compression mesurent, dans trois sections, les déformations du béton sur les 5,7 m de largeur et sur des longueurs de 1 et 2 m (fig. 12). Le retrait et les déformations sous charge sont ainsi quantifiés. Les trente capteurs produits à l'IMAC ont été rapidement placés dans la structure sans en retarder la réalisation (la mise en place de l'instrumentation n'était en effet pas prévue dans la planification du chantier). Or non seulement ils n'ont pas perturbé le bétonnage, mais ils ont très bien survécu à cette phase, mesurant ainsi le gonflement du béton et son retrait.

Les mesures par fibres optiques ont permis de quantifier le retrait thermique lors de la prise du béton sur une dalle de pont mixte (fig. 13). Ce premier engagement du système sur un pont autoroutier est très positif: il prouve que les capteurs et l'appareil de mesure SOFO sont opérationnels dans les conditions réelles d'un chantier.

Détermination des flèches par double intégration des courbures

Un grand intérêt se manifeste actuellement pour la mesure de la flèche des ponts sous charges

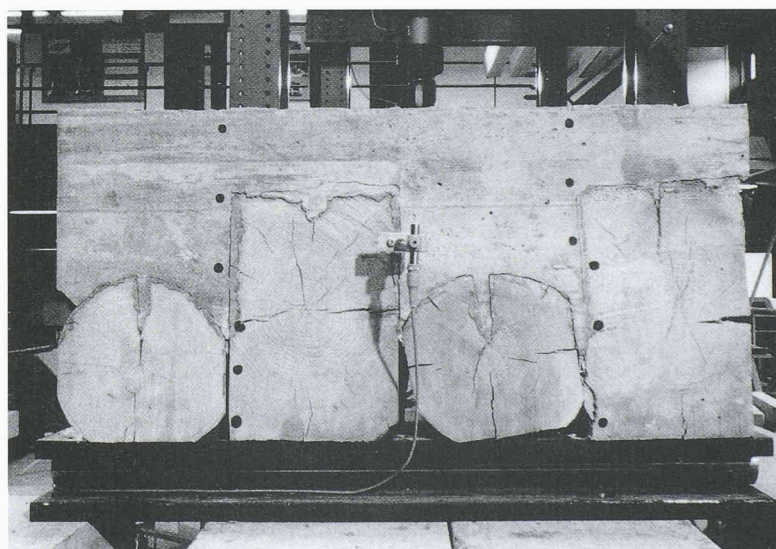
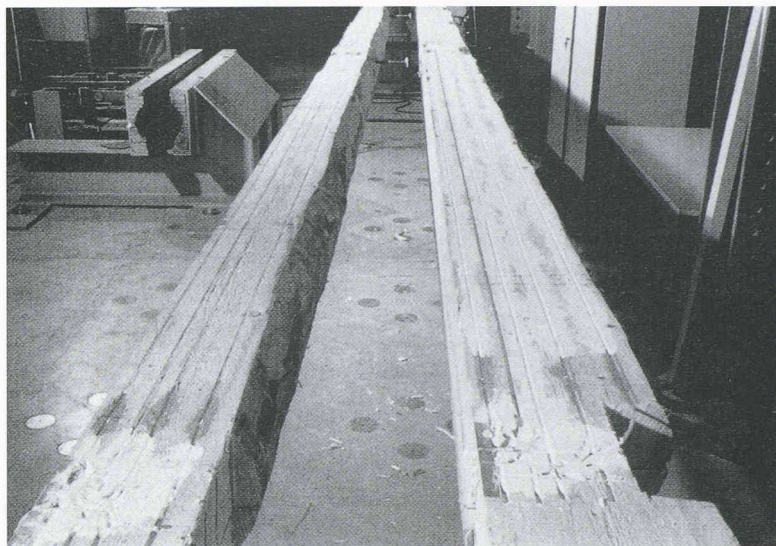


Fig. 10. - Emplacement des capteurs de déplacement à fibres optiques. Les poutres en bois ont d'abord été fraisées pour placer les capteurs. Dans le cas d'une poutre en lamellé-collé, il serait envisageable d'insérer une fibre de 0,25 mm entre les couches de bois.

ponctuelles (essais de pont) et à long terme. Afin de pouvoir utiliser les capteurs à fibres optiques dans ce domaine, un algorithme permettant de déterminer la flèche verticale d'une poutre à l'aide de mesures effectuées sur des lits de fibres disposées en plan horizontal parallèles a été développé. Cet algorithme utilise simplement l'expression liant la flèche aux courbures d'une pièce prismatique fléchie. Ainsi, en plaçant une fibre au niveau supérieur et une autre au niveau inférieur d'une cellule de poutre convenablement choisie, il est possible, avec trois cellules⁹ par élément de poutre, de retrouver la courbure de ces dernières et, partant, la déformée des éléments considérés. Les conditions de continuité (déformée et pen-

te) aux extrémités de chaque élément suffisent donc à obtenir la déformation réelle de la poutre (fig. 14). Autrement dit, en connaissant les conditions aux limites constituées par la position des deux appuis aux extrémités, douze fibres suffisent à établir la déflexion exacte en tout point d'une poutre uniformément chargée sur trois appuis. L'essai de validité de ce modèle a été fait à l'IMAC sur une poutre en bois équipée de

⁸ICOM: Institut de construction métallique

⁹Un élément de poutre étant une poutre uniformément chargée, avec introduction à ses extrémités d'un effort normal, d'un effort tranchant et d'un moment, sa déformée est de degré 4 et trois informations sur ses courbures suffisent donc pour connaître cette dernière.

douze fibres (et donc de six cellules). Les figures 15 et 16 permettent de comparer la déformée calculée par les fibres optiques à celle mesurée en quelques points à l'aide de comparateurs mécaniques. La correspondance est très satisfaisante pour le cas sur deux appuis (erreur globale inférieure à 1 %) et bonne pour le cas trois appuis (erreur globale inférieure à 8 %). Cette constatation était d'ailleurs attendue, car les cellules sont en surnombre dans le premier cas, alors que leur nombre est exact pour le second. A noter que le modèle de calcul retrouve de manière intrinsèque la position de l'appui central.

Peu sensible aux erreurs de lecture dues à la méthode de mesure SOFO, l'algorithme développé servira de base pour la dé-



Fig. 12. - Déroulement d'une mesure de capteurs à fibres optiques auprès d'une boîte de jonction sur le pont de la Venoge (Vaud). Quatre sections ont chacune été équipées de huit fibres optiques dans la largeur de la dalle de roulement.

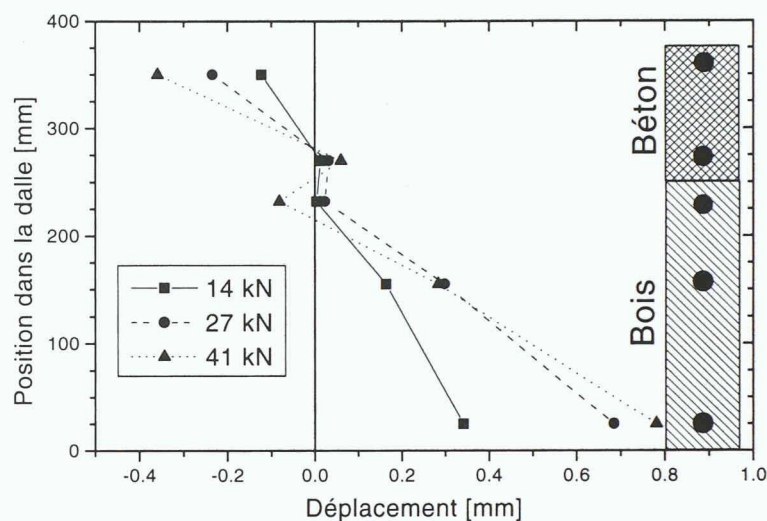


Fig. 11. - Diagramme des déformations sur les 3 m centraux de la poutre en fonction de la charge. Le diagramme en Z caractéristique d'une section mixte se remarque nettement.

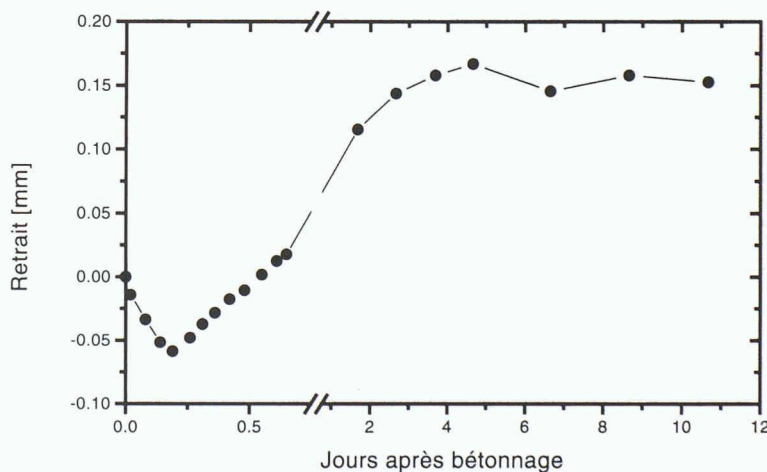


Fig. 13. - Mesure du retrait de la dalle de roulement du pont mixte. La phase de gonflement du béton se distingue nettement.

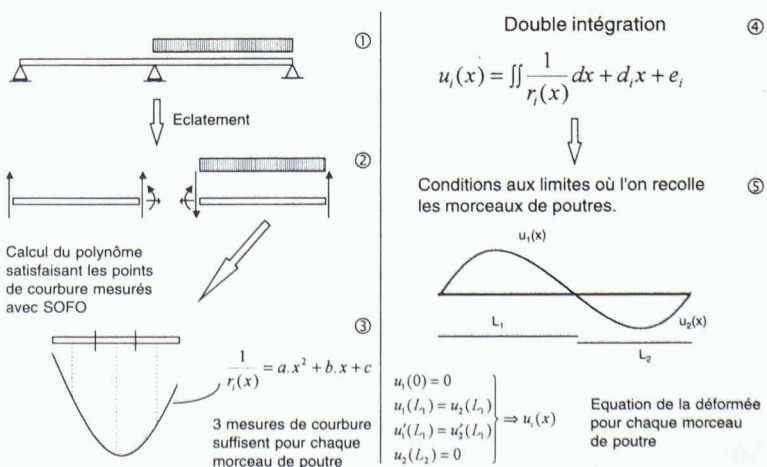


Fig. 14. - Principe de l'algorithme permettant de retrouver la déformée exacte d'une poutre à partir de la mesure de courbure par capteur à fibres optiques.

termination des déplacements spatiaux du pont de la Versoix (Genève), qui doit être élargi au printemps 1996.

Autres projets

Dans le but de diversifier le système de mesure SOFO, plusieurs autres projets prometteurs ont été menés à bien ces trois dernières années.

- L'instrumentation de câbles d'ancrage de 20 m de longueur en rocher afin de déterminer l'allongement respectif de ceux-ci. Cet essai a montré la faisabilité de l'installation de senseurs à fibre optique dans des tirants d'ancrage. Plus de la moitié des fibres implantées ont survécu au montage du câble, à son installation, injection et mise en tension, ainsi qu'à six mois d'utilisation *in situ*.
- L'installation des fibres optiques dans une couche de béton projeté dans le but de mesurer le confinement d'un soutènement de tunnel. Des fibres dotées d'une gaine secondaire de 0,9 mm en Nylon ont résisté à la projection directe de béton. Cela est très encourageant pour une application du système de mesure SOFO au contrôle à long terme des revêtements de tunnels.
- La mesure du retrait partiellement empêché de murs en béton de 1 m x 3 m x 0,20 m. Près de cent capteurs ont été installés dans quatre murs. A titre de premier essai faisant intervenir autant de capteurs identiques, l'expérience a permis d'évaluer la fiabilité de cette technique et de préciser les conditions d'une fabrication en série.
- La mesure des déformations internes d'une dalle mixte acier-béton de 14 m x 2 m soumise à la flexion afin de quantifier la répartition des efforts dans la dalle. Cet essai en collaboration avec l'ICOM

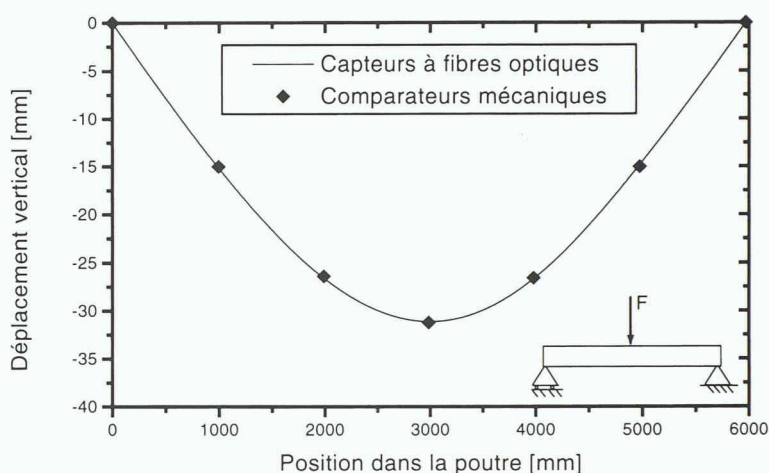


Fig. 15. - Résultat de l'algorithme pour une poutre simple ponctuellement chargée. Comparaison entre la déformée mesurée par fibres optiques et la déformée mesurée en cinq points par des comparateurs mécaniques.

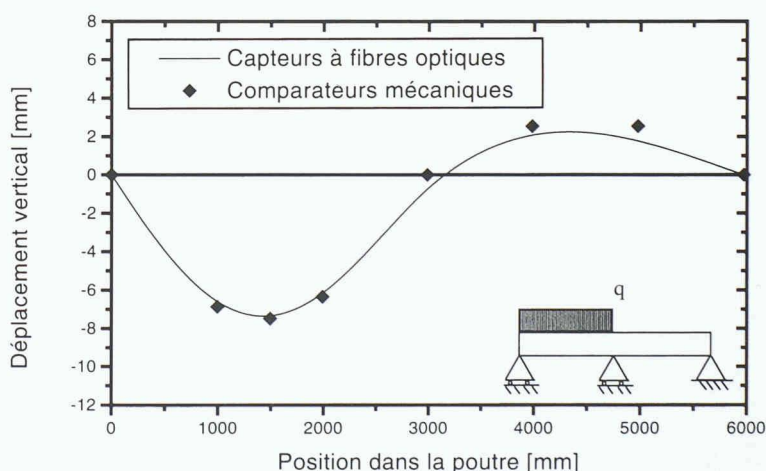


Fig. 16. - Résultat de l'algorithme pour une poutre sur trois appuis uniformément chargés sur une travée de rive. Le résultat est moins précis que celui de la figure 15, car le nombre de cellules nécessaires est limité au minimum et non surabondant.

a permis d'évaluer le facteur de glissement entre les deux matériaux et de mesurer les effets du retrait partiellement empêché du béton.

- L'étude de la mesure des déformations à haute température d'une maquette d'enceinte de confinement de centrale nucléaire de 15 m de diamètre (projet en cours). L'EDF (Electricité de France) est en train de construire une maquette qui sera ensuite mise en pression avec de la

vapeur à 180°C pour simuler un accident nucléaire majeur. L'insensibilité des capteurs SOFO aux variations de température et la possibilité de mesure à distance les rend particulièrement intéressants pour ce type d'application. Des capteurs spéciaux ont été développés en vue de résister à des températures allant jusqu'à 200°C.

- La mesure des déformations verticales dans des pieux forés. Le LMS a procédé à plu-

sieurs essais de faisabilité pour tester l'installation de longs capteurs de déplacement dans des pieux forés et évaluer leur aptitude à remplacer les extensomètres classiques.

- L'instrumentation d'éléments de voûte de tunnel préfabriqués. Deux sections du tunnel des Vignes (FR) ont été instrumentées avec des capteurs de déplacement. Mené en collaboration avec le LMS, cet essai a permis d'évaluer les conditions d'engagement des senseurs SOFO dans un environnement particulièrement difficile.

5. Développements prévus

Les développements en cours visent à l'augmentation de la densité des points de mesure, qui peuvent être lus par l'appareil sans intervention manuelle (projet SOFO II), et à l'amélioration des techniques d'installation des fibres dans différents types d'ouvrages. L'interprétation automatique des mesures fait aussi partie intégrante du programme de recherche et s'insérera rapidement dans le contexte de structure intelligente pour le génie civil.

6. Conclusions

Les méthodes d'auscultation des ouvrages par fibres optiques constituent à proprement parler une rupture technologique dans les procédés d'auscultation et de surveillance permanente des ouvrages de génie civil.

Ces méthodes se caractérisent par une sensibilité remarquable puisqu'elles permettent de détecter des différences de longueur de 10 mm pour tout segment initial supérieur à 10 cm.

Des logiciels spécialisés accélèrent en outre le processus de dépouillement des données, qui peut de surcroît être adapté aux besoins de l'utilisateur et automatisé.

Principales caractéristiques techniques

- Précision: 10 mm (1/100 mm), quelle que soit la longueur de mesure.
- Plage de mesure: 150 mm en allongement ou raccourcissement
- Longueur des fibres de mesure: de 5 cm à 100 m et plus
- Distance zone de mesure - appareil SOFO: max. 2 km
- Dérive: non observable après deux ans d'utilisation
- Nombre de points de mesure par paire de fibres: 1 (>10 pour le projet en cours SOFO II)
- Temps de mesure par point: moins de 10 secondes
- Alimentation: réseau 220V, batterie interne rechargeable (500 mesures), batterie 12 V externe
- Boîtier: étanche et résistant aux chocs, dim. 520 x 425 x 215 mm
- Poids: 18 kg (avec batterie)
- Logiciel de gestion de l'appareil: fonctionnement sous Windows, traitement entièrement automatique des mesures, gestion des sessions de mesure sur plusieurs fibres et structures, exportation des résultats vers Excel

Cette technique faisant par ailleurs appel à des composants optiques couramment utilisés dans le domaine des télécommunications, son prix de revient est particulièrement intéressant, tout comme le fait que la fibre elle-même joue simultanément le rôle de capteur et de vecteur de l'information.

Enfin, l'insensibilité de ces composants aux perturbations électromagnétiques et à la corrosion permet d'étendre l'application de la méthode à des ouvrages dont l'environnement est susceptible de perturber, voire empêcher le recours aux méthodes exploitant des capteurs électriques ou mécaniques.

Ainsi, constructeurs, maîtres d'ouvrages et organes de contrôle chargés de garantir la sécurité disposent dès lors d'une méthode inédite, fiable et à large spectre d'engagement.

Signalons pour terminer que cette méthode remplit les conditions requises pour la mise en pratique du concept de structure intelligente.

Bibliographie

[1] P. FERDINAND: «La surveillance des structures par fibres optiques», L'optique dans les contrôles non destructifs, Orsay, 1992

[2] A. KOCH, R. ULRICH: «Fiber Optic Displacement Sensor with 0,02 mm Resolution by White-light Interferometry», *Sensors and Actuators A*, Vol 25 (1991), pp. 201-207

[3] C.D. BUTTER, G.B. HOCKER: «Fiber optics strain gauge», *Applied Optics*, Vol. 17, N° 18 (1978), pp 2867-2869

[4] L. PFLUG, M. PEDRETTI: «Construction of a 100-tons holographic table», *Practical holography VII: Imaging and materials*, San Jose 1993, SPIE Volume 1914, 50-54

[5] D. INAUDI, A. ELAMARI, L. PFLUG, N. GISIN, J. BREGUET, S. VURPILLOT:

«Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil-engineering structures», *Sensor and Actuators A*, 44 (1994), 125-130

[6] D. INAUDI, A. ELAMARI, S. VURPILLOT: «Low-coherence interferometry for the monitoring of civil engineering structures», *Second European Conference on Smart Structures and Materials*, Glasgow october 1994, SPIE Volume 2361, 216-219

[7] A. ELAMARI, D. INAUDI, J. BREGUET, L. PFLUG, N. GISIN, S. VURPILLOT: «Low Coherence Fiber Optic Sensors for Structural Monitoring» *Structural Engineering International*, Volume 5, Number 1, 43-47

[8] D. Inaudi: «Coherence multiplexing of in-line displacement and temperature sensors», *Optical Engineering*, Vol 34, Nr. 7, July 1995

[9] D. INAUDI, L. VUILLET, L. PFLUG, S. VURPILLOT, A. WYSER: «Low-coherence interferometry for the monitoring of underground works», 1995 North American Conference on Smart Structures and Materials, San Diego February 1995

[10] L. VUILLET, D. INAUDI, A. WYSER, S. VURPILLOT, L. PFLUG: «Development of interferometric fiber optic extensometers to monitor geostuctures», *Field Measurements in Geomechanics*, 4th International Symposium, Bergamo, April 1995

[11] S. VURPILLOT, D. INAUDI, P. MIVELAZ: «Low-coherence interferometry for the monitoring of concrete structures», 1995 European Symposium on Optics for Environmental and Public Safety, Munich, June 1995

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'IMM (Istituto di Meccanica dei Materiali à Lugano), MM. M. Pedretti, R. Passera, N. Casanova, P. Colombo, A. Scano, L. Vuillet, prof., A. Osa-Wyser, J.-M. Ducret, P. Mivelaz, R. Emery, ainsi que les maisons *Cabloptic SA* (Cortailod) et *Diamond SA* (Losone). Cette recherche a été financée par la CERS et l'EPFL.