

Mesure de déformations à l'aide de fibres optiques noyées dans le béton

Enseignements tirés d'une application expérimentale
sur un pont

Brigitte MAHUT

ITPE, Chef de la Section Durabilité des ouvrages d'art
Division Fonctionnement et durabilité des ouvrages d'art
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Jean-Marie CAUSSIGNAC

Directeur de recherche
Chef de la Section Optoélectronique
Service Métrologie et instrumentation
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Jacques LAVIGNE

Assistant
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux

Jean MARTIN

Contrôleur de Laboratoire principal
au Laboratoire d'Aéroports de Paris

Il est de plus en plus fréquent de trouver, dans la littérature technique, des articles présentant les capteurs à fibres optiques comme un nouvel outil performant pour assurer la surveillance des ouvrages d'art en service.

Les avantages décrits pour justifier le recours à cette technique reposent essentiellement sur l'intérêt d'une mesure effectuée sur une base longue, représentative des mouvements d'ensemble des structures contrôlées, et permettant d'appréhender le comportement global d'un ouvrage par la connaissance de la valeur moyenne de ses déformations. D'autres arguments tels que la possibilité d'utiliser ces capteurs en environnement hostile, leur bonne linéarité, la possibilité de réduire le nombre de liaisons sont également mis en valeur pour privilégier le choix de cette technologie.

Il existe plusieurs types de capteurs à fibres optiques, qui se distinguent selon leur principe de fonctionnement.

Dans le domaine du génie civil, sont principalement commercialisés deux modèles de capteurs à fibres optiques :

- > les capteurs destinés à être fixés à la surface des ouvrages, en particulier pour le contrôle des structures existantes ;
- > les capteurs à noyer directement dans le béton lors de la construction d'un ouvrage neuf, afin d'en assurer le suivi à long terme.

Différents ouvrages ont ainsi été instrumentés, depuis quelques années en France, avec des fibres optiques le plus souvent fixées sur le parement. Cependant, il n'existe pas encore de publications présentant ou commentant les résultats de mesure obtenus dans ces différents cas.

Dans ce contexte, une application expérimentale de fibres optiques noyées dans le béton a été réalisée en site réel au début de l'année 1996, à l'occasion de la construction d'un pont franchissant la route nationale 7 à proximité de l'aérogare d'Orly-Sud, dont le gestionnaire souhaitait assurer un suivi du comportement dans le temps.

Il s'agissait de fibres, dites à micro-courbures, commercialisées par la Société DEHA-COM, les plus utilisées jusqu'à présent en

France. Ont déjà été instrumentés, avec des capteurs de ce type, des ouvrages tels que la Tour Eiffel, le Viaduc ferroviaire de Serrières et le Stade de France en cours d'achèvement.

L'intérêt majeur de cette expérimentation, conduite dans le cadre d'une convention entre Aéroports de Paris, le Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) assisté du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux et le SETRA, avec le soutien de la DRAST, est d'avoir simultanément mis en place dans l'ouvrage concerné des capteurs à base de fibres optiques et une instrumentation classique, éprouvée, autorisant :

- > d'une part, une vérification des possibilités réelles d'utilisation des fibres optiques dans des conditions de chantier ainsi que de leur durabilité,
- > d'autre part, une étude comparative des résultats respectivement obtenus par le recours aux différentes méthodes utilisées.

Présentation générale de l'opération

Type de fibre optique utilisé

Le modèle de capteur à fibre optique utilisé était constitué d'une fibre optique gainée en flexible acier d'une longueur de 2 m, destinée à être noyée dans le béton, prémontée sur une armature pour une fixation rapide dans le ferrailage de l'ouvrage.

Son principe de fonctionnement repose sur la relation entre l'atténuation lumineuse mesurée en extrémité de capteur et l'allongement de ce dernier. Cet allongement, qui est provoqué par les déformations de l'ouvrage, engendre des micro-courbures dans la fibre, modifiant par là même la transmission lumineuse. Dans la pratique, on mesure des variations de tension qui correspondent aux variations de transmission du guide, dont on déduit des allongements.

Note

technique

Dans le cas de cette expérimentation, les fibres optiques ont été mises en place dans l'ouvrage par la Société DEHA-COM (fig. 1).



Fig. 1 - Fibre optique prémontée sur une armature avant sa mise en place dans l'ouvrage.

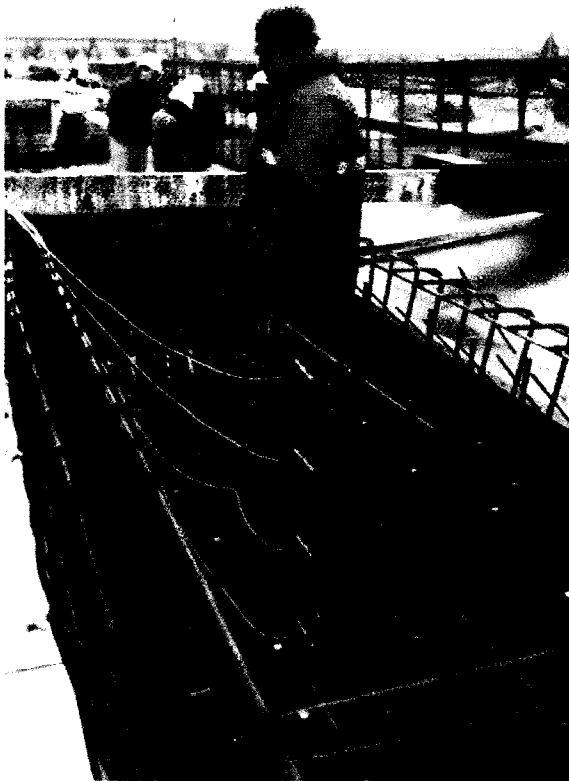


Fig. 2 - Vue des témoins sonores et des jauges de déformation dans le ferrailage, avant bétonnage.

Présentation de l'ouvrage

L'ouvrage concerné est un pont en béton précontraint à double nervure, symétrique à neuf travées, de 22 m de portée maximale en travée centrale, portant deux voies de circulation de 3 m de largeur, ayant un rayon en plan de 540 mètres.

Cet ouvrage a été réalisé en plusieurs phases :

- > coulage sur cintre et mise en précontrainte d'un premier demi-ouvrage, constitué de quatre travées et d'une amorce de 3,50 m de la travée centrale,
- > réalisation de manière symétrique de l'autre demi-ouvrage,
- > coulage de la travée centrale sur des cintres s'appuyant sur les deux amorces déjà construites et mise en précontrainte du tronçon central, pour réaliser le couplage avec les tronçons existants et introduire la précontrainte nécessaire dans la travée centrale.

Descriptif de l'instrumentation mise en place

Six fibres optiques, douze témoins sonores, treize jauges de déformation et huit sondes de température ont été mis en place et répartis dans quatre sections de l'ouvrage, toutes situées dans la travée centrale :

- > la section médiane dans chaque nervure (l'instrumentation de la nervure sud, plus légère que celle de la nervure nord, étant essentiellement destinée à examiner la transmission des efforts d'une nervure à l'autre en cas de chargement dissymétrique de l'ouvrage),
- > une section située à 1,10 m de l'appui P5 (ce type d'ouvrage étant susceptible de présenter des désordres près des appuis) dans la nervure nord seulement,
- > une section proche de la section de couplage située à 2,40 m de ce même appui également dans une seule nervure,
- > une section complémentaire dans laquelle ont été disposés deux témoins de retrait.

Tous ces capteurs étaient reliés à une centrale de type Osiris de la

société TELEMAT qui avait fourni les témoins sonores à cordes vibrantes de type C110.

Les jauges de déformation, préparées par le LRPC de Bordeaux, étaient fixées sur des aciers destinés à être mis en place dans le ferrailage (fig. 2). Un traitement particulier est appliqué à ces capteurs pour leur assurer une durée de vie la plus longue possible.

Les six fibres optiques étaient placées près des fibres extrêmes, d'une part dans chaque nervure de la section médiane, d'autre part dans la nervure nord de la section instrumentée la plus proche de l'appui.

L'instrumentation classique était davantage répartie sur la hauteur des sections.

Les figures 3 et 4 précisent la position de l'ensemble des capteurs mis en place dans les deux sections de l'ouvrage contenant des fibres optiques.

Phases de mesure

Des mesures ont été enregistrées lors des principales phases suivantes :

- > mise en tension de la précontrainte du demi-ouvrage instrumenté,
- > mise en tension de la précontrainte de la travée centrale,
- > épreuves de chargement de l'ouvrage,
- > suivi de l'ouvrage dans le temps.

Enseignements retirés de l'étude

De cette expérience, ressortent divers enseignements relatifs :

- > à la fiabilité des capteurs traditionnels, couramment utilisés pour la mesure des déformations des structures en béton,
- > à l'utilisation pratique des fibres optiques dans des conditions de chantier,
- > à la validité des mesures obtenues par ce procédé.

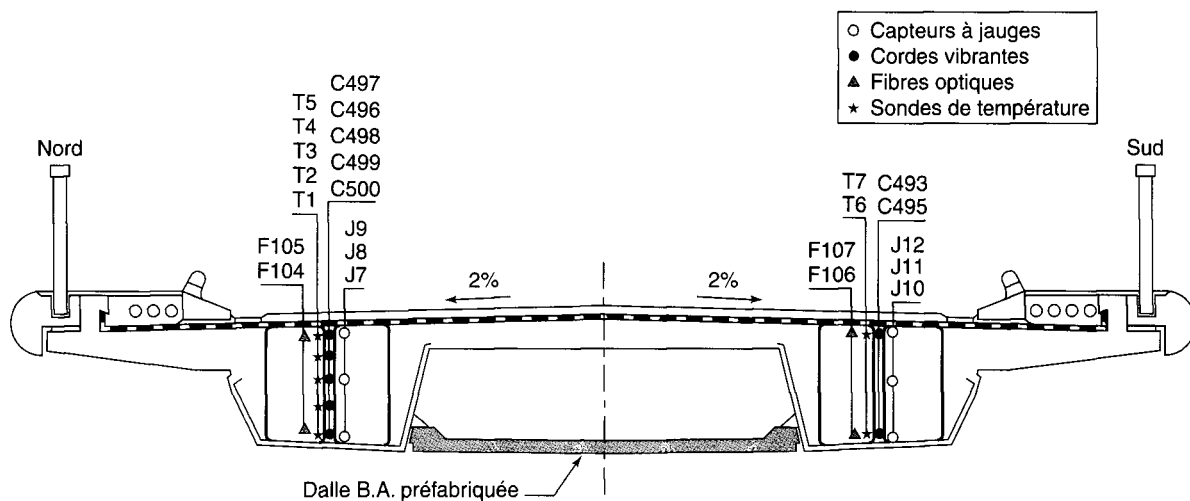
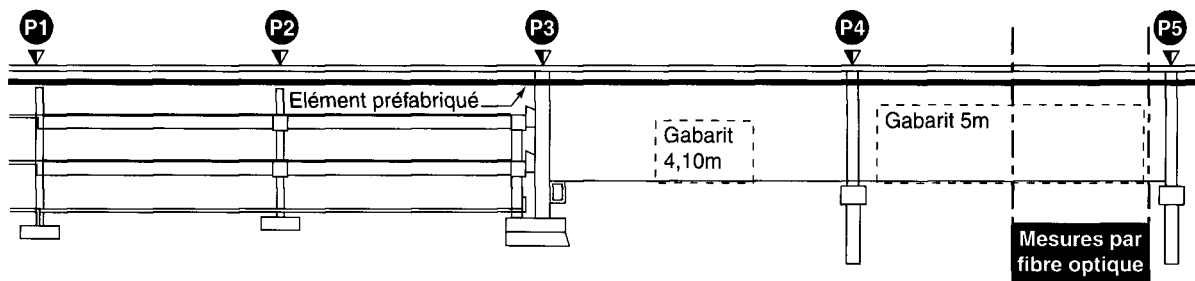


Fig. 3 - Instrumentation de la section médiane de l'ouvrage.

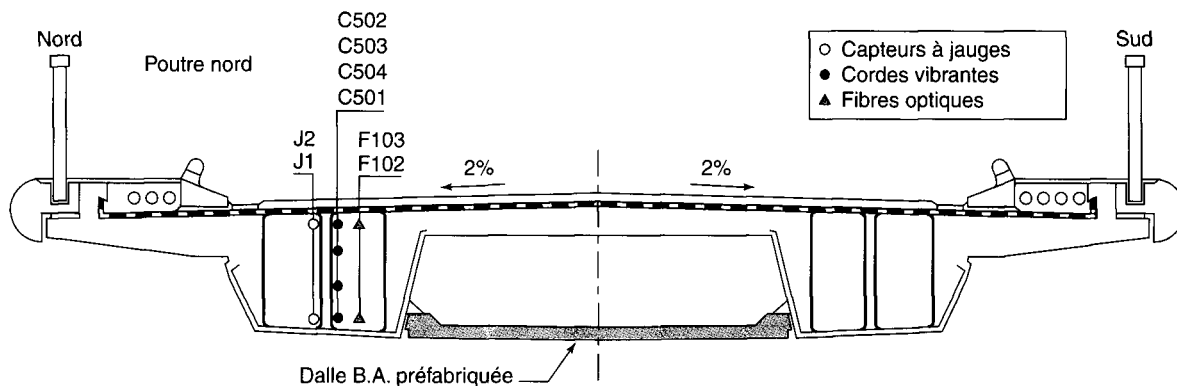


Fig. 4 - Instrumentation de la section proche de l'appui.

Fiabilité des capteurs traditionnels

Pour l'ensemble des mesures analysées, les valeurs de déformation obtenues avec les cordes vibrantes et les jauges de déformation ont été systématiquement identiques ou très voisines, à l'exception d'une jauge vraisemblablement perturbée par la proximité de nombreux aciers ; les faibles écarts éventuellement observés peuvent, dans tous les

cas, s'expliquer par l'incertitude sur la précision d'implantation des instruments.

La concordance des résultats obtenus avec ces deux types de capteurs montre bien la bonne adaptation de ces deux dispositifs pour les mesures effectuées. Cependant, la préférence pour l'un plutôt que l'autre pourrait être subordonnée à un objectif de fiabilité à long terme, qui semble *a priori* plus facile à atteindre

avec des capteurs tels que les témoins sonores à corde vibrante.

Utilisation pratique des fibres optiques

La pose des fibres optiques dans le ferrailage de l'ouvrage avant le bétonnage s'est effectuée sans difficultés majeures. Toutefois, les fibres amorce de transmission utilisées, qui permettent de relier le capteur au conditionneur, semblent sensibles aux manipula-

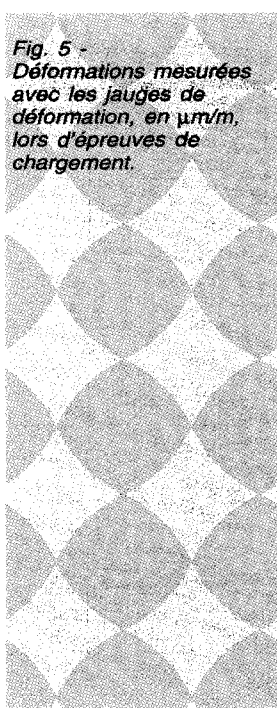
tions. En effet, tout déplacement, tel qu'un désenroulement de ce câble, provoque des modifications de la transmission lumineuse, qui engendrent des atténuations non négligeables par rapport au signal à mesurer. Par ailleurs, il a été observé que des débranchements, suivis de reconnections même immédiates, entraînaient une modification des valeurs indiquées. Il semble donc se poser un problème de contact au niveau du branchement avec le matériel utilisé sur cet ouvrage.

Une autre difficulté rencontrée au cours de cette expérience a été un dysfonctionnement de la chaîne de mesure, observé dès le raccordement des deux conditionneurs optiques sur la centrale d'acquisition et se traduisant par un décalage systématique, pour chaque fibre, entre les valeurs de tension enregistrées sur la centrale et les valeurs relevées manuellement sur les conditionneurs. Ces deux conditionneurs ont été retirés et n'ont pu être remplacés.

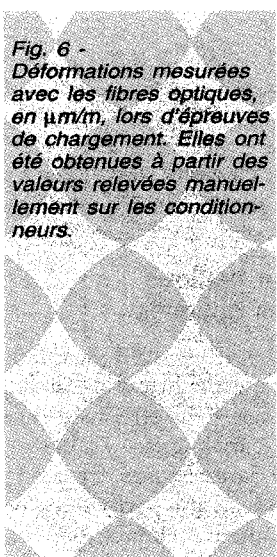
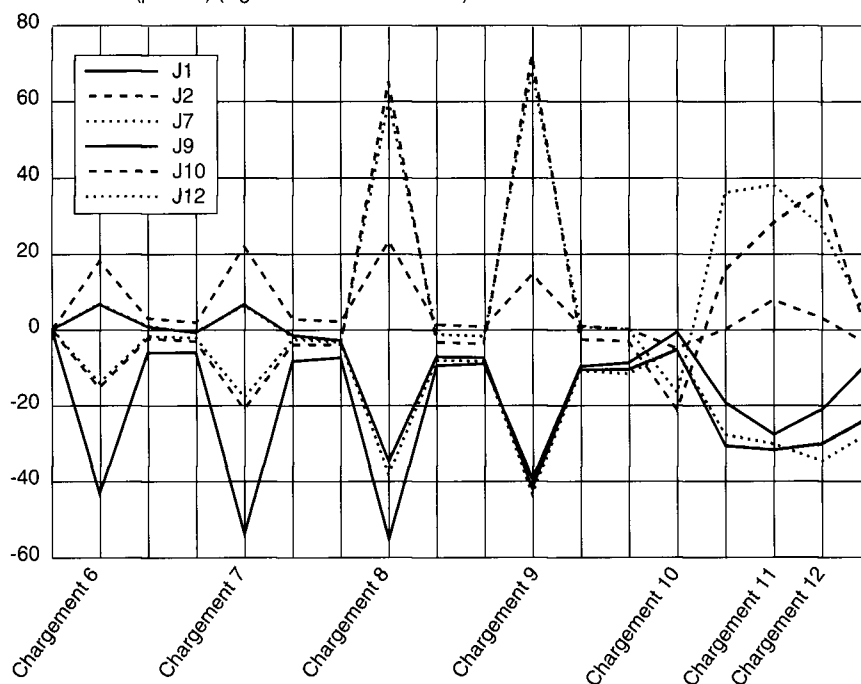
Validité des mesures par fibres optiques

Calibrage de la formule de calcul des déformations

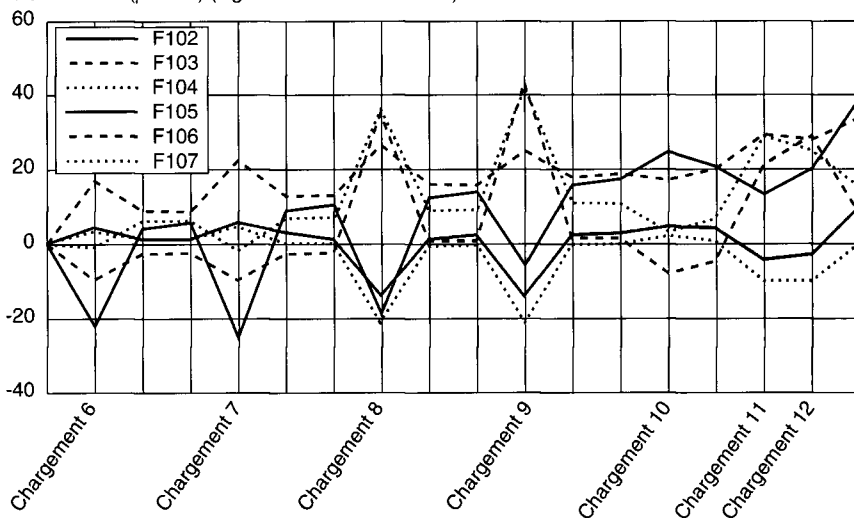
Pour la validité des mesures elles-mêmes, il apparaît que les fibres optiques fournissent, d'une façon générale, des valeurs de déformation assez dispersées, comprises entre la moitié et les trois-quarts des valeurs obtenues avec une instrumentation classique.



Déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$) (signe - : raccourcissement)



Déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$) (signe - : raccourcissement)



dispersion des résultats, il semble donc se poser, pour les fibres, un problème d'étalonnage *in situ*. Ceci est lié, d'une part, à la réponse intrinsèque des capteurs et, d'autre part, aux conditions d'insertion et de fixation des capteurs à l'intérieur du matériau. Sur ce second point, l'obtention d'une référence avant coulage du béton n'est pas encore totalement maîtrisée, compte tenu de la faible rigidité longitudinale du capteur.

À titre d'exemple, l'exploitation des mesures effectuées lors des épreuves de chargement de l'ouvrage montre bien que les courbes, obtenues respectivement avec les jauges de déformations (fig. 5) et les fibres optiques (fig. 6) situées aux mêmes emplacements, ont globalement la même allure mais présentent cependant des amplitudes différentes.

Si l'on considère plus précisément le cas n° 9, correspondant au chargement de la travée centrale, on observe (fig. 7) que la position de l'axe neutre reste sensiblement la même, quel que soit le type de capteur, mais que la pente du diagramme de déformation est inférieure dans le cas des fibres optiques.

Compensation de la température

Il apparaît que la principale difficulté posée par les fibres optiques est celle de la compensation de la température.

Ce problème est illustré par la figure 8 qui montre l'évolution dans le temps des déformations mesurées à proximité des fibres supérieure et inférieure de la section médiane, avec les différents capteurs mis en place.

On constate que :

- > les déformations mesurées avec les jauges et les témoins sonores restent constamment très proches (fig. 8c),
- > avec les fibres optiques (fig. 8a), les déformations mesurées sont différentes des précédentes mais suivent, en revanche, très fidèlement les courbes d'enregistrement de la température représentées sur la figure 8b.

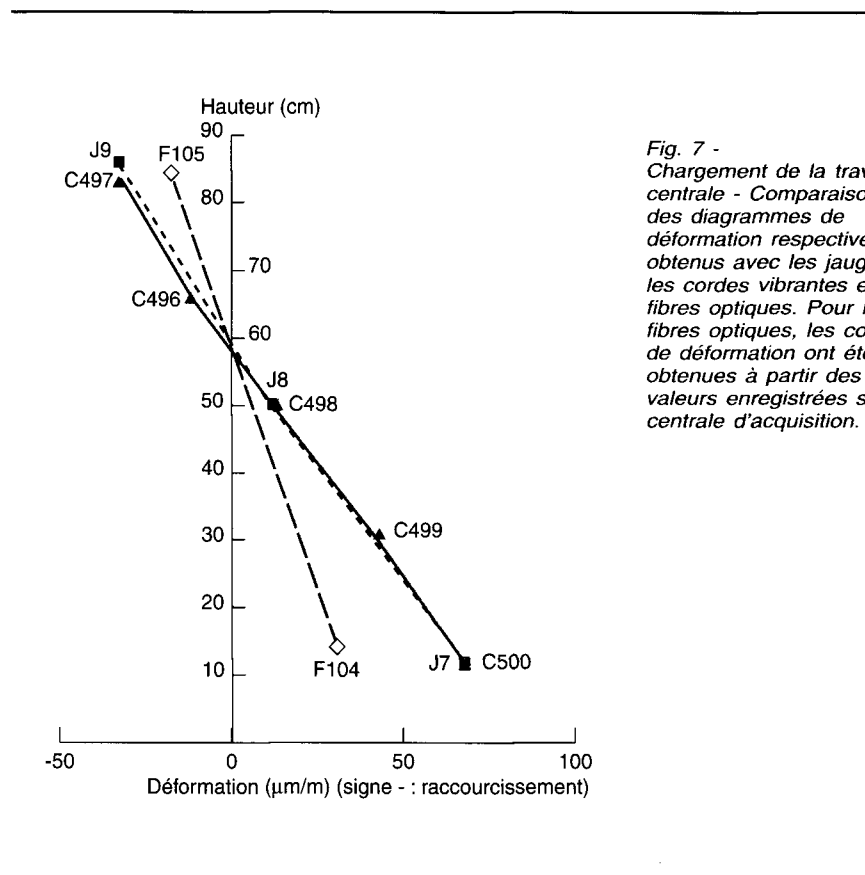


Fig. 7 - Chargement de la travée centrale - Comparaison des diagrammes de déformation respectivement obtenus avec les jauges, les cordes vibrantes et les fibres optiques. Pour les fibres optiques, les courbes de déformation ont été obtenues à partir des valeurs enregistrées sur la centrale d'acquisition.

Ce phénomène s'explique, car les déformations mesurées avec les fibres intègrent non seulement les déformations de l'ouvrage, mais également celles de la fibre elle-même sous l'effet de la température. Pour accéder aux déformations de l'ouvrage seul, il faudrait donc pouvoir isoler du résultat global la part des déformations d'origine thermique propres à la fibre.

Ces problèmes de compensation de température sont vraisemblablement à l'origine des difficultés d'interprétation de mesures, signalées par des gestionnaires d'ouvrages équipés de fibres optiques.

La correction en température se fait par application sur le signal brut d'une loi linéaire de température pilotée par une sonde interne ou externe, donc non liée à la réponse exacte de la fibre. Des expériences nombreuses ont d'ailleurs montré l'insensibilité apparente des fibres optiques à la température (dans le cas de l'atténuation).

Ce n'est évidemment pas le cas pour les fibres biréfringentes testées en polarisation, pour lesquelles la température agit directement sur la biréfringence de la silice.

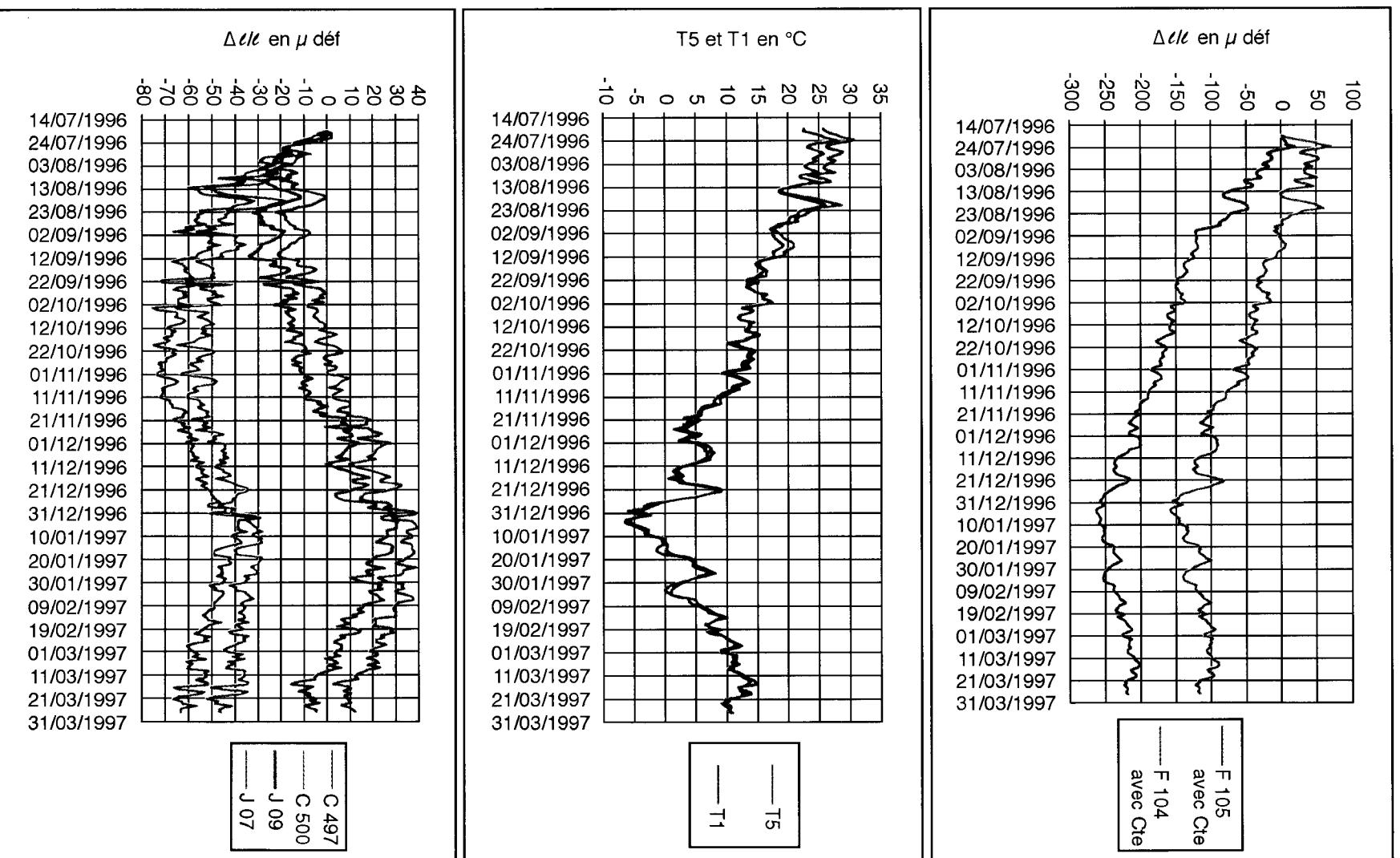
Au plan technologique, avec des fibres à micro-courbures il semble difficile d'espérer pouvoir isoler les phénomènes liés à la température. Une solution pourrait consister à placer en parallèle deux fibres optiques :

- > l'une liée à la structure qui suivrait toutes les déformations de la structure, y compris celles imputables à la température, et les déformations propres de la fibre,
- > l'autre isolée mécaniquement, mais soumise au même champ de température que la précédente, dont les seules déformations seraient liées au comportement propre de la fibre.

Par différence, on pourrait ainsi accéder aux déformations de la structure.

Fig. 8 -
Évolution en fonction
du temps des
mesures enregistrées
près des fibres
extrêmes de la
section médiane.

Evolution en fonction du temps
Section I₁ Poutre Nord
Période de juillet 1996 à mars 1997



En raison du dysfonctionnement de la chaîne de mesure relative aux fibres optiques, se traduisant par une chute des valeurs de tension enregistrées sur la centrale par rapport aux valeurs relevées manuellement au niveau des conditionneurs, les courbes de déformations mesurées avec les fibres optiques ont été obtenues à partir des valeurs de tension enregistrées sur la centrale, augmentées d'un terme constant spécifique à chaque fibre destiné à corriger le décalage observé pour chacune d'elles, lors des vérifications effectuées par le Laboratoire d'Aéroports de Paris en juin 1996.

Précision sur la position des capteurs	Fibres optiques	Sondes de température	Cordes vibrantes	Jauges de déformation
Proches de la fibre supérieure	F 105	T 5	C 497	J 09
Proches de la fibre inférieure	F 104	T 1	C 500	J 07

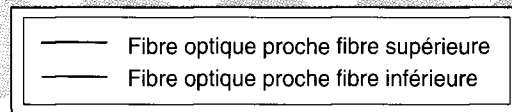


Fig. 8a - Déformations en $\mu\text{m/m}$ mesurées avec les fibres optiques.

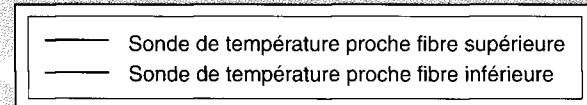


Fig. 8b - Températures en $^{\circ}\text{C}$ mesurées avec les sondes de température.

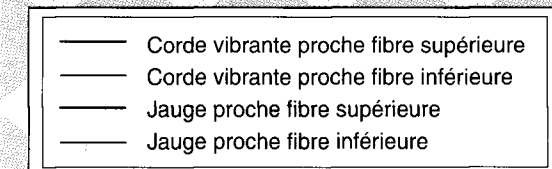


Fig. 8c - Déformations en $\mu\text{m/m}$ mesurées avec les cordes vibrantes et avec les jauges.

Conclusions

L'utilisation des fibres optiques dans la métrologie appliquée aux ouvrages d'art offre sans nul doute des perspectives nouvelles intéressantes. Toutefois leur emploi de manière opérationnelle pour le suivi des ouvrages se heurte actuellement à un certain nombre de difficultés, qui devront être résolues avant d'envisager que ce type de capteurs puisse être utilisé de manière fiable et facilement exploitable pour la surveillance des structures. Outre leur étalonnage, le problème de leur inclusion dans le béton, de l'influence de leur conditionnement (liaison fibre-acier-béton) sur la réponse du capteur, la principale difficulté pour leur application aux ponts concerne la compensation en température.

La recherche d'une solution satisfaisante aux difficultés rencontrées passe par une bonne collaboration entre les sociétés prêtes à développer ce type de capteurs et les services chargés de les valider et de vérifier leur bonne adaptation aux problèmes de métrologie appliquée aux ouvrages d'art.

Il faut enfin signaler le développement actuel d'une nouvelle génération de fibres, dites à réseaux de Bragg, qui, compte tenu des possibilités qu'elles offrent, pourraient trouver des applications intéressantes dans le domaine du génie civil.